

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

МАТЕРИАЛЫ XXIV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(г. Воронеж, 24-27 сентября 2019 г.)



Воронеж 2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

МАТЕРИАЛЫ XXIV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(г. Воронеж, 24-27 сентября 2019 г.)

Воронеж 2019

УДК 539.389(06)
ББК 22.37я4
Р368

Релаксационные явления в твердых телах: материалы XXIV международной конференции (г. Воронеж, 24-27 сентября 2019 г.); ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». - Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2019. 220 с.

ISBN 978-5-7731-0795-8

Сборник содержит результаты экспериментальных и теоретических исследований, выполненных высшими учебными заведениями, научно-исследовательскими институтами, заводскими лабораториями и другими организациями Российской Федерации и других стран в области релаксационных явлений в твердых телах.

Сборник предназначен для работников научных учреждений и высших учебных заведений, заводских инженеров-материаловедов, физиков, а также для всех, кто занимается физикой конденсированного состояния. Также он будет полезен для аспирантов и студентов соответствующих специальностей.

Редакционная коллегия:

Коротков Л.Н.	- д-р физ.-мат. наук, проф. - ответственный редактор Воронежский государственный технический университет;
Калинин Ю.Е.	- д-р физ.-мат. наук, проф. – зам. ответственного редактора Воронежский государственный технический университет;
Жилова О.В.	- канд. физ.-мат. наук, м.н.с. – ответственный секретарь Воронежский государственный технический университет;
Гриднев С.А.	- д-р физ.-мат. наук, проф. Воронежский государственный технический университет;
Иванов О.Н.	- д-р физ.-мат. наук, проф. Белгородский государственный университет;
Сидоркин А.С.	- д-р физ.-мат. наук, проф. Воронежский государственный университет;
Стогней О.В.	- д-р физ.-мат. наук, проф. Воронежский государственный технический университет

УДК 539.389(06)
ББК 22.37я4

*Печатается по решению научно-технического совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-0795-8

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2019

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	11
ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ	12
<i>Topolov V.Yu.</i> STRESS-RELIEF CONCEPTS AND HETEROPHASE STRUCTURES IN PEROVSKITE-TYPE FERROELECTRIC SOLID SOLUTIONS.....	12
<i>Васин А.А., Волков А.А.</i> РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ЛЬДА.....	13
<i>Ефимов Н.Н.</i> МЕДЛЕННАЯ МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ЛАНТАНИДОВ.....	15
<i>Lushnikov S.G., Fedoseev A.I. and Kojima Seiji</i> ACOUSTIC PHONON AND RELAXATION DYNAMICS OF $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ UNDER APPLIED ELECTRIC FIELD.....	16
<i>Коваленко О.В., Васильев С.В., Ткач В.И.</i> КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ПРЕДЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ МНОЖИТЕЛЯМИ И ЭНЕРГИЯМИ АКТИВАЦИИ, КАК ИНДИКАТОР МЕХАНИЗМА ДИФФУЗИИ.....	17
<i>Mitrofanov Yu.P., Kobelev N.P., Khonik V.A.</i> RELAXATION OF THE SHEAR ELASTICITY AS AN INTEGRAL INDICATOR OF RELAXATION PHENOMENA IN METALLIC GLASSES.....	19
<u>Гранкин Э. А.</u> , Шалимов Ю.Н. ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	20
<i>Шур В.Я., Ахматханов А.Р., Есин А.А., Чувакова М.А.</i> ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ФОРМЫ ДОМЕНОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ, ВЫЗВАННАЯ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ЭКРАНИРОВАНИЯ.....	21
<i>Пономаренко А.Т., Шевченко В.Г.</i> РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕПЛОМ ВОСПЛАМЕНЕНИИ В РЕАКТОРЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА.....	23
<i>Leszek B. Magalas</i> HIGH-RESOLUTION MECHANICAL SPECTROSCOPY, HRMS: RECENT PROGRESS AND NOVEL SOLUTIONS.....	24
СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ	26
I. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ	26
<i>Maksimov A.V., Maksimova O.G.</i> KINETICS OF ORIENTATION AND ABSORPTION PROCESSES IN POLYMER SYSTEMS ON SUBSTRATES.....	26
<i>Померанцев Ю.А.</i> РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСЯМИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ.....	27
<i>Nechaev V.N., Shuba A.V.</i> ABOUT THE RELAXATION SPECTRUM OF THIN FERROELECTRIC FILM IN A PHASE TRANSITION POINT.....	29
<i>Nechaev V.N., Shuba A.V.</i> INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTRIC FIELD ON PHASE TRANSITIONS IN THE RESTRICTED FERROELECTRICS.....	30
<i>Palacheva V.V., Mohamed A.K., Mansouri Y., Cifre J., Mari D., Bobrikov I.A., Balagurov A.M., Golovin I.S.</i> MECHANICAL SPECTROSCOPY AS AN IN SITU TOOL TO STUDY FIRST AND SECOND ORDER TRANSITIONS IN Fe-Ga ALLOYS AT ELEVATED TEMPERATURES.....	32
<i>Луговая М.А., Швецова Н.А., Резниченко А.Н., Рыбьянец А.Н.</i> ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ УПРУГОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И ЗАТУХАНИЕМ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ.....	33
<i>Кульков В.Г., Сыщиков А.А.</i> ВКЛАД ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ ПОР В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФОН ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ С УЛЬТРАМЕЛКИМ ЗЕРНОМ.....	35

<i>Ельникова Л.В.</i> МОДЕЛЬ СУ- ШРИФФЕРА-ХИГЕРА И АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В ЛИОТРОПНЫХ СИСТЕМАХ С ДИССИПАЦИЕЙ.....	36
<i>Дежин В.В.</i> О РАДИАЦИОННОМ ЗАТУХАНИИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИСЛОКАЦИИ В ДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ.....	37
<i>Бондарев А.В., Батаронов И.Л., Папуева И.М.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ.....	39
II. МЕХАНИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ	40
<i>Митрофанов Ю.П., Гончарова Е.В., Zhou H., Wilde G., Хоник В.А.</i> РЕЛАКСАЦИЯ МОДУЛЯ СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ Pd ₄₀ Ni ₄₀ P ₂₀ ПО- СЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ.....	40
<i>Шалимов Ю.Н., Кудряш В.И., Шалимов Д.Л.</i> ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В СТРУКТУРАХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ХРОМА.....	41
<i>Mohamed A.K., Zadorozhnyy M.Yu., Saveliyev D.V., Chudakov I.B., Golovin I.S.</i> FORMATION OF THE ENHANCED DAMPING STATE IN HIGH-PURITY COLD- ROLLED Fe-18Cr ALLOY.....	43
<i>Mohamed A.K., Palacheva V.V., Cheverikin V.V., Pozdnyakov A.V., Balagurov A.M., Bobrikov I.A., Gasser J.- G., Tabary P., Mounier T., Golovin I.S.</i> STUDY OF STRUCTURE, PHASE TRANSITIONS AND ANELASTIC EFFECTS IN Fe-x at.%Ga ALLOYS (x=25, 27, 33).....	44
<i>Калинин Ю.Е., Караева О.А., Кудрин А.М., Овдак О.В., Каширин М.А.</i> ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ СТЕКЛОУГЛЕПЛАСТИКОВ С МАТРИЦЕЙ Т-107.....	46
<i>Кончаков Р.А., Макаров А.С., Митрофанов Ю.П., Хоник В.А., Кобелев Н.П.</i> О ПРИРОДЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕ- СКИХ СТЕКЛАХ.....	47
<i>Liying Sun, Islamov A.Kh., Weimin Guo, Cifre J., Zadorozhnyy M.Y., Golovin I.S.</i> EFFECT OF SPINODAL DECOMPOSITION ON REVERSIBLE MARTENSITIC TRANS- FORMATION IN Mn-15Cu AND Mn-12Cu-3Cr ALLOYS.....	49
<i>Liying Sun, Cheng W.C., Balagurov A.M., Bobrikov I.A., Cifre J., Chudakov I.B., Cheverikin V.V., Zadorozhnyy M.Y., Golovin I.S.</i> STUDY OF MARTENSITIC TRANSITION IN Fe-Mn BASED ALLOYS.....	50
<i>Лимановский А.И., Саяпин В.Н., Ткаченко В.М., Цветков Т.В., Свиридова Е.А., Парфений В.И., Васильев С.В., Терехов С.В., Ткач В.И.</i> СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ БЫСТРООХЛА- ЖДЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ Al, КОНСОЛИДИРОВАННЫХ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ	52
<i>Васильев С.В., Парфений В.И., Свиридова Е.А., Ткач В.И.</i> ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ХАРАКТЕР ЗАРОЖДЕНИЯ КРИ- СТАЛЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ.....	54
III. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ	56
<i>Varuzdina O. S., Maksimova O. G., Maksimov A. V.</i> SIMULATION OF THE SWITCHING IN THIN FERROELECTRIC FILMS.....	56
<i>Григорян Г.С., Солодуха А.М.</i> ОСОБЕННОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН КЕ- РАМИЧЕСКОГО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-ПОЛУПРОВОДНИКА.....	56
<i>Burkhanov A.I., Al Walo Walo, Mednikov S.V., Ponomarev A.S.</i> PHOTOCHROMIC EFFECT IN THE PZT FERROELECTRIC CERAMICS.....	58
<i>Milinskiy A. Yu., Baryshnikov S. V., Charnaya E. V., Egorova I. V.</i> CONDITIONS OF THE FERROELECTRIC PHASE FORMATION IN DIISOPROP- YLAMMONIUM IODIDE.....	59
<i>Милинский А. Ю., Барышников С. В., Чарная Е. В., Егорова И. В.</i> ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИ- ТОВ C ₆ H ₁₆ NBr/Al ₂ O ₃	61

<i>Stukova E.V., Koroleva E.Yu., Baryshnikov S.V., Sakhnenko A.V.</i> DIELECTRIC AND CALORIMETRIC STUDIES OF FERROELECTRIC COMPOSITIONS (C ₆ H ₁₆ NBr) _{1-x} /(BaTiO ₃) _x	63
<i>Абдулвахидов Б.К., Садыков С.А., Сирота М.А., Дмитренко И.П., Солдатов А.В., Абдулвахидов К.Г., Будник А.П., Пляка П.С.</i> ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ РЬМn _{1/3} Nb _{2/3} O ₃	64
<i>Абдулвахидов К.Г., Сирота М.А.</i> УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СЕГНЕТО-ЭЛЕКТРИКОВ МЕХА- НИЧЕСКИМ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ.....	65
<i>Бурцев А.В., Педько Б.Б.</i> СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-РЕЛАКСОРА SBN.....	66
<i>Nechaev V. N., Viskovatykh A. V.</i> DOMAIN STRUCTURE IN NANOSCALE FERROELASTICS.....	67
<i>Nechaev V. N., Viskovatykh A. V.</i> INHOMOGENEOUS POLARIZATION FLUCTUATIONS AND RELAXATION OF THE POLARIZATION OF THE FERROELECTRIC INCLUSIONS IN NANOCOMPOSITE FERROELECTRIC-DIELECTRIC.....	69
<i>Gorbatenko V. V., Prasolov B. N., Gorbatenko S. A., Datsenko N. V.</i> THE RELIEF SHAPE CHANGING OF THE CRYSTAL Rb ₂ ZnCl ₄ ELECTRICAL ENERGY DEPENDENCE FROM POLARIZATION IN THE DOMAIN STRUCTURE FREEZING TEMPERATURE VICINITY (T*≈150 K).....	71
<i>Gorbatenko V. V., Prasolov B. N., Gorbatenko S. A., Datsenko N. V.</i> THE CRYSTAL Rb ₂ ZnCl ₄ ELECTRIC ENERGY TEMPORAL EVOLUTION AS A FUNC- TION OF POLARIZATION IN THE FERROELECTRIC PHASE NEAR THE CURIE POINT.....	72
<i>Burkhanov A. I., Dikov R. V., Bormanis K.</i> REVERSIBLE CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC PROPERTIES IN MODIFIED FERROELECTRIC Ba _{0.95} Pb _{0.05} TiO ₃ CERAMICS.....	74
<i>Golitsyna O.M., Drozhdin S.N., Lesnikova V.O.</i> RELAXATION OF NONEQUILIBRIUM DOMAIN STRUCTURE OF TRIGLYCINE SUL- FATE NEAR THE CURIE POINT.....	75
<i>Golitsyna O.M., Drozhdin S.N., Lun A.Yu.</i> EFFECT OF STATIC MAGNETIC FIELD ON THE DIELECTRIC AND FERROELECTRIC PARAMETERS OF TRIGLYCINE SULFATE CRYSTAL.....	77
<i>Дыбов В.А., Сериков Д.В., Белоногов Е.К.</i> СИНТЕЗ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПЛЁНОК LiNbO ₃	78
<i>Гриднев С.А., Кобяков И.Ю.</i> ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕССВИНЦОВОЙ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ BiNi _{0.67} Sb _{0.33} O ₃	79
<i>Коротков Л.Н., Бочаров А.И., Панкова М.А., Толстых Н.А., Аль Джаафари Ф.Д.</i> РЕЛАКСОРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО SrTiO ₃	80
<i>Коротков Л.Н., Короткова Т.Н.</i> РЕТАРДАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЕ ДИГИДРО- ФОСФАТА КАЛИЯ.....	82
<i>Лебедев А.И.</i> ЭКЗОТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ВАКАНСИИ ТИТАНА В НАНОПЛАСТИНКАХ TiO ₂	83
<i>Лебединская А.Р.</i> СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НИЗКО- ТЕМПЕРАТУРНОЙ ФАЗЫ В МАГНОНИОБАТЕ СВИНЦА.....	85
<i>Луговая М.А., Петрова Е.И., Швецова Н.А., Рыбьянец А.Н.</i> ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВА- НИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКАХ.....	86
<i>Marakhovskiy M.A., Panich A.A., Marakhovskiy B.A.</i> EFFECT OF SINTERING METHODS ON THE FUNCTIONAL CHARAC-TERISTICS OF THE FERROELECTRIC PIEZOCERAMIC MATERIAL OF THE PZT SYSTEM.....	88

<i>Миловидова С.Д., Рогазинская О.В., Даринский Б.М., Ничуговская Е.С.</i> РЕЛАКСАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПОРИСТОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ.....	89
<i>Миловидова С.Д., Рогазинская О.В., Даринский Б.М.</i> ВЛИЯНИЕ ИЗОПРОПАНОЛА НА РЕЛАКСАЦИЮ УНИПОЛЯРНОГО СОСТОЯНИЯ КРИСТАЛЛА ТГС.....	90
<i>Kubrin S.P., Raevski I.P., Miruschenko M.D., Bikiyashev E.A., Malitskaya M.A., Zakharchenko I.N., Raevskaya S.I., Titov V.V., Jian Zhuang</i> STUDIES OF THE ION SUBSTITUTION EFFECT ON THE MAGNETIC PHASE TRANSITION TEMPERATURE OF $\text{BiFeO}_3\text{ATiO}_3$ (A=Pb, Sr) SOLID SOLUTION MULTIFERROICS.....	92
<i>Морсаков И.М., Солнышкин А.В., Иванов А., Белов А.Н.</i> ФОТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПЛЕНКАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА- ПОЛУПРОВОДНИКА $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$	93
<i>Сидоркин А.С., Gagou Y., Saint-Gregoire P., Нестеренко Л.П., Поправко Н.Г., Пахомов А.Ю.</i> СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА БАРИЯ.....	95
<i>Petrov V.V., Polyakov V.V., Varzarev Yu.N., Rozhko A.A., Kamentsev A.S.</i> RELAXATION OF THE STRUCTURE OF THIN PZT FILMS DURING RAPID THERMAL ANNEALING.....	96
<i>Петрова Е.И., Луговая М.А., Щербинин С.А., Рыбьянец А.Н.</i> УПРУГИЕ АНОМАЛИИ В ОБЛАСТИ РАЗМЫТОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В РЕЛАКСОРНОЙ СЕГНТОПЬЕЗОКЕРАМИКЕ ЦТСЛ.....	98
<i>Гриднев С.А., Попов И.И.</i> ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$	99
<i>Каптелов Е.Ю., Сенкевич С.В., Пронин И.П., Вольпяс В.А., Козарев А.Б.</i> ВАРЬИРОВАНИЕ СОСТАВА ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАСПЫЛЕНИЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ.....	100
<i>Raevski I.P., Kubrin S.P., Shuvaeva V.A., Raevskaya S.I., Malitskaya M.A., Iorshin V.A., Zakharchenko I.N., Titov V.V., Dellis J.-L., Li G. R.</i> EVOLUTION OF DIELECTRIC PROPERTIES IN THE $(1-x)\text{NaNbO}_3 - x\text{Gd}_{1/3}\text{NbO}_3$ SOLID SOLUTION SYSTEM.....	102
<i>Швецова Н.А., Петрова Е.И., Макарьев Д.И., Рыбьянец А.Н.</i> АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ.....	103
<i>Резниченко А.Н., Щербинин С.А., Швецов И.А., Рыбьянец А.Н.</i> МЕТОД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ СЕГНЕТО- И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ.....	105
<i>Сенкевич С.В., Киселев Д.А., Каптелов Е.Ю., Пронин И.П.</i> МИКРОСТРУКТУРА И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕРОВСКИТОВЫХ ОСТРОВКОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ PZT.....	106
<i>Иванов В.В., Голубева Е.Н., Сергеева О.Н., Некрасова Г.М., Пронин И.П., Киселев Д.А.</i> КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ЦТС.....	108
<i>Сериков Д.В., Дыбов В.А.</i> СТРУКТУРА ПЛЁНОК Li-Nb-O ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА ИЛИ ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКИ.....	110
<i>Сирота М.А., Витченко М.А., Мардасова И.В., Абдулвахидов К.Г., Будник А.П., Пляка П.С., Назаренко А.Н., Солдатов А.В., Черкасова С.В.</i> МЕХАНОАКТИВАЦИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНТИСЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА PbZrO_3	111
<i>Швецов И.А., Луговая М.А., Швецова Н.А., Рыбьянец А.Н.</i> УПРУГИЕ ПОТЕРИ И ДИСПЕРСИЯ В ПОРИСТОЙ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКЕ.....	112

<i>Скрылёв А.В., Акбаева Г.М., Бурханов А.И., Сопит А.В.</i> ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКЕ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР.....	114
<i>Швецова Н.А., Макарьев Д.И., Петрова Е.И., Рыбьянец А.Н.</i> ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ КОНСТАНТ БЕССВИНЦОВОЙ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКИ.....	115
<i>Солнышкин А.В., Ли И.Л., Морсаков И.М., Сеньковский А.Д., Белов А.Н.</i> РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ.....	117
<i>Стекленева Л.С., Коротков Л.Н., Рысякевич-Пасек Е.</i> ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В НАНОКОМПОЗИТЕ $Rb_2ZnCl_4 - SiO_2$	119
<i>Таланов М.В., Буш А.А., Каменцев К.Е., Иванов С.А.</i> ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $Bi_2Ti_2O_7$	120
<i>Fedoseev A.I., Lushnikov S.G., Zaleskii V.G., Katyar R.S., Ko J.-H.</i> THE STUDY OF PHONON DYNAMICS IN RELAXOR FERROELECTRIC $PbNi_{1/3}Nb_{2/3}O_3$	122
<i>Гриднев С.А., Хахленков М.В., Толстых Н.А.</i> РОЛЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЛАКСОРА 0,89PMN-0,11PZT В МАГНИТО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОТКЛИКЕ КОМПОЗИТА «РЕЛАКСОР-ФЕРРИТ».....	124
<i>Швецов И.А., Макарьев Д.И., Швецова Н.А., Рыбьянец А.Н.</i> УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ.....	125
<i>Шихова В.А., Федоровых В.В., Чезанов Д.С., Власов Е.О., Зеленковский П.С., Грешняков Е.Д., Небогатиков М.С., Шур В.Я., Ивлева Л.И.</i> ЛОКАЛЬНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ И ИОННЫМ ПУЧКОМ В МОНОКРИСТАЛЛАХ НИОБАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ	126
<i>Шнайдитейн И.В.</i> СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ PIN-PMN-PT МЕТОДАМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ТЕПЛОВЫХ ШУМОВ.....	128
IV. МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ	129
<i>Morgunov R.B., Bezverhnyi A.I., Koplak O.V.</i> OSCILLATORY DYNAMICS OF MAGNETIC RELAXATION IN Pt/Co/Ir/Co/Pt SYNTHETIC ANTIFERROMAGNET.....	129
<i>Безверхний А.И., Таланцев А.Д., Моргунов Р.Б.</i> НЕМОНОТОННАЯ ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДОМЕННОЙ СТЕНКИ КАК СЛЕДСТВИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРОДЫШЕЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ РАЗНОГО ЗНАКА В СИНТЕТИЧЕСКИХ ФЕРРИМАГНЕТИКАХ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ Pt/Co/Ir/Co/Pt.....	130
<i>Ivanov O.N., Zakhvalonskii V.S., Nikulicheva T.B., Yaprntsev M.N.</i> FEATURES IN TRANSVERSE ELECTRICAL RESISTIVITY OF MAGNETIC $ZnMn_2As_2$ SEMICONDUCTOR AT TRANSITION INTO SPIN-GLASS-LIKE STATE.....	132
<i>Морозова Н.В., Кокорин В.И., Морозов И.Л., Гаврилюк А.А.</i> ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ $Fe_{73}Co_{12}B_{15}$ и $Fe_{81,5}B_{13,5}Si_3C_2$	133
<i>Семенова Е.М., Ляхова М.Б., Карпенков А.Ю., Синкевич А.И., Пастушенков Ю.Г.</i> ТРАНСФОРМАЦИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ РЕЛАКСАЦИОННЫМ ПРОЦЕССАМ НА ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА.....	135
<i>Lebedev A.I., Sluchinskaya I.A.</i> OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF TiO_2 NANOSHEETS DOPED WITH 3d ELEMENTS.....	136
<i>Yavar Mansouri, Palacheva V.V., Koshmin A., Golovin I.S.</i> EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON MICROSTRUCTURAL AND MAGNETOSTRICTION PROPERTIES OF TERNARY Fe-Ga-NbC ALLOY.....	138

<i>Котов Л.Н., Ласёк М.П., Турков В.К., Холопов Д.М., Vlasov V.S., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.</i>	
МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНКАХ: МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК/УГЛЕРОД.....	139
<i>Zhilova O.V., Sitnikov A.V., Babkina I.V., Pankov S.Yu., Antsev A.P.</i>	
ELECTRICAL AND MAGNETORESISTANCE PROPERTIES OF MULTILAYER FILMS BASED COMPOSITE-SEMICONDUCTOR.....	141
V. РЕЛАКСАЦИЯ В НАНОСИСТЕМАХ	143
<i>Аралов М.Н., Барабанов В.Ф., Подвальный С.Л., Кенин С.Л.</i>	
РЕЛАКСАЦИЯ МУЛЬТИСЛОЙНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И КОМПОНОВКА ЕГО СТРУКТУРЫ.....	143
<i>Бабкина И.В., Каширин М.А., Ситников А.В., Волочаев М.Н., Чехонадских М.В.</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТАБИЛЬНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР КОМПОЗИТ – ПОЛУПРОВОДНИК.....	144
<i>Волочаев М.Н., Мягков В.Г., Жигалов В.С., Быкова Л.Е.</i>	
ТОНКИЕ НАНОГРАНУЛИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПЛЁНКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ И НИТРИДНЫХ МАТРИЦ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ПЛАНАРНОЙ МЕТАЛЛОТЕРМИИ.....	145
<i>Кабиров Ю.В., Сидоренко Е.Н., Пруцакова Н.В., Чебанова Е.В.</i>	
НЕСОБСТВЕННЫЕ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$	147
<i>Kop拉克 O.V., Morgunov R.B., Hehn M., Vallobra P., Mangin S.</i>	
AFTER-EFFECT OF FEMTOSECOND LASER IRRADIATION IN Ta/Pt/GdFeCo/IrMn/Pt HETEROSTRUCTURES.....	148
<i>Котов Л.Н., Ласёк М.П., Уляшев А.М., Калинин Ю.Е., Ситников А.В.</i>	
ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ВЧ, СВЧ ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК.....	150
<i>Макагонов В.А., Панков С.Ю., Гребенников А.А., Фошин В.А.</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ В ВАКУУМЕ НА ЭЛЕКТРОПЕРЕНОС В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО УГЛЕРОДА.....	152
<i>Макаров А.С., Митрофанов Ю.П., Кончаков Р.А., Кобелев Н.П., Csach K., Qiao J.C., Хоник В.А.</i>	
ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ В ХОДЕ СТРУКТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ.....	153
<i>Макарьев Д.И., Луговая М.А., Резниченко А.Н., Рыбьянец А.Н.</i>	
ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИФРОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ "ПЬЕЗОКЕРАМИКА-ПОЛИМЕР".....	155
<i>Pankov S.Yu., Makagonov V.A., Zhilova O.V., Sitnikov A.V., Kalinin Yu.E.</i>	
INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON STRUCTURE AND ELECTRICAL PROPERTIES MULTILAYERED THIN FILMS BASED ON OXIDE SEMICONDUCTORS.....	156
<i>Nechaev V.N., Shuba A.V.</i>	
INFLUENCE OF DISSIPATIVE PROPERTIES ON THE MAGNETOELECTRIC COEFFICIENT IN MULTILAYER FILMS.....	158
<i>Яковлева К.С., Смирнов А.Н., Адиле Х., Стогней О.В.</i>	
ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Ni-(AlZrO) ₃	159
<i>Сайтулаева Л.А., Гаджиалиев М.М., Алибеков А.Г.</i>	
РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В $Cd_3As_2+44.7$ мол.% MnAs ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ.....	161
VI. РАЗНОЕ	163
<i>Пермяков Д.С., Рембеза С.И., Меньшикова Т.Г.</i>	
ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК CuO, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ.....	163
<i>Белых М.А., Рембеза С.И.</i>	
ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ АЛЮМИНИЯ НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК ZnO.....	164

<i>Полковников В.Е., Рембеза С.И.</i> ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ПАРАМЕТРЫ МЕТАЛЛОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗОМ.....	165
<i>Бавыкин В.В., Калинин Ю.Е.</i> ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ PbTe.....	167
<i>Батаронов И. Л., Шунин Г. Е., Кострюков С. А., Пешков В. В., Писарев С. В.</i> КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПАХ.....	168
<i>Васин А.А., Волков А.А., Волков А.А.</i> ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОЙ ВОДЫ В ТЕРМИНАХ ИОН-МОЛЕКУЛЯРНОЙ МОДЕЛИ.....	170
<i>Alekperov A.S., Gasanov O.M., Adgezalova Kh.A., Huseynov Dzh.I.</i> OPTICAL AND ELECTRIC PHENOMENA IN AMORPHIC FILMS OF GeS DOPED REE..	171
<i>Yaprintsev M.N., Vasil'ev A.E., Ivanov O.N., Zhezhu M.V.</i> ELECTRICAL RESISTIVITY AND SEEBECK COEFFICIENT OF THE COMPOSITES CONSISTING OF “Bi _{0.4} Sb _{1.6} Te ₃ (MATRIX) – SnSe (FILLER)”.....	172
<i>Захвалинский В.С., Пилюк Е.А., Иванчихин С.В., Кочура А.В., Зо Хтет Аунг</i> СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК ДИРАКОВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА Cd ₃ As ₂	174
<i>Звягинцева А.В., Шалимов Ю.Н.</i> РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	176
<i>Звягинцева А.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ С УЧЕТОМ ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ.....	177
<i>Камалова Н.С., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Лисицын В.И.</i> ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ПРИРОДНОГО БИОПОЛИМЕРА ПРИ ПЕРЕПАДЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ.....	179
<i>Камалова Н.С., Матвеев Н.Н., Евсикова Н.Ю., Саврасова Н.А.</i> ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОСТИ ЛИНЕЙНОГО ПИРОЭЛЕКТРИКА В НЕОДНОРОДНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ.....	180
<i>Камалова Н.С., Постников В.В., Саушкин В.В.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОРАХ ПРИРОДНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ	182
<i>Карманова О.В., Подвальный С.Л., Шутилин Ю.Ф., Тихомиров С.Г., Лынова А.С.</i> ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ВУЛКАНИЗАЦИИ СМЕСЕЙ КАУЧУКОВ.....	183
<i>Костюченко А.В.</i> СТРУКТУРНЫЕ И СУБСТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ФОСФАТАХ КАЛЬЦИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ.....	185
<i>Макарьев Д.И., Резниченко А.Н., Луговая М.А., Рыбьянец А.Н.</i> ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ.....	186
<i>Миленин А.В., Ожерельев В.В., Дерипаско С.А.</i> МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ СПЛАВА Cu ₈ Zr ₃	188
<i>Ожерельев В.В., Титаренко А.О.</i> АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА Cu ₅₅ Pd ₄₅	189
<i>Перепечина Т.А., Рембеза С.И., Свистова Т.В.</i> ИЗМЕНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ SnO ₂ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАЗОВ-ОКИСЛИТЕЛЕЙ.....	191
<i>Petrov V.V., Bayan E.M., Storozhenko V.Yu., Varzarev Yu.N., Starnikova A.P., Khubezhov S.A.</i> GAS SENSITIVE PROPERTIES SnO ₂ -ZnO THIN FILMS.....	193
<i>Рыбьянец А.Н., Щербинин С.А., Швецов И.А., Макарьев Д.И.</i> ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕДАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН.....	194

<i>Рыбьянец А.Н., Швецова Н.А., Швецов И.А., Щербинин С.А.</i> ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПЛОСКИМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОХЛАЖДАЕМОЙ ПО- ВЕРХНОСТЬЮ.....	195
<i>Самофалова А.С., Звягинцева А.В.</i> СТРУКТУРНЫЕ И ПРИМЕСНЫЕ ЛОВУШКИ ДЛЯ АТОМОВ ВОДОРОДА В ЭЛЕК- ТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ.....	196
<i>Сергеев А.В., Голев И.М.</i> НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИК-НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ СИСТЕМЫ Bi-Sr-Ca-Cu-O.....	198
<i>Смирнов А.Н., Стогней О.В.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР Mg/(ZrAlO) ₄₅	200
<i>Щербинин С.А., Швецов И.А., Колпачева Н.А., Рыбьянец А.Н.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПЛОСКИМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОХЛАЖДАЕМОЙ ПО- ВЕРХНОСТЬЮ.....	201
<i>Щербинин С.А., Петрова Е.И., Резниченко А.Н., Рыбьянец А.Н.</i> КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ СТОЯ- ЧИМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ.....	203
<i>Yaprintsev M.N., Vasil'ev A.E., Ivanov O.N., Zhezhu M.V.</i> THERMOELECTRIC PROPERTIES OF THE Bi _{1.9} Gd _{0.1} Te ₃ COMPOUND SPS-PREPARED AT DIFFERENT TEMPERATURES.....	205
<i>Сардарлы Р.М., Салманов Ф.Т., Алиева Н.А.</i> ПРОВОДИМОСТЬ ПО ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СОСТОЯНИЯМ ТВЕРДЫХ РАСТВО- РОВ TlGa _{1-x} In _x Se ₂	206
VII. АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ.....	208
<i>Панюшкин А.Н., Панюшкин Н.Н.</i> ЭФФЕКТИВНАЯ ТОЛЩИНА ПЛОСКОЙ ГОМОГЕННОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАЩИ- ТЫ.....	208
<i>Панюшкин А.Н., Панюшкин Н.Н., Зольников В.К.</i> РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНОЙ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ ВНУТРИ СПЛОШНОЙ ЗАЩИТЫ В ФОРМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА.....	209
<i>Тихомиров С.Г., Подвальный С.Л., Ряжских В.И., Хвостов А.А., Карманов А.В.</i> ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ.....	211
<i>Кустов А.И., Мигель И.А.</i> АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ СОСТОЯНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ.....	212
<i>Зеленев В.М., Кустов А.И., Мигель И.А.</i> ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ХАРАКТЕР РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТО- ДАМИ АКУСТОМИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ.....	214
<i>Зеленев В.М., Кустов А.И., Мигель И.А.</i> ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МЕТОДАМИ АКУ- СТОМИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ.....	216
<i>Сапожников К.В., Николаев В.И., Крымов В.М., Кустов С.Б.</i> АКУСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВОЙНИКОВЫХ ГРА- НИЦ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ В МАРТЕНСИТНОЙ ФАЗЕ МОНОКРИСТАЛ- ЛОВ Ni-Fe-Ga.....	218

ВВЕДЕНИЕ

Сборник содержит материалы докладов участников 24 Международной конференции по релаксационным явлениям в твердых телах (RPS - 24). Организаторами конференции являются Российская академия наук и Воронежский государственный технический университет.

Представленные материалы отражают полученные за последние четыре года основные результаты теоретических и экспериментальных исследований механизмов релаксационных процессов в металлах, полупроводниках, сегнетоэлектриках, магнетиках, полимерных материалах и гетероструктурах. В работе конференции заявлено участие представителей российских образовательных и научных организаций из Белгорода, Благовещенска, Волгограда, Волжска, Воронежа, Екатеринбурга, Иркутска, Красноярска, Курска, Махачкалы, Москвы, Ростова-на-Дону, С. Петербурга, Таганрога, Тамбова, Твери, Томска, Череповца, Черногловки и др. городов Российской Федерации, а также ученые зарубежных стран — Азербайджана, Польши, Украины, Германии, Китая, Франции, Египта и др. стран.

Наряду с механической релаксацией, результаты исследований которой обсуждаются традиционно подробно, на данной конференции в значительном объеме представлены работы, посвященные анализу механизмов, диэлектрической и магнитной релаксации, а также акустической спектроскопии. Особое внимание уделено релаксационным процессам в неоднородных и наноразмерных системах.

Предлагаемое вниманию читателей издание содержит материалы, показывающие состояние вопроса и перспективы развития одного из актуальных разделов физики твердого тела — теории и экспериментального изучения механизмов механической, диэлектрической и магнитной релаксации. Полученные результаты весьма важны для современного материаловедения, поскольку позволяют прогнозировать поведение материалов при различных температурно-силовых условиях эксплуатации, при воздействии различных сред, а также анализировать, происходящие в них структурные изменения.

Сборник публикуемых статей включает следующие разделы: I. Вопросы теории релаксационных явлений; II. Механическая релаксация; III. Диэлектрическая релаксация; IV. Магнитная релаксация. V. Релаксация в наносистемах. VI. Разное. VII. Акустическая спектроскопия и ее приложения.

ПЛЕНАРНЫЕ ДОКЛАДЫ

UDC 537.226.33+548.0

STRESS-RELIEF CONCEPTS AND HETEROPHASE STRUCTURES IN PEROVSKITE-TYPE FERROELECTRIC SOLID SOLUTIONS

V. Yu. Topolov

Professor, vutopolov@sfedu.ru

FGAOU VO “Southern Federal University”, Rostov-on-Don, Russia

In the present review, results of the study on heterophase ferroelectric solid solutions with the perovskite-type structure are described and systematised. ‘Unit-cell parameters – domain structures – heterophase structures’ relations are discussed in the context of stress-relief conditions for various regions where either two or three phases coexist.

Keywords: ferroelectric solid solution, domain structure, heterophase structure, stress relief, interface.

Ferroelectric solid solutions with the perovskite-type structure are of great interest as materials that undergo structural phase transitions (polymorphic, field-induced or morphotropic, mainly the first-order phase transitions) and have complicated non-180° domain (or twin) and heterophase structures, important physical properties etc. [1]. These materials are also regarded as modern active materials, and their properties can be analysed within the framework of the well-known ‘composition – structure – properties’ triangle. The perovskite-type solid solutions are of interest due to the vast isomorphism of their crystal structure and due to a considerable dependence of the physical properties on modifying ions, domain and phase contents, domain-wall mobility, and so on. Studies on the perovskite-type solid solutions show that jumps of the spontaneous polarisation and unit-cell parameters at the first-order phase transition lead to internal mechanical stress fields that influence phase coexistence to a large extent [1], and a stress-relief path may shed light on the phase-transition kinetics and physical properties in polydomain/heterophase samples. The present review report is devoted to various heterophase states and related structures in the perovskite-type ferroelectric solid solutions and to stress-relief conditions that are considered in some temperature and molar-concentration ranges.

The crystallographic algorithm and matrix approach are developed and applied to interpret experimental data on the complicated heterophase structures and phase contents in terms of unit-cell distortions of domain types in the coexisting phases [1]. Orientations of planar stress-free interfaces between the polydomain (twinned) phases at their elastic matching are found by taking into account conditions for the complete stress relief at every interface such as a non-charged domain wall, a domain boundary that separates polydomain regions, and an interphase boundary.

Specifics of the unit-cell behaviour in the phase-transition region and non-180° domain types (mechanical twins) in the coexisting ferroelectric phases are described within the framework of the matrix approach [1] that is suitable for various polydomain/heterophase samples and for coexisting ferroelectric phases from various symmetry classes. This matrix approach is applied, for instance, when analysing a link between the unit-cell parameters and heterophase structures in wide temperature and/or molar-concentration ranges. ‘Domain volume fractions – phase contents’ diagrams are put forward to interpret the heterophase states and role of several domain types in forming the heterophase structures and phase contents under the stress-relief conditions, especially near the morphotropic phase boundary [1].

Our study is concerned with both lead-containing (group 1) and lead-free ferroelectric solid solutions (group 2), and the most important representatives are

(i) $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, $(1-y)\text{Pb}(\text{A}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - y\text{PbTiO}_3$, where A = Mg or Zn (group 1), and

(ii) $(1-w)(\text{Na}_{1/2}\text{Bi}_{1/2})\text{TiO}_3 - w\text{BaTiO}_3$ and $\text{Ba}(\text{Ti}_{1-z}\text{M}_z)\text{TiO}_3$, where $M = \text{Ce}, \text{Hf}, \text{Sn}$, or Zr (group 2).

It is shown that the complete stress relief is achieved in the overwhelming majority of the aforementioned ferroelectric solid solutions with compositions chosen near the morphotropic phase boundaries. Reasons for the incomplete stress relief are analysed for a few specific cases of the phase coexistence and non- 180° domain structures in the adjacent ferroelectric phases.

Of independent interest are three-phase states near the morphotropic phase boundary. For these three-phase states, model concepts are put forward, and related stress-relief conditions are analysed for adjacent polydomain/heterophase regions. Hereby the active role of an intermediate phase in the stress relief is analysed by taking into account specifics of the perovskite unit-cell behaviour in the coexisting phases [1].

Results of the present study on the heterophase states, domain structures and phase contents are consistent with known experimental data on the ferroelectric solid solutions from the groups 1 and 2.

Reference

1. Topolov V.Yu. Heterophase ferroelectric solid solutions. Phases and domain states. 2nd ed.– Cham: Springer Internat. Publ., 2018.

УДК 5.53:538.955

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ЛЬДА

А.А. Васин¹ и А.А. Волков²

¹Аспирант, alexcampeones@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, aavol@bk.ru

Институт общей физики РАН имени А.М. Прохорова, Москва

Присущим жидкой воде и льду фундаментальным свойством является диэлектрическая дебаевская релаксация. В жидкой воде она ответственна за СВЧ-нагрев и высокое значение статической диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 80$). Происхождение дебаевской релаксации с точностью не определено - в воде её связывают с переориентацией дипольных молекул H_2O , а во льду – с динамикой решеточных дефектов. Нами предлагается общий для воды и льда механизм дебаевской релаксации, состоящий в биполярной диффузии ионов.

Ключевые слова: жидкая вода, лёд, дебаевская релаксация, спектр диэлектрических потерь, диалектическая проницаемость, динамическая проводимость.

Вода и лёд имеет специфическую релаксационно-резонансную форму диэлектрического отклика [1]. Релаксации и резонансы принципиально являются механизмами разных пространственно-временных масштабов. В широкодиапазонных диэлектрических спектрах (панорамах) они далеко разнесены по частоте. По этой причине понимание взаимосвязи между релаксационными и осцилляторами механизмами поляризации затруднено.

Вода и лёд являются классическими электронными диэлектриками с шириной запрещенной зоны ~ 5 эВ [2]. Описание их электродинамики традиционно проводится на языке диэлектрической проницаемости, $\epsilon^*(\omega)$. В этом представлении доминирующая роль в диэлектрической панораме принадлежит мощной полосе поглощения, т.н. дебаевской релаксации. Она располагается в спектрах диэлектрического отклика в районе 10 ГГц у воды и 4·10 кГц у льда. Дебаевская релаксация вносит 90%-ный диэлектрический вклад в статическую диэлектрическую проницаемость. На этом фоне вклады других микроскопических механизмов ничтожны.

Дебаевскую релаксацию в жидкой воде неизменно связывают с вращением молекулярных диполей. Вращательный механизм всегда рассматривался в числе главных. Гипертрофированный спектральный вид дебаевской релаксации в сознании целых по-

колений исследователей гипертрофировал ориентационное движение молекул H_2O [3]. В 1988 г А. Хиппелем сформулирован вывод, который актуален по сей день: «we have a sequence of ingenious and illuminating concepts but no valid theory at the present time, neither for the static permittivity nor for the relaxation time» (у нас есть подробные и ясные представления, но нет рабочей теории ни для статической диэлектрической проницаемости, ни для времени релаксации) [1]. Другими словами, как не было, так и нет понимания молекулярного механизма аномально высокой статической проницаемости $\epsilon(0) \sim 80$ воды и мощного СВЧ-поглощения на длинах волн $\sim 1-10 \text{ см}^{-1}$.

Дебаевская релаксация льда в диэлектрических спектрах располагается в на семь порядков по частоте ниже водяной. При этом её вклад в статическую диэлектрическую проницаемость отличается от водяного совсем мало, на 10 %: $\epsilon(0) \sim 90$. Изучение дебаевской релаксации во льду развивается по собственной траектории через рассмотрение сложной динамики дефектов кристаллической решетки [1, 4].

В работе [5] мы обратили внимание на то, что дебаевского вида релаксацию в диэлектрическом отклике вещества дает диффузное движение заряженной частицы в параболическом потенциале. Частицей создается ток, и его описание более удобно в терминах проводимости, $\sigma^*(\omega)$. Терминологически язык проводимости чужд воде как диэлектрику, но, по сути, языки $\epsilon^*(\omega)$ и $\sigma^*(\omega)$ эквивалентны. Спектр $\sigma^*(\omega)$ получается простым умножением $\epsilon^*(\omega)$ на частоту, что многократно увеличивает вес высокочастотной, резонансной, части спектра и делает её наблюдаемой наравне с более низкочастотной, релаксационной. Для воды и льда появляется возможность напрямую видеть связь диффузии частиц с высокочастотными осцилляциями.

Переход к проводимости не означает переход к новой физике, но открывает возможность построения для воды и льда единой модели, включающей как важный компонент перемещение ионов. Такая модель развита нами в работе [6]. От существующих она отличается концептуально важным выводом о том, что электродинамику воды определяет динамика взаимопревращений молекул и ионов, находящихся в тепловом столкновительном движении в состоянии биполярной диффузии. Ионы - короткоживущие, образуются на времена $\sim 2.5 \text{ пс}$ и присутствуют в воде в концентрации на 7 порядков превышающей принятую. Они замещают собой традиционные водородные связи в качестве связующего среду фактора.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ - 19-02-00446 А.

Литература

1. Hippel A. The Dielectric Relaxation Spectra of Water, Ice, and Aqueous Solutions // IEEE Trans. on Electr. Insulation. – 1988. - V. 5. - №. 23. - P. 801–840.
2. Эйзенберг Д. и Кауцман В. Структура и свойства воды // Гидрометеоздат. Ленинград. 1975.
3. Agmon N. Tetrahedral Displacement: The Molecular Mechanism behind the Debye Relaxation in Water // J. Phys. Chem. -1996. - V. 100. - P. 1072–1080.
4. Popov I., Puzenko A., Khamzin A., Feldman Y. The dynamic crossover in dielectric relaxation behavior of ice Ih // Phys. Chem. Chem. Phys. -2017. - V. 19. - P. 28610-28620.
5. Volkov A.A., Artemov V.G., Pronin A.V. A radically new suggestion about the electro-dynamics of water: Can the pH index and the Debye relaxation be of a common origin? // EPL. -2014. - V. 106. - P. 46004.1-6.
6. Volkov A. A., Vasin A. A. Volkov A. A. Jr. Dielectric properties of water and ice: a unified treatment // Ferroelectrics. -2019. - V. 538 :1. - P. 83-88.

**МЕДЛЕННАЯ МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ КОМПЛЕКСНЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ЛАНТАНИДОВ**

Н.Н. Ефимов

Канд. хим. наук, зав. лабораторией, nnefimov@narod.ru
ФГБУН «Институт общей и неорганической химии им. Н.С. Курнакова РАН»

В работе представлены данные по исследованию медленной магнитной релаксации комплексных соединений лантанидов. Обсуждаются причины появления свойств молекулярных магнетиков в таких соединениях, методы определения времен релаксации, и современное состояние данной области знаний.

Ключевые слова: молекулярные магнетики, лантаниды, магнитная релаксация.

В настоящее время, исследование комплексных соединений лантанидов обращает на себя внимание в связи с поиском новых молекулярных магнетиков (single-molecule magnets, SMMs). Такие соединения способны сохранять остаточную намагниченность в течение определенного времени в отсутствие внешнего магнитного поля (медленная магнитная релаксация) [1]. Потенциальная возможность использования подобных соединений в качестве альтернативы классическим магнитным материалам обуславливает интерес ученых к получению и исследованию новых эффективных SMMs. Эти соединения могут являться основой элементов магнитной памяти, записи и хранения информации, а также – логических элементов квантовых компьютеров [2].

К числу важнейших характеристик индивидуального молекулярного магнетика относятся величины энергетического барьера перемагничивания (Δ_{eff}/k_B) и времени наискорейшей релаксации (τ_0), характеризующие, соответственно, термодинамический и кинетические аспекты процесса релаксации намагниченности. Тем не менее, большинство современных исследований преимущественно ориентированы на увеличение высоты барьера перемагничивания. Проведенные как теоретические [3], так и экспериментальные [4] исследования свидетельствуют об определяющем влиянии на SMM свойства конкретного комплекса геометрии координационного окружения центрального атома и, в большей степени, симметрии поля лигандов. В свою очередь, последняя определяется природой и взаимным расположением лигандов. Достаточно важной характеристикой конкретного SMM является также его устойчивость (в первую очередь, химическая и термическая), т.к. именно она определяет возможность дальнейшего практического использования этого соединения. Например, самые эффективные молекулярные магнетики [5-7], известные в настоящее время, хоть и демонстрируют впечатляющие характеристики SMM, являются химически неустойчивыми соединениями.

Таким образом, дальнейшее развитие подходов к направленному варьированию качественного и количественного состава координационного окружения для каждого семейства координационных соединений – а также получение стабильных соединений – представляют несомненный интерес с точки зрения модификации их SMM свойств.

В докладе обсуждаются причины проявления координационными соединениями лантанидов свойств SMM. Проведен сравнительный обзор современного состояния исследований в области молекулярного магнетизма комплексов Ln. Обсуждается влияние на свойства SMM природы Ln^{3+} и важнейших структурных особенностей (строение металлоостова, конфигурации координационного окружения).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-33-20155.

Литература

1. Sessoli R. Strategies towards single molecule magnets based on lanthanide ions / R. Sessoli, A. Powell // *Coord. Chem. Rev.* - 2009. - V. 253. - P. 2328- 2341.
2. Bartolomé J., Luis F., Fernández J. (Eds.) / *Molecular Magnets Physics and Applications.* // Springer, Berlin, Heidelberg, 2014.

3. Rinehart J.D. Exploiting single-ion anisotropy in the design of f-element single-molecule magnets / J.D. Rinehart, J.R. Long // *Chem. Sci.* - 2011. - V. 2. - P. 2078-2085.
4. Gavrikov A.V. Exploiting single-ion anisotropy in the design of f-element single-molecule magnets / A.V. Gavrikov, N.N. Efimov, A.B. Ilyukhin, Zh.V. Dobrokhotova, V.M. Novotortsev // *Dalton Trans.* - 2018. - V. 47. - P. 6199-6209.
5. Guo F.-S. A Dysprosium Metallocene Single-Molecule Magnet Functioning at the Axial Limit / F.-S. Guo, B.M. Day, Y.-C. Chen, M.-L. Tong, A. Mansikkamäki, R.A. Layfield // *Angew. Chem. Int. Ed.* - 2017. - V. 56. - P. 11445-11449.
6. Goodwin C.A.P. Molecular magnetic hysteresis at 60 kelvin in dysprosocenium / C.A.P. Goodwin, F. Ortu, D. Reta, N.F. Chilton, D.P. Mills // *Nature.* - 2017. - V. 548. - P. 439-442.
7. Guo F.-S. Magnetic hysteresis up to 80 kelvin in a dysprosium metallocene single-molecule magnet / F.-S. Guo, B.M. Day, Y.-C. Chen, M.-L. Tong, A. Mansikkamäki, R.A. Layfield // *Science.* - 2018. - V. 362. - P. 1400-1403.

UDC 538.9

ACOUSTIC PHONON AND RELAXATION DYNAMICS OF $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ UNDER APPLIED ELECTRIC FIELD

S.G. Lushnikov¹, A.I. Fedoseev² and Seiji Kojima³

¹Doctor of sciences, professor, sergey.lushnikov@mail.ioffe.ru

²Senior researcher, fedoseev@mail.ioffe.ru

Ioffe Institute, St.-Petersburg, Russia

³Doctor of sciences, professor, kojima@bk.tsukuba.ac.jp

Institute of Materials Science, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan

This paper is devoted to Brillouin study of the influence of different regimes of electric field application on the temperature behavior of a quasi-longitudinal acoustic phonon and quasielastic light scattering in the temperature range from 77 to 300 K in $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN) crystal.

Keywords: relaxor ferroelectrics, acoustic phonon, quasielastic light scattering, phase transition.

$\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN) is a model compound for studies of properties of a large family of relaxor ferroelectrics with the general formula $\text{AB}'\text{B}''\text{O}_3$. The PMN crystal lattice dynamics is characterized by a frequency-dependent anomaly of the dielectric response extended for hundreds of degrees which is not related to a structural phase transition. The crystal symmetry remains cubic up to helium temperatures. The electric field application leads to a change in the dynamics of phase transformations, i.e., a ferroelectric structural phase transition occurs in PMN. The results of PMN investigations under an applied electric field are clearly visualized in phase diagrams [1]. It is well known that relaxor properties depend on the applied field regimes. For example, Brillouin light scattering studies of the PMN properties in $E \neq 0$ revealed the electroacoustic effect which manifested itself in the dependence of the behavior of the quasi-longitudinal acoustic (QLA) phonon velocity on the magnitude and direction of the applied field \mathbf{E} [2].

The goal of our studies reported here was to understand how the applied electric field regimes ($E = 5$ kV/cm) affect the behaviors of the QLA phonon with a wave vector $\mathbf{q} \parallel [110]$ and quasielastic light scattering in the temperature range from 77 to 300 K. The following regimes of electric field application were used: (i) Cooling in $E = 0$ (ZFC), the field application at the liquid nitrogen temperature, and then heating in the field (FH); (ii) Cooling (FC) and heating in the field (FH); and (iii) Cooling in the field (FC), removal of the field at the liquid nitrogen temperature and then heating in $E = 0$ (ZFH). The objects of the experiments were PMN samples $5 \times 3 \times 1$ mm³ in size with the largest faces on which electrodes were deposited perpendicular to the crystallographic [111], [110] and [100] directions. The measurements were carried out by Fabry-Perot tandem interferometer in a 180-degree scattering geometry. The light source was a laser with a wavelength of 514.5 nm. It was found that the behaviors of the QLA phonon and quasielastic light scattering exhibited anomalies that depended on the

applied field regimes and direction of applied field. The results are discussed within the framework of existing phase E-T diagrams and modern concepts of the physics of relaxor ferroelectrics.

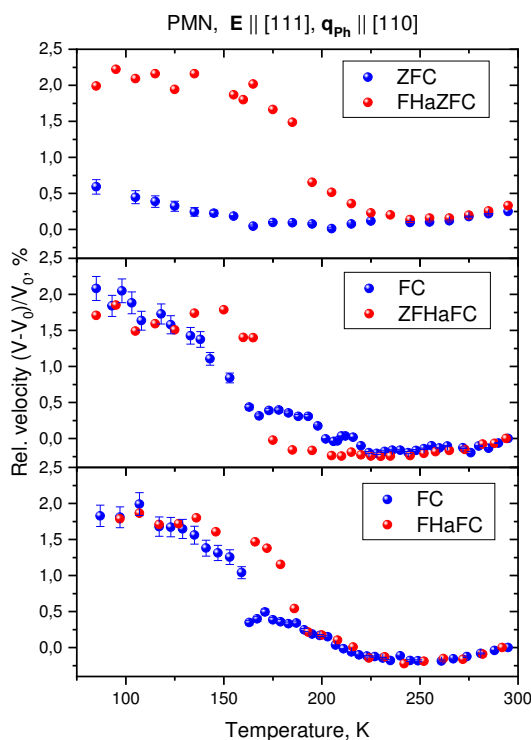


Figure. Temperature behavior of relative changes of sound velocity of QLA acoustic phonon with different regime of applied electric field

The work is supported in part by RFBR 18-02-01084 grant.

References

1. E.V. Colla, E.Y. Koroleva, N.M. Okuneva, and S.B. Vakhrushev, Phys. Rev. Lett., 77, 1681 (1995); S.G. Lushnikov, J.-H. Ko, Seiji Kojima, Appl. Phys. Lett. 84, 4798 (2004).
2. S.G. Lushnikov, A.I. Fedoseev, J.-H. Ko and Seiji Kojima, JJAP 44, 7156 (2005).

УДК 539.219.3

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ ПРЕДЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ МНОЖИТЕЛЯМИ И ЭНЕРГИЯМИ АКТИВАЦИИ, КАК ИНДИКАТОР МЕХАНИЗМА ДИФФУЗИИ

О.В. Коваленко¹, С.В. Васильев², В.И. Ткач³

¹Мл. научн. сотр., vvs1241@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., vasils75@gmail.com

³Д-р физ.-мат. наук, гл. научн. сотр., stalker_1345@mail.ru

ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

В работе представлены результаты анализа параметров температурных зависимостей коэффициентов гетеродиффузии в кристаллических и жидких фазах сплавов на основе Fe и Al и эффективных коэффициентов диффузии, контролирующей кристаллизацию стекол на их основе, в связи с соответствующими диффузионными механизмами.

Ключевые слова: металлические стекла, кристаллизация эффективные коэффициенты диффузии, предэкспоненциальные множители, энергии активации, механизмы диффузии.

Целью работы являлся анализ параметров аррениусовских температурных зависимостей эффективных коэффициентов диффузии, контролирующей зарождение и рост кристаллов в аморфных металлических сплавах на основе железа и алюминия. Эффек-

тивные коэффициенты диффузии определяются путем сопоставления экспериментальных данных по структуре кристаллизующихся стекол и кинетике этого процесса с зависимостями, рассчитанными в рамках теоретических моделей [1]. Анализ проводился в рамках предложенного Федоровым [2] уравнения $D_0 = A \exp(Q/B)$, связывающего значения предэкспоненциальных множителей D_0 и энергий активации гетеро- и самодиффузии Q . Позднее было установлено [3], что уравнение Федорова, представляющее собой частный случай компенсационного закона, выполняется для коэффициентов гетеродиффузии во всех кристаллических сплавах с единичными параметрами $A = 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ and $B = 0,39 \text{ эВ}$ и всех аморфных сплавах с параметрами $A = 10^{-20} - 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$ and $B = 0,054 - 0,056 \text{ эВ}$ соответственно, а значения параметров отражают механизмы диффузии.

Анализ, проведенный для температурных зависимостей эффективных коэффициентов диффузии, контролирующей кристаллизацию аморфных фаз в сплавах на основе Fe и Al по первичным и эвтектическим механизмам, коэффициентов гетеродиффузии в кристаллических и жидких сплавах на основе Fe и Al и сравнение полученных данных с обобщенными корреляциями $\log(D_0) - Q$ для диффузии в кристаллических сплавах и металлических стеклах [3], позволил установить следующие закономерности: – корреляции $\log(D_0) - Q$ для эффективных коэффициентов диффузии, контролирующей кристаллизацию стекол на основе Fe и Al хорошо аппроксимируются линейными зависимостями, однако с различными A ($(3.7 \pm 0.7) \times 10^{-18}$ и $(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-19} \text{ м}^2/\text{с}$) и B (0.064 ± 0.005 и $0.041 \pm 0.006 \text{ эВ}$) соответственно;

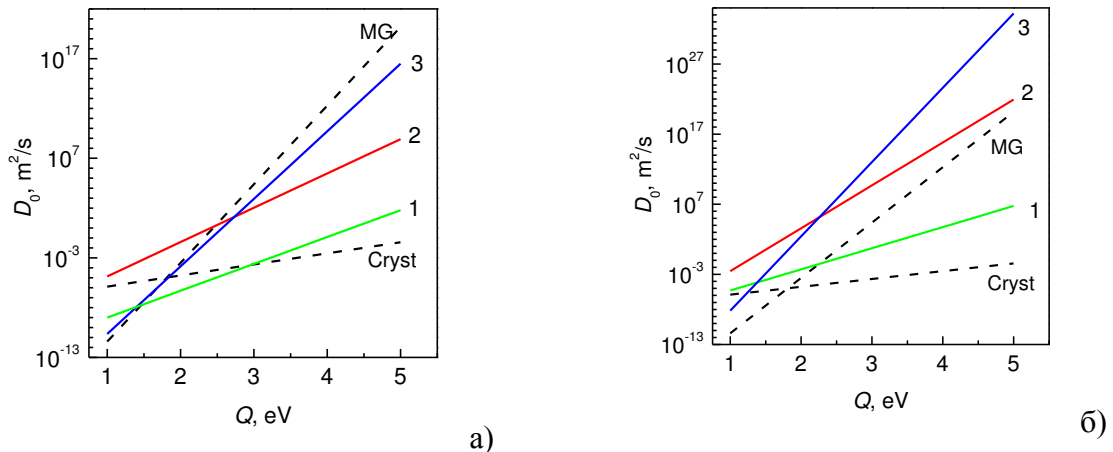


Рисунок. Корреляции между значениями предэкспоненциальных множителей и энергий активации температурных зависимостей коэффициентов диффузии в сплавах на основе Fe (а) и Al (б): 1 и 2 – коэффициенты гетеродиффузии в кристаллических [4] и жидких [4, 5] сплавах соответственно, 3 – эффективные коэффициенты диффузии, контролирующей кристаллизацию аморфных фаз, штриховые линии – обобщенные данные по коэффициентам гетеродиффузии в кристаллических и аморфных фазах [3]

– параметры корреляций для коэффициентов гетеродиффузии в кристаллических сплавах на основе Al и Fe, построенные по данным работ [2, 4], оказались различными: A ($(2.0 \pm 0.3) \times 10^{-12}$ и $(4.8 \pm 0.3) \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$) и B (0.161 ± 0.010 и $0.144 \pm 0.008 \text{ эВ}$);

– корреляции между значениями предэкспоненциальных множителей и энергий активации температурных зависимостей коэффициентов диффузии в расплавах на основе Fe и Al имеют параметры A ($(4.9 \pm 0.1) \times 10^{-9}$ и $(2.2 \pm 0.1) \times 10^{-9} \text{ м}^2/\text{с}$) и B (0.126 ± 0.016 и $0.071 \pm 0.005 \text{ эВ}$) соответственно;

– в рамках предположения [2,3], что значения параметра B отражают механизм диффузии, сделан вывод о наличии вклада кооперативных смещений в диффузию на границе раздела жидкой и кристаллической фаз.

Литература

1. Kovalenko O.V. Correlation between parameters of Arrhenius-type temperature dependency for effective diffusivity governing glass crystallization / O.V. Kovalenko, S.V. Vasiliev, V.I. Tkatch // *J. Non-Cryst. Sol.* – 2019. – V. 518. – P. 36–42.
2. Федоров Г.Б. Некоторые закономерности в изменении параметров D_0 and Q при диффузии в металлах и сплавах / Г.Б. Федоров // В сб. "Подвижность атомов в кристаллической решетке" под ред. В.Н. Свечникова. – Киев: АН УССР. – 1965. – С. 40–49.
3. Faupel F. Diffusion in metallic glasses and supercooled melts / F. Faupel, W. Frank, M.-P. Macht at. el. // *Rev. Mod. Phys.* – 2003. – V. 75. – P. 237–280
4. Brandes E.A. *Smithells Metals Reference Book*, seventh ed. / E.A. Brandes, G.B. Brook (Eds.). // Oxford. – 1992.
5. Du Y. Diffusion coefficients of some solutes in fcc and liquid Al: critical evaluation and correlation / Y. Du, Y.A. Chang, B. Huang at. el. // *Mater. Sci. Eng. A* – 2003. – V. 363. – P. 140–151.

UDC 538.9

RELAXATION OF THE SHEAR ELASTICITY AS AN INTEGRAL INDICATOR OF RELAXATION PHENOMENA IN METALLIC GLASSES

Yu.P. Mitrofanov¹, N.P. Kobelev², V.A. Khonik³

¹Cand. Phys.-Mat. sciences, assistant professor, senior scientist, mitrofanovyup@gmail.com

²Cand. Phys.-Mat. sciences, senior scientist, kobelev@issp.ac.ru

³Dr. Phys.-Mat. sciences, professor, v.a.khonik@vspu.ac.ru

^{1,3}Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russia

²Institute of Solid State Physics Russian Academy of Sciences Chernogolovka, Moscow

Current literature presents quite a few facts evidencing that the energy barriers, which control various relaxation processes in metallic glasses, are determined by the unrelaxed shear modulus. This idea is put into the basis of the Interstitialcy theory of condensed matter states assuming that relaxation phenomena in metallic glasses are governed by structural “defects”, which by their properties are similar to dumbbell interstitials in crystalline metals. The formation enthalpy of these defects is proportional to the shear modulus while the latter determines their concentration. Thus, precision measurements of the shear modulus allow monitoring the defect concentration, which reflects the kinetics of relaxation phenomena in metallic glasses.

This approach is being developed by the present authors during a few past years and found to be quite fruitful. It was shown that various relaxation phenomena occurring upon structural relaxation and crystallization of metallic glasses can be quantitatively explained within the framework of this approach. This applies first of all to numerous examples of the interrelationship between the relaxation of the shear elasticity and the heat effects (heat release or heat absorption). It was found that the excess internal energy of the non-crystalline state with respect to the maternal crystalline state is mostly determined by the elastic energy of the interstitial-type defects frozen-in upon glass production. This energy dissipates as heat upon crystallization of glass so that the heat of crystallization approximately equals to the elastic energy of these defects, which is controlled by the macroscopic shear modulus. The same approach allowed explanation of the relationship between the enthalpies of structural relaxation and crystallization of metallic glass with the melting enthalpy of the maternal crystal. It was found that the excess enthalpy of metallic glass determined by the macroscopic shear modulus also controls the height of the low temperature boson heat capacity peak of metallic glasses.

This presentation is devoted to a review of the above approach, which clearly demonstrates a genetic relationship of the relaxation of the shear elasticity with various relaxation phenomena in metallic glasses.

Э. А. Гранкин, Ю.Н. Шалимов¹

Д-р техн. наук, профессор, shalimov_yn@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Рассмотрены вопросы релаксации электролитов в электрохимической системе электрод – электролит в различных условиях электролиза. Показаны основные аспекты временной релаксации электролитов различного химического состава, а именно электролитов хромирования на основе сульфата хрома и электролитов никелирования на основе сульфата никеля с безуглеродной борсодержащей добавкой класса полиэдрические бораты. Установлено, что временная релаксация определяется устойчивостью комплексов, образующих эти соединения.

Ключевые слова: внутренне трение, импульсный электролиз, дефекты структуры.

Первые исследования в этом направлении осуществил профессор Харьковского Университета Н.Н. Бекетов, который изучал эффекты тепловыделения на электродах при осуществлении окислительно-восстановительных реакций в процессе электролиза. Первопричиной этих явлений он считал изменение природы веществ на электродах в электрохимических системах. Впоследствии, эти работы были продолжены на кафедре физической химии того же университета профессором Д.Н. Грицаном с сотрудниками. Подобного рода исследования проводились также на кафедре общей химии Воронежского политехнического института под руководством профессора А.И. Фаличевой. На V Всесоюзной конференции по электрохимии членом корреспондентом АН СССР З.Г. Левичевым была отмечена перспективность этого направления исследований [1-3].

Следует отметить, что характер изменения температуры лишь приблизительно отражает суть теплофизических процессов протекающих на электродах реакций. Существующие в настоящее время методики не позволяют даже приблизительно определять температуру в зоне электрохимической реакции (в области двойного электрического слоя). Основные затруднения связаны с большим числом и разнообразием тепловых эффектов, которые могут отличаться не только величиной их вклада, но и знаком. Именно эта причина заставила нас искать не прямые, а косвенные пути определения температуры в зоне электрохимической реакции. Тот факт, что при гальваническом способе получения металла из водного раствора электролита формируемая атомная структура мало отличается от аналогичного металла получаемого методом плавления, наводит на мысль о том, что в зоне непосредственного формирования кластера металла реализуется «температурный скачок» величина которого на порядок отличается от средней температуры в объеме электролизера.

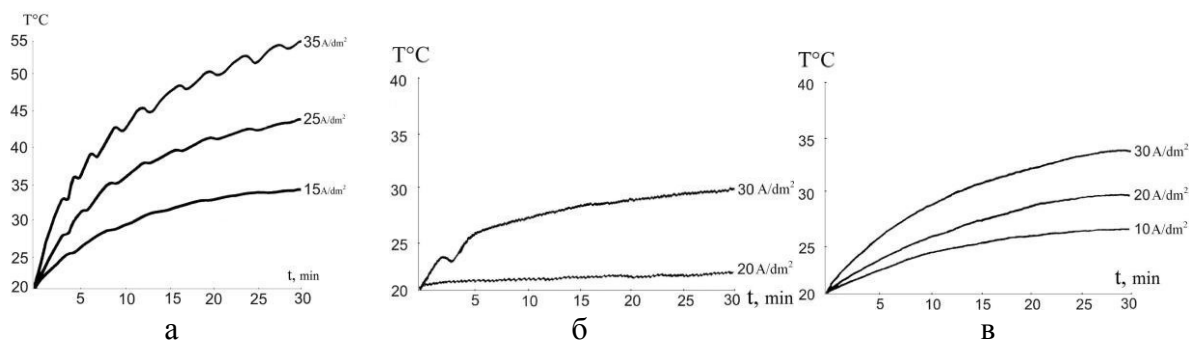


Рисунок. Зависимости температуры приэлектродного (катодного) слоя электролита от времени электролиза при фиксированных значениях плотности тока для электролитов хромирования различных химических составов: а) сернокислого, б) хромсульфатного, в) перхлоратного

По существу, возникает необходимость исследования поведения вещества при прохождении фазового перехода. При этом, следует отметить, что для этих целей следует использовать как структурно чувствительный метод внутреннего трения, успешно применяющийся при исследовании фазовых переходов в конденсированных средах в совокупности с электрохимическими и магнетохимическими методами. Наши представления о пространственном распределении температуры в условиях фазового перехода, по меньшей мере, должны быть пересмотрены. Это может привести к некоторому усложнению расчетных формул зато даст ответ на многие вопросы связанные с молекулярным переносом вещества.

$$\frac{\partial i}{\partial \tau} = \frac{\lambda \nabla^2 T}{\rho} - \left(w_x \frac{\partial i}{\partial x} + w_y \frac{\partial i}{\partial y} + w_z \frac{\partial i}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \operatorname{div} \sum_k \vec{j}_k i_k \quad (1)$$

Выражение (1) определяет изменение импульса энтальпии за счет трех составляющих (излучения, конвективного переноса и молекулярной диффузии). При этом общий вид уравнения по форме остается прежним, а значения температур переходят в функционально-зависимые от концентрации веществ находящиеся в окисленной и восстановленной форм. В этом случае может быть определена температура в зоне реакции при использовании уравнения Нернста-Петерсона для окислительно-восстановительного потенциала, поскольку концентрации окисленной и восстановленной форм вещества могут быть определены экспериментально. Используя такой подход к решению задачи, нам удалось установить истину в определении механизма анодного окисления алюминия в растворе хлорида натрия.

Литература

1. Шалимов Ю.Н., Мандрыкина И.М., Литвинов Ю.В. Оптимизация электрохимического процесса обработки алюминиевой фольги в производстве конденсаторов. - Воронеж: ВГТУ, 2000. 343 с.
2. Постников В.С. Внутреннее трение в металлах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1974. 351 с.
3. Ньюмен, Дж. Электрохимические системы. М.: Мир, 1977. 463 с.

УДК 537.9

ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ ФОРМЫ ДОМЕНОВ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКАХ, ВЫЗВАННАЯ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ ЭКРАНИРОВАНИЯ

В.Я. Шур¹, А.Р. Ахматханов², А.А. Есин³, М.А. Чувакова⁴

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, vladimir.shur@urfu.ru

²Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, andrey.akhmatkhanov@urfu.ru

³Инженер, Alexander.Esin@urfu.ru

⁴Младший научный сотрудник, m.a.chuvakova@urfu.ru

ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург

В работе представлены результаты исследования формирования дендритной доменной структуры в одноосных сегнетоэлектриках и сверхбыстрого превращения доменов в форме вогнутых многоугольников в выпуклые. Выявленные эффекты объяснены в рамках кинетического подхода, использующего аналогию между кинетикой доменов и ростом кристаллов. Показано, что запаздывание объемного экранирования деполяризующего поля играет определяющую роль.

Ключевые слова: дендриты, ниобат лития, доменная структура, доменные стенки, форма доменов.

Исследовано изменение формы изолированных доменов при переключении поляризации в однородном электрическом поле в монокристаллах конгруэнтного ниобата лития LiNbO₃ (CLN) с помощью оптической визуализации непосредственно в процессе

переключения с высоким разрешением по времени. Дополнительно использовались изображения статической доменной структуры, полученные: на поверхности - с помощью сканирующей электронной микроскопии, в объеме – с помощью конфокальной микроскопии комбинационного рассеяния (confocal Raman microscopy) и генерации второй гармоники (Cherenkov-type second harmonic generation).

Показано, что при переключении поляризации в CLN при повышенной температуре наблюдается топологическая нестабильность формы и формируются дендритные домены [1,2]. Рост дендритных доменов наблюдался в пластинах с искусственными поверхностными диэлектрическими слоями, которые увеличивали роль медленного объемного экранирования [3]. Измерена зависимость формы снежинок (dendrite envelope) от напряженности приложенного поля. Для объяснения формы изолированных доменов использован кинетический подход к росту доменов за счет генерации ступеней (пары кинков) и движения кинков вдоль доменных стенок [4]. Скорости генерации ступеней и движения кинков пропорциональны превышению над порогом локальной величины суммы приложенного поля и остаточного деполяризирующего поля.

Изменение формы доменов, обусловленное формированием шлейфа остаточных зарядов при неэффективном экранировании (медленной релаксации) исследовано экспериментально и моделированием [4]. Показано, что рост многоугольных доменов при температуре менее 200^oC обусловлен детерминированным образованием ступеней на вершинах и анизотропным движением кинков. Формирование выпуклых гексагональных доменов, соответствующих симметрии CLN, наблюдалось при эффективном экранировании деполяризирующего поля, а при задержке экранирования росту неправильных многоугольников и звезд. Впервые исследован эффект восстановления гексагональной формы выпуклых доменов после слияния [5]. Рост гексагональных доменов обусловлен самыми медленными доменными стенками, а скорость сверхбыстрых стенок, формирующихся в вогнутых многоугольниках, в тысячу раз больше. Анализ роста выпуклых и вогнутых доменов позволил построить кинетический Wulff plot движения доменных стенок [6].

Преобладание ионной проводимости при температуре более 200^oC приводит к изотропному росту доменов, благодаря стохастической генерации ступеней. Отсутствие эффекта сохранения формы открывает путь к формированию доменов сложной формы и дендритному росту.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-12-00210. Использовано оборудование Уральского ЦКП «Современные нанотехнологии» Уральского федерального университета.

Литература

1. Shur V.Ya. Formation of dendrite domain structures in stoichiometric lithium niobate at elevated temperatures / V.Ya. Shur, D.S. Chezganov, M.S. Nebogatikov, I.S. Baturin, M.M. Neradovskiy // J. Appl. Phys. – 2012. - V. 112. - P. 104113.
2. Shur V.Ya. Formation of snowflake domains during fast cooling of lithium tantalate crystals / V.Ya. Shur, M.S. Kosobokov, E.A. Mingaliev, D.K. Kuznetsov, P.S. Zelenovskiy // J. Appl. Phys. - 2016. - V. 119. - P. 144101.
3. Shur V.Ya. Domain shape instabilities and dendrite domain growth in uniaxial ferroelectrics / V.Ya. Shur, A.R. Akhmatkhanov // Phil. Trans. R. Soc. A. – 2018. - V. 376. - P. 20170204.
4. Shur V.Ya. Kinetics of ferroelectric domains: application of general approach to LiNbO₃ and LiTaO₃ // J. Mater. Sci. - 2006. - V. 41. - P. 199-210.
5. Shur V.Ya. Shape evolution of isolated micro-domains in lithium niobate / V.Ya. Shur, A.I. Lobov, A.G. Shur, E.L. Rumyantsev, K. Gallo // Ferroelectrics. - 2007. - V. 360. - P. 111-119.
6. Esin A.A. Superfast domain wall motion in lithium niobate single crystals. Analogy with crystal growth / A.A. Esin, A.R. Akhmatkhanov, V.Ya. Shur // Appl. Phys. Lett. – 2019. - V. 114. - P. 192902.

**РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ТЕПЛОМ ВОСПЛАМЕНЕНИИ
В РЕАКТОРЕ ПРОТОЧНОГО ТИПА**А.Т. Пономаренко¹, В.Г. Шевченко²¹Д-р хим. наук, гл. н. сотр, anaron@ispm.ru²Д-р хим. наук, зав. лаб., shev@ispm.ru

ФГБУН Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН

В настоящей работе рассмотрена возможность определения кинетических параметров реакции, протекающей в реакторе с неподвижным слоем катализатора, описано устройство такого реактора и следствия явления воспламенения. Объектом исследования являлся каталитический синтез высших спиртов из СО и водорода на восстановленных плавящихся железных катализаторах. Предложенный подход применим также к соответствующим вариантам синтезов Фишера-Тропша с целью синтеза углеводородов, а также других синтезов с неподвижным слоем катализатора и высокими энергиями активации.

Ключевые слова: проточный реактор, слой катализатора, тепловое воспламенение, температура газа в ядре потока, порядок реакции, объемная и линейная скорость газового потока, состав газового потока.

Каталитические синтезы из СО и водорода в настоящее время рассматриваются как альтернативные варианты получения топлив, смазок, присадок из попутных при добыче нефти газов, выделяемых до 100 м³/т добываемой нефти и, по мнению Д.И. Менделеева "сжигание продуктов нефтедобычи то же самое, что топить ассигнациями". Не удивительно поэтому, что открытый в 1926 году Ф. Фишером и Г. Тропшем синтез углеводородов из СО и водорода в настоящее время находится на четвертом поколении развития и интенсивно продолжают работы по его совершенствованию для повышения селективности и производительности [1]. Здесь уместно привести суждение Д.А. Франк-Каменецкого о том, что "ряд важных каталитических процессов наиболее благоприятным образом протекают в неустойчивых режимах, поскольку скорость реакции в нижнем устойчивом режиме очень мала, а в верхнем устойчивом режиме велик выход нежелательных продуктов реакции". Для реализации такого подхода необходимо соответствующее оснащение модельного лабораторного реактора с тем, чтобы на основании полученных результатов осуществить аппаратное оформление процесса в большем масштабе.

Отличительной особенностью рассматриваемого в работе подхода является использование в качестве лидирующего параметра температуру газовой смеси в ядре потока, выходящего после слоя катализатора и ее нарастание после достижения критической температуры воспламенения, а также непрерывный хроматографический анализ газа на содержание СО и метана, являющегося индикатором селективности процесса [3].

Этот подход применим для изучения экзотермических процессов, протекающих при высоких объемных скоростях и малых степенях превращения. В докладе представлены уравнения для расчета кинетических параметров по найденным значениям температуры воспламенения в зависимости от условий проведения синтеза. На рис. 1 изображен узел реактора, с помощью которого проводились указанные измерения.

Этот узел состоял из термопары, введенной в реактор высокого давления с помощью специального устройства из органического стекла. На керамическую трубку термопары прикреплен полочка (8) для восстановленного катализатора, загружаемого в трубку реактора в токе углекислого газа. В ряде случаев осуществлялось довосстановление катализатора в токе водорода при 50 атм. На рис. 2 изображено изменение температур в блоке реактора и после слоя катализатора в окрестности температуры воспламенения. Отчетливо видно, что при приближении к температуре воспламенения температура газа после слоя катализатора начинает стремительно возрастать и одно-

временно резко меняется селективность синтеза в сторону образования метана и воды.

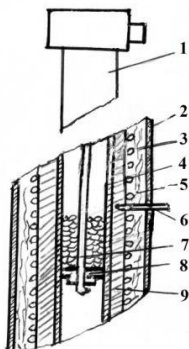


Рис. 1. Фрагмент реактора для измерения температуры воспламенения в реакторе высокого давления 200 атм. 1 - узел ввода термопар; 2 - кожух реактора, 3 - теплоизоляция, 4 - реакторная трубка, 5- спираль для электрообогрева, 6 – термопара в блоке, 8 - полочка с отверстиями, 9 - алюминиевый блок

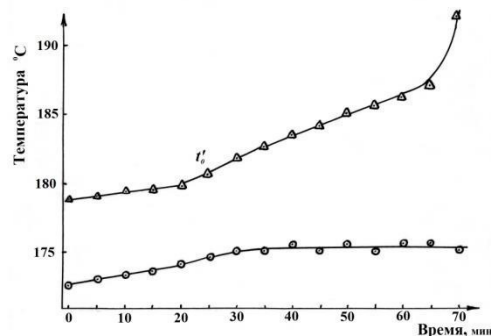


Рис. 2. График изменения температуры в блоке реактора и в ядре потока газовой смеси после прохождения слоя катализатора в окрестности температуры воспламенения. Кружки - температура в блоке, треугольники - температура газа на выходе слоя катализатора

Авторы искренне благодарны чл.-корр., проф. А.Н.Башкирову, д.х.н. Ю.Б.Кагану, д.х.н., проф. А.Я.Розовскому, чл.-корр., д.х.н. М.Г.Слинько и д.х.н., проф. С.М.Локтеву за сотрудничество при изучении кинетики синтеза высших спиртов из СО и водорода в 60-е годы прошлого века и последующие годы и за совместную разработку приведенного в докладе метода, а также коллективу механиков, активно содействовавших проведению экспериментов под руководством И.А. Антощука.

Литература

1. В.З.Мордкович, Л.В.Синева, Е.В.Кульчанская, Е.Ю.Асалиева. Четыре поколения технологии получения жидкого топлива на основе синтеза Фишера –Тропша. Катализ в нефтедобывающей промышленности, 2015, т.15, N5, с.23-45.
2. Д.А.Франк-Каменецкий, Диффузия и теплопередача в химической кинетике, Наука, М., 1967, 491 с.
3. Ю.Б.Каган, А.Я.Розовский, М.З.Слинько, А.Т.Пономаренко. Изучение кинетики гетерогенных каталитических реакций по условиям воспламенения. Кинетика и катализ, 1964, т.5, вып.5, с. 920-926.

UDC 543.42

HIGH-RESOLUTION MECHANICAL SPECTROSCOPY, HRMS: RECENT PROGRESS AND NOVEL SOLUTIONS

Leszek B. Magalas

AGH University of Science and Technology, Faculty of Metals Engineering
and Industrial Computer Science, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Poland

The high-resolution mechanical spectroscopy, HRMS, was developed in a time span from 2011 [1] to 2019 in Kraków, Poland. In this lecture we present the multi-scale high-resolution characterization of dissipation of mechanical energy in solids for low-frequency mechanical spectroscopy. The high-resolution mechanical spectrometer is a very sensitive torsion pendulum characterized by an extremely low internal friction background, $\tan\phi \approx 2 \times 10^{-5}$, in the frequency range from 0.001 to 5 Hz. The sinusoidal external stress signal and the symbiotic strain response signal are acquired with a resolution of 24 bits at a sampling rate of around 10 kHz. The stress signal (harmonic or linear ramp) is generated by a 20-bit DAC. Stress and strain signals are subjected to simultaneous coherent sampling.

Progress in our ability to control and record low-noise stress and strain signals pave the way to high-resolution measurements of complex mechanical susceptibility: extremely small magnitudes of mechanical loss tangent, $\tan\phi$, high-resolution fine variations in shear modulus, and, thus, very low internal friction background. It should be emphasized that high-quality stress and strain signals are subjected to on-line *Signal Quality Test*, which involves complementary and supplementary analysis of the signals in both the frequency and time domain. Experimental and computational tools exist to address both domains with high precision such as interpolated discrete Fourier transform (IpDFT) and Hilbert transform, and computation of ‘*true envelope*’ [2]. Thereby, the stress and strain signals can be analyzed at each step of the experimental procedure: (1) simulations carried out on synthetic signals, (2) analysis of the reference harmonic signal and (3) output signal from a bipolar amplifier, (4) strain signal acquired from a laser triangulation system, (5) signals’ deterioration caused by noise, (6) slow drifts of the base line of strain signal (zero-point drift, ZPD), and (7) standard signal analysis. The performance of computational methods and algorithms is also optimized. Recent experimental results indicate that the mean background level in the high-resolution mechanical spectrometer ranges from 1 to 2×10^{-5} in the frequency range from 10^{-3} to 5 Hz. Moreover, the dispersion of experimental points is negligible: from $\pm 1 \times 10^{-5}$ to $\pm 2.5 \times 10^{-5}$. It can be safely concluded that the overall performance of the high-resolution mechanical spectrometer, HRMS, is more than one order of magnitude higher than current spectrometers (forced torsion pendula). As of writing this text, new high-resolution mechanical loss spectra are being measured; recent results are demonstrated, and new challenges and perspectives for the resonant and subresonant mode are advocated. Furthermore, stochastic nature of investigated material and imprecision in measurements are also tackled.

It is noteworthy that commercially available DMA analyzers suffer from high background ($\tan\phi \approx 5 \times 10^{-3}$) and low resolution, which drastically limits practical applications of DMA instruments.

Devised novel IpDFT methods provide precise estimation of the logarithmic decrement, δ , and resonant frequency of exponentially damped sinusoidal signals embedded in additive white Gaussian noise and corrupted by time-dependent zero-point drift (ZPD). As anticipated, classical methods for determining the logarithmic decrement and frequency, for the same input data, yield incorrect results, and these inaccuracies are quantitatively assessed. In this context, we discuss the performance of the: (1) reference-resolution (RR) method designed for ZPD-free exponentially damped sinusoidal signals embedded in additive noise, and (2) high-resolution (HR) method designed for exponentially damped sinusoidal signals embedded in additive noise and corrupted by ZPD is illustrated and discussed. Hitherto unattainably high-resolution estimations of the logarithmic decrement and resonant frequency are successfully obtained. The devised methods and algorithms can be used in a wide range of damping magnitudes, that is, for logarithmic decrement ranging from 1×10^{-9} to 0.5.

References

1. L.B. Magalas, Development of high-resolution mechanical spectroscopy, HRMS: status and perspectives. HRMS coupled with a laser dilatometer, Arch. Metall. Mater. 60, 2069-2076 (2015).
2. L.B. Magalas, M. Majewski, Hilbert-twin: A novel Hilbert transform-based method to compute envelope of free decaying oscillations embedded in noise, and the logarithmic decrement in high-resolution mechanical spectroscopy HRMS, Arch. Metall. Mater. 60, 1092-1098 (2015).

СЕКЦИОННЫЕ ЗАСЕДАНИЯ
I. ВОПРОСЫ ТЕОРИИ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ

UDC 539.612

**KINETICS OF ORIENTATION AND ABSORPTION PROCESSES
IN POLYMER SYSTEMS ON SUBSTRATES**

A.V. Maksimov¹, O.G. Maksimova²

¹Dr. Sci., Professor, a_v_maximov@mail.ru

² Ph. D., Associate Professor, og62@mail.ru

Cherepovets State University

In this paper, the kinetic theory of orientation and absorption processes in flexible-chain polymer systems on solid substrates is developed in the mean field approximation. Kinetic equation for the order parameter was derived; its solution was obtained for two types of relaxation behavior during transitions to the state of chains completely torn off from the surface and the chains fully adsorbed on the substrate surface.

Keywords: mean field approximation, flexible-chain polymer systems, orientational order parameter, absorption, relaxation times, critical slowdown.

The investigation of physico-chemical properties of surface polymer structures: films, layers, membranes, etc. has not only theoretical, but also practical meaning associated with their unique characteristics important for use, for example, as protective coatings for sheet metal [1, 2]. The solution of the problem of adsorption of macromolecules is necessary for constructing a theory of adhesion of polymers at interphase boundaries [2, 3].

For first order phase transitions of classical low-molecular systems, the description of both phases and the study of equilibrium and dynamic effects associated with the finite size of the system is a very difficult task [4]; it is achieved only by means of numerical calculations and computer simulation methods.

In this paper, the critical behavior and dynamics of the orientation and absorption processes of partially adsorbed polymer chains under the action of intermolecular orientational interactions with elongated sections of other chains were studied in the effective mean field approximation for the multichain version [5] of the “sticky tape” model [3].

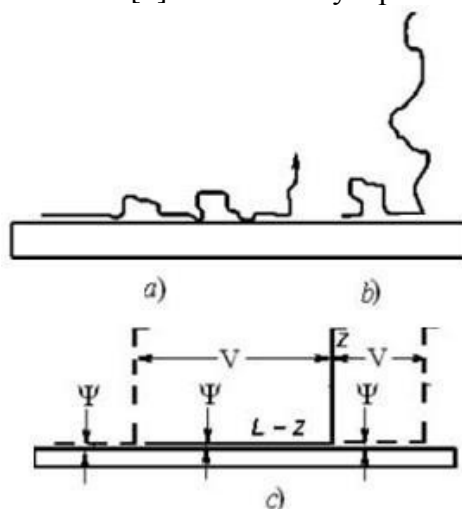


Figure. The “sticky tape” model [3]: the schematic drawing of the polymer chain adsorbed on a plane surface (a) and the chain nearly completely peeled-off from it (b) at small and great intermolecular interactions correspondingly. The multichain version [5] of the “sticky tape” model: an adsorbed flexible macromolecule placed in mean field created by other chains (c). The energetic constants Ψ and V describe accordingly interactions with the surface and other chains (they are shown by dashed lines)

It is shown that the system has a first-order phase transition, accompanied by an increase in fluctuations of the order parameter and adhesion degree, the presence of metastable states, and jumps in the degree of elongation and heat capacity of the chains at the transition point. Two transitions with different relaxation behavior were found: to the state of chains completely cut off from the surface and the state of fully adsorbed chains. At the transition point, a “critical slowing down” effect is observed [6], which consists in a sharp increase in the relaxation times to the mentioned states.

References

1. Sanchez I.C. Physics of Polymer Surfaces and Interfaces / I.C. Sanchez and Fitzpatrick L.E. // Boston: Butterworth - Heinemann. - 1992. - P. 3.
2. Karim A. Polymer Surfaces, Interfaces and Thin Films /A. Karim, and S.Kumar – Singapore. - World Sci. - 2000. - P. 5.
3. Skvortsov A.M. Mechanical desorption of a single chain: Unusual aspects of the coexistence of a first-order transition /A.M.Skvortsov, L.I. Klushin, A.A. Polotsky, K.Binder // Phys.Rev. E. - 2012. V.85. – 031803. P. 1-16.
4. Landau L.D. Statistical physics. /L.D. Landau, and E.M. Lifshits - 1976. M.-Science. - V. 5. Part 1. - P. 484.
5. A.V. Maksimov, A.A.V. Maksimov, O.G. Maksimova, D.V.Diordiichuk // Ferroelectrics. - 2013. - V. 5 - № 444. - P. 150–155.
6. Fleury P.A. Phase Transitions, Critical Phenomena and Instabilities /P.A. Fleury // Science. - V. 211. - № 4478. - PP. 125-131.

УДК 538.915

РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ И ДЫРОК ГЛУБОКИМИ ПРИМЕСЯМИ В ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ГЕТЕРОСТРУКТУРАХ С КВАНТОВЫМИ ЯМАМИ

Ю.А. Померанцев

Канд. физ.-мат. наук, доцент, pomerant_yu@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет»

В данной работе исследовано рассеяние квазичастиц – электронов и дырок – системой глубоких примесей в полупроводниковых гетероструктурах на основе арсенида галлия с двумя квантовыми ямами при произвольном профиле легирования.

Ключевые слова: полупроводниковые гетероструктуры, глубокие примеси, эффективная масса электрона, короткодействующий потенциал примеси.

Глубокими примесями определяются многие электрические и оптические свойства полупроводников, поэтому проблеме глубоких примесных центров уделяется большое внимание [1-3]. Несмотря на это, продвижение в направлении получения количественных результатов, относящимся к конкретным примесям или иным точечным дефектам, например, вакансиям, пока незначительно. Моделирование точечных дефектов представляет чрезвычайно трудную задачу, и соответствующие результаты, как правило, не в состоянии дать сколько-нибудь полного и надежного описания поведения дефектов в полупроводниках.

С другой стороны, имеется физически наглядная картина формирования электронного энергетического спектра и квантовых состояний, обусловленных наличием примеси, в связи с особенностями зонной структуры полупроводника, основанная на последовательном учете вкладов различных энергетических зон в величину энергии связи электрона (или дырки) на примеси, что позволяет сформулировать полуфеноменологическое описание глубоких примесных состояний в рамках известного метода потенциала нулевого радиуса.

Для вероятности перехода в единицу времени (обратного времени релаксации)

из состояния $|nk\rangle$ электрона полупроводниковой гетероструктуры (ГС) в любое доступное состояние с помощью Золотого правила Ферми получено выражение

$$w_n(k) = \frac{2\pi}{\hbar} (U_0 a^2) \sum_{n'} \int dz \cdot c(z)(1-c(z)) \tilde{A}_{m'}(z) g_{n'}(E_n(k)). \quad (1)$$

Здесь профиль легирования ГС определяется 1D примесной концентрацией $c(z)$; a - постоянная решетки ГС; $g_{n'}(E)$ - плотность состояний в n' -ой подзоне размерного квантования, которая определяется выражением

$$g_{n'}(E) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int d^2 k' \delta(E_{n'}(k') - E), \quad (2)$$

U_0 - глубина потенциальной ямы примесного центра, который рассматривается в предельном случае сильной локализации:

$$U(r) = -U_0 a^3 \delta(\rho) \delta(z - z_0), \quad (3)$$

z_0 - координата примеси вдоль оси ГС, ρ - поперечный (в плоскости xy) радиус-вектор носителя,

$$\tilde{A}_{m'}(z) = f_n^*(z) f_n(z) f_{n'}(z) f_{n'}^*(z) a^{-1}, \quad (4)$$

функции $f_n(z)$ являются решением простого одномерного уравнения Шредингера, в котором потенциальная энергия моделируется соответствующим набором прямоугольных квантовых ям конечной глубины. Также предполагается, что на гетерограницах эти функции удовлетворяют граничным условиям, сохраняющим плотность потока вероятности, что и определяет энергетический спектр электронов и дырок ГС. Эффективные массы дырок ГС вычислялись с использованием формализма Латтинжера, учитывающим смешивание состояний тяжелых и легких дырок ГС.

На основании формулы (1) вычислены зависимости обратных времен релаксации для электронов и дырок в разных подзонах размерного квантования от энергии носителя для симметричной полупроводниковой ГС $Al_{0.3}Ga_{0.7}As-GaAs$ 4-4-4 с двумя квантовыми ямами (ширина левой и правой квантовой ямы равна $4a$, внутреннего барьера - $4a$). В таблице приведены значения энергий электронов, легких и тяжелых дырок ГС 4-4-4, отсчитанные от дна соответствующей квантовой ямы и измеренные в meV , и значения эффективных масс в единицах массы свободного электрона m_0 .

Таблица

Значения энергий электронов, легких и тяжелых дырок и эффективных масс ГС 4-4-4

ГС	C1	C2	HH1	HH2	LH1	LH2	
4-4-4	121.8	180.75	57.158	65.228	84.97	131.098	энергия, meV
	0.075	0.076	0.136	0.142	0.165	0.178	эфф. масса, m_0

Зависимости обратных времен релаксации для электронов и дырок повторили кусочно-постоянный вид плотности состояний с учетом вклада интеграла перекрытия $\int dz \cdot c(z)(1-c(z)) \tilde{A}_{m'}(z)$ волновых функций при постоянном профиле легирования $c(z) \approx const$ и вклада эффективных масс m_λ^* подзон λ размерного квантования ГС. Времена релаксации для электронов и дырок по оценкам составили $(1-10)ps$.

Литература

1. Zhang Yong. Electronic structures of impurities and point defects in semiconductors / Yong Zhang // Chinese Physics B. – 2018. - Vol. 27. - Num.11. - P. 1–40.
2. Белявский В.И. Глубокие акцепторные состояния в асимметричных системах квантовых ям в электрическом поле / Ю.В. Копаев, Ю.А. Померанцев, С.В. Шевцов // Письма в ЖЭТФ. – 1995. - Т.62, вып. 3. - С. 197–202.
3. Belyavsky V.I. Deep Impurity States in Semiconductor Quantum Well Structures / Yu.V.

UDC 537.9

ABOUT THE RELAXATION SPECTRUM OF THIN FERROELECTRIC FILM IN A PHASE TRANSITION POINT

V.N. Nechaev¹, A.V. Shuba²

¹Doct. of phys.-math. sci, Prof., wladnic@mail.ru

²Cand. of phys.-math. sci, Assoc. prof., shandvit@rambler.ru

Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh)

In the framework of the Landau – Khalatnikov theory, the spectrum of relaxation frequencies and its temperature dependences in the near of the second-order phase transition point in a thin ferroelectric film were determined depending on the film thickness and degree of polarization fixation on the film surface.

Keywords: soft mode, ferroelectric film, phase transition.

The study of the relaxation time spectrum is necessary for understanding the general laws control the physical kinetics of materials, in particular, their thermal and electrical properties, absorption and damping of various types of waves. In second-order phase transitions, the shortest relaxation time in the system is the relaxation time of the order parameter. The relaxation of the order parameter in the phase transition under conditions of limited geometry and the influence of the environment is significantly different from the relaxation in the bulk material. The purpose of this work is to determine the temperature dependences of the lowest relaxation frequencies associated with the phase transition in a thin ferroelectric film for different thickness l and the degree of polarization fixation on the film surface. On the base of the Landau-Khalatnikov theory we write the dynamic equation, describing the oscillations of the polarization vector $\vec{P}(0,0,P)$:

$$\frac{\delta F}{\delta P} - \gamma \frac{\partial P}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

where the first term is the variation of free energy F , and γ is the damping factor. We expand the expression for free energy density [1] in a series near the Curie temperature T_C of an ideal crystal:

$$F = \frac{1}{V} \int_V \left\{ -\frac{\alpha}{2} \vec{P}^2 + \frac{\kappa}{2} (\nabla P)^2 \right\} dV + \frac{1}{V} \int_S \frac{\alpha_s}{2} \vec{P}^2 dS, \quad (2)$$

where $\alpha = \alpha_0(T_C - T)$, α_s are the volume and surface decomposition coefficients, respectively; $\kappa \approx a^2$ is the correlation constant, a is the lattice parameter; V and S are the volume and surface area of the film, respectively. Substituting expression (2) into (1), and, assuming a simple harmonic dependence of polarization on time $P(z,t) = P(z)e^{-i\omega t}$, we get the equation

$$\kappa \frac{d^2 P(z)}{dz^2} + (\alpha - i\omega\gamma) P(z) = 0 \quad (3)$$

with boundary conditions

$$\kappa \frac{dP(z)}{dz} \mp \alpha_s P(z) \Big|_{z=0,l} = 0. \quad (4)$$

Substituting the solution of equation (3) into the boundary conditions (4), we obtain a homogeneous system of linear equations for the integration constants. Equating its determinant to zero gives a transcendental equation for determining the temperature dependences of relaxa-

tion frequencies

$$\left(\alpha_s - \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}\right) \sin\left(\sqrt{\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}{2}} l\right) + 2\alpha_s \sin\left(\sqrt{\frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}}{2}} l\right) = 0, \quad (5)$$

those solution can be obtained only numerically. In fig. shows the dependences of the soft mode $\omega_0(T)$ for a model TGS crystal with parameters $T_C=322$ K, $\alpha_0=3.92 \cdot 10^{-3}$ K⁻¹ [2] for different values of the normalized film thickness l/a and parameter α_s/a of fixation polarization on the film planes.

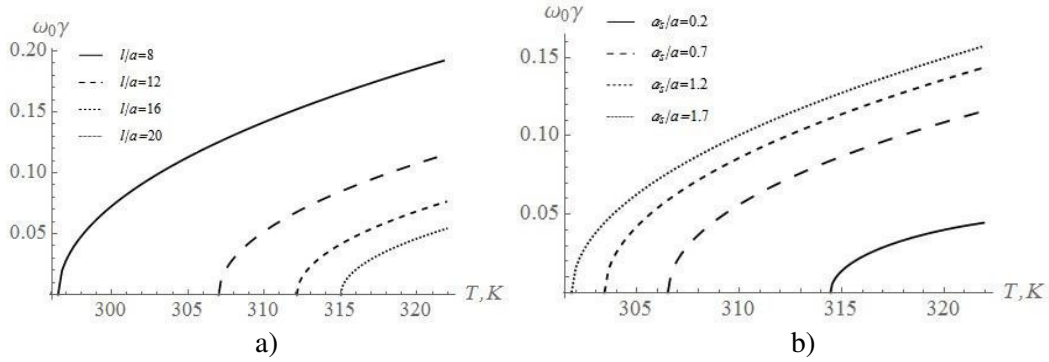


Figure. Temperature dependences of the normalized soft mode $\omega_0\gamma$ of the film for different normalized thicknesses l/a (a) and parameters α_s/a (b)

From fig. it can be seen that with decreasing temperature, the natural frequency ω_0 decreases and drops sharply to zero at the point of phase transition. Temperature dependences of relaxation frequencies ω_1, ω_2 , within the framework of the task are linear. Apparently, taking into account the own electric fields, will reveal the nonlinear character of these frequencies, which will give the model more realism.

References

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. Course of Theoretical Physics. V. 8. Electrodynamics of Continuous Media. Moscow, Fizmatlit, 2005, p. 656 (in Russian).
2. Iona F., Shirane D. Ferroelectric crystals, Moscow, Mir, 1965, p. 556 (in Russian).

UDC 537.9

INFLUENCE OF EXTERNAL ELECTRIC FIELD ON PHASE TRANSITIONS IN THE RESTRICTED FERROELECTRICS

V.N. Nechaev¹, A.V. Shuba²

¹Doct. of phys.-math. sci, Prof., wladnic@mail.ru

²Cand. of phys.-math. sci, Assoc. prof., shandvit@rambler.ru

Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh)

On the base of Landau-Ginzburg theory, the shift of the phase transition temperature in a thin ferroelectric film, located between electrodes, are investigated depending on the film thickness and the type of polarization fixing on the film planes.

Keywords: thin ferroelectric film, phase transition temperature.

As is known, in a bulk ferroelectric at a phase transition (PT) temperature, its symmetry changes abruptly. In conditions of restricted geometry, for example in thin ferroelectric films (FEF), the PT point shifts, as a rule, down the temperature [1], and the solvability of the corresponding boundary value problem will be determined by the Fredholm alternative. In this case, both the temperature T_f of the PT and the type of solution near the transition point must change, which is associated with relaxation processes in the crystal. The purpose of this

work is to determine the temperature shift of the PT in a FEF, placed between two electrodes, and the temperature interval of the PT diffused depending on the thickness l of the film and the type of polarization fixed on its surface.

We expand in series, near the Curie point T_C , the specific free energy of a FEF with a polarization vector $\vec{P} = \{0, 0, P\}$, lying in the (x, y) plane, limited to a second powers [2]:

$$F = \int_V \left(-\frac{\alpha}{2} \vec{P}^2 + \frac{\kappa}{2} (\nabla P)^2 - \vec{E} \cdot \vec{P} - \vec{E}_{ext} \cdot \vec{P} \right) dV + \int_S \frac{\alpha_s}{2} \vec{P}^2 dS, \quad (1)$$

where $\alpha = \alpha_0 (T_C - T)$ and α_s are the volume and surface decomposition coefficients, respectively; $\kappa \approx a^2$ is the correlation constant, a is the lattice parameter; \vec{E} and \vec{E}_{ext} are the vectors of own and external electric field strength, respectively; ε are contribution to the dielectric constant (mainly electronic), not considered using the order parameter; V and S are the volume and surface area of the film, respectively. From varying of expression (1) we receive coordinate dependences

$$\begin{aligned} P(z) &= C_1 \cos \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} z + C_2 \sin \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} z + C_3; \\ \varphi(z) &= \frac{4\pi}{\varepsilon \sqrt{\alpha_\varepsilon}} C_1 \cos \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} z - \frac{4\pi}{\varepsilon \sqrt{\alpha_\varepsilon}} C_2 \sin \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} z + \alpha \frac{z}{\sqrt{\kappa}} C_3 + C_4, \end{aligned} \quad (2)$$

where $\alpha_\varepsilon = \alpha - 4\pi / \varepsilon$. The electric charges on the film planes are neutralized by the charges of the electrodes; therefore, leakage field do not arise here. The electric field strength from the electrodes is represented as

$$h = -\frac{\varphi(l) - \varphi(0)}{l},$$

whence the potential on the top plane is $\varphi(l) = -hl + \varphi(0)$. Assuming for convenience of calculations, the potential on the lower plane is equal to zero, we attain eventual the system for determining the integration constants C_1, C_2, C_3, C_4 :

$$\begin{cases} \kappa \frac{dP}{dz} \mp \alpha_s P \Big|_{z=0,l} = 0, \\ \varphi(0) = 0, \\ \varphi(l) = -hl. \end{cases} \quad (3)$$

Equating the system determinant to zero (3) gives a transcendental equation

$$\frac{8\pi\alpha_s}{\varepsilon\sqrt{\alpha_\varepsilon}} \left[\sqrt{\alpha_\varepsilon} \sin \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} l + \alpha_s \left(1 - \cos \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} l \right) \right] - \alpha \frac{l}{\sqrt{\kappa}} \left[(\alpha_s^2 - \alpha_\varepsilon) \sin \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} l + 2\alpha_s \sqrt{\alpha_\varepsilon} \cos \sqrt{\frac{\alpha_\varepsilon}{\kappa}} l \right] = 0 \quad (4)$$

for finding the first nontrivial solution that determines the temperature T_f of the PT. To find the temperature T_f^h of the FP in the external field, we use the Kronecker-Capelli theorem on the system compatible (3) (fig.).

The situation, considered in the paper, represents example of anomalous physical phenomena, where an arbitrarily weak external force generates a finite response of the system.

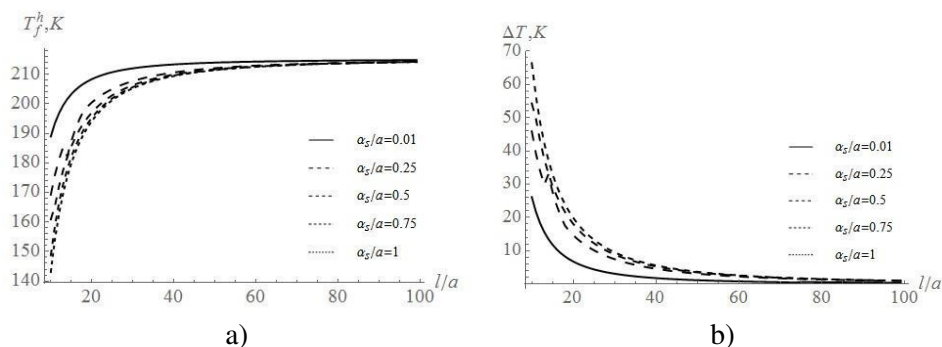


Figure. Dependences of the temperature T_f^h (a) and shift temperature ΔT (b) of the PT on the normalized thickness of the TGS film under the action of an external field

References

1. Nechaev V.N., Shuba A.V. // Phys. Solid State. 2014. V. 56. № 5. P. 985.
2. Rabe K.M., Ahn C.H., Triscons J.-M. Physics of ferroelectrics: A modern perspectives, Berlin, Springer, 2007, 397 p.

UDC 620.182

MECHANICAL SPECTROSCOPY AS AN IN SITU TOOL TO STUDY FIRST AND SECOND ORDER TRANSITIONS IN Fe-Ga ALLOYS AT ELEVATED TEMPERATURES

V.V. Palacheva¹, A.K. Mohamed², Y. Mansouri³, J. Cifre⁴, D. Mari⁵,
I.A. Bobrikov⁶, A.M. Balagurov⁷, I.S. Golovin⁸

¹PhD student, palacheva@misis.ru

²PhD student, abdelkarim@misis.ru

³PhD student, yamimansoorina@gmail.com

⁴Dr, joan.cifre@uib.es

⁵Dr, professor, daniele.mari@epfl.ch

⁶Dr, bobrikov@nf.jinr.ru

⁷Dr, professor, bala@nf.jinr.ru

⁸Dr, professor, i.golovin@misis.ru

^{1,2,3,8}National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

²Benha University, Shoubra Faculty of Engineering, Cairo, Egypt

³IKIU university, Norouzian St., Qazvin, Iran

⁴Universitat de les Illes Balears, Ctra. De Valldemossa, Palma de Mallorca, Spain

⁵IPHYS, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland

^{6,7}Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Phase transitions and related anelastic effects are examined in Fe-xGa alloys ($x = 8-33\%$) by means of in-situ neutron diffraction, vibrating sample magnetometry, dilatometry, and three different mechanical spectroscopy techniques: torsion forced pendulum, vibrating reed, and commercial DMA Q800. Anelastic transient effects due to ordering-disordering ($D0_3 \leftrightarrow A2$) in Fe-19Ga, and first order phase transitions ($D0_3 \rightarrow L1_2 \rightarrow D0_{19} \rightarrow B2$) in Fe-27Ga compositions, are discussed with respect to phase and magnetic transitions.

Keywords: phase transitions, mechanical spectroscopy, Snoek effect, Zener relaxation.

Amplitude-independent thermally-activated and transient effects in as-cast Fe-(8-33)%Ga alloys in a temperature range from 0 to 600°C and frequencies from 0.1 to 30 Hz were investigated. Activation energies and characteristic relaxation time are evaluated and analysed to conclude about the influence of Ga content on Zener relaxation, possible overlapping of Snoek-type relaxation with another, still not well defined, mechanism [1-5]. The transient effect along with a sharp increase in the modulus is a sensitive tool to detect transition from metastable to stable structure in the Fe-Ga alloys. First ever systematic study of anelastic

effects in binary as cast Fe-Ga (with Ga < 33 at.%) alloys between 0 and 600°C is carried out in this work. The following conclusions can be drawn:

- Three thermally activated IF effects (P1, P2 and P3 peaks) and a transient effect (P_{Tr}) due to metastable/stable structure transition are recorded in Fe-Ga alloys and analysed. The P1 peak is recorded in the alloys with Ga < 30 at.%, the P2 peak e below Ga < 25at.% and the P2 peak - in the alloys with Ga > 25 at.%. The transient peak (P_{Tr}) is observed in the alloys with Ga > 24% and is accompanied by an increase in the elastic modulus. One more thermally activated peak (P4) can be distinguished close to the upper temperature limit of our tests (600°C), it is not discussed in this paper due to lack of experimental data in this temperature range.

- The relaxation strength of the Zener relaxation in Fe-Ga alloys has a complicated character: the relaxation strength increases with an increase in gallium content in the disordered alloys with <19%Ga, then the relaxation strength decreases rapidly in the range 19 < Ga < 25 at.% due to alloys ordering. This anelastic effect is denoted in the paper as the P3 peak. In Fe-Ga alloys with Ga > 25 at.%, the P2 peak height increases with an increase in deviation from stoichiometric composition Fe_3Al , and it vanishes after transition from the $DO_3 \rightarrow L1_2$ structure. The values of the relaxation time for both P2 and P3 effects suggest point defect relaxation and a smooth decrease in the activation energy on Ga concentration in Fe-Ga alloys, which is in agreement with the Zener relaxation and theoretical predictions.

This work was supported by RFBR grants No. 18-58-52007 (MNT_a) and No. 18-58-53032 (GFEN_a) and also RNF grant No. 19-72-20080.

References

1. Clark A.E., Restorff J.B., Wun-Fogle M., Lograsso T.A., Schlagel D.L. / IEEE Trans Magn – 2000. V. 36(5). - P. 3238.
2. Clark A.E., Wun-Fogle M., Restorff J.B., Lograsso T.A., Cullen J.R. / IEEE Trans Magn – 2001; V. 37(4). - P. 2678.
3. Smith G.W., Birchak J.R. / J Appl. Phys. – 1968, V. 39(5). - P. 2311-5.
4. Q. Z. Chen, A. H. W. Ngan, B. J. Duggan. / Journal of Materials Science. – 1998. V. 33. - P. 5405-5414.
5. Summes E.M., Lograsso T.A., Wun-Fogle M. / Journal of Materials Science – 2007, V. 42, - P. 9582-9594.

УДК 538.95, 534.2

ОБЩИЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ УПРУГОЙ ДИСПЕРСИЕЙ И ЗАТУХАНИЕМ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

М.А. Луговая¹, Н.А. Швецова², А.Н. Резниченко³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Аспирант, lugovaya_maria@mail.ru

²Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

³Научный сотрудник, reznichenkoan@yahoo.com

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование частотных зависимостей комплексных модулей упругости керамоматричных пьезокомпозиатов с высокими упругими потерями и дисперсией. Определены комплексные наборы упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров. Полученные экспериментальные результаты сопоставлены с теоретическими результатами, полученными с использованием общих соотношений Крамерса-Кронига.

Ключевые слова: упругие потери, рассеяние, дисперсия, керамоматричные пьезокомпозиаты, комплексное сопротивление.

Многофазные керамоматричные композиты (КМК) являются очень сложными объектами для теоретического моделирования, неразрушающего контроля (НРК) и ульт-

тразвуковых измерений [1]. Для точного описания свойств пьезоактивных КМК необходима оценка механических, пьезоэлектрических и диэлектрических потерь с учетом несинфазного отклика материала на внешнее воздействие [2].

В настоящей работе были исследованы частотные зависимости комплексных модулей упругости для различных КМК с сильной пространственной дисперсией и высокими упругими потерями. Полученные экспериментальные результаты сопоставлены с теоретическими результатами, полученными с использованием общих соотношений Крамерса-Кронига. В качестве образцов для моделирования распространения ультразвуковых волн и экспериментальных исследований с использованием пьезоэлектрического резонансного анализа (PRAP) и ультразвуковых измерений были выбраны следующие типы КМК с высокими упругими потерями:

- КМК керамика-кристалл, состоящие из сегнетомягкой матрицы ЦТС с произвольно распределенными кристаллическими включениями ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, LiNbO_3 и др.) с различным средним размером и объемным содержанием частиц;
- пористая пьезокерамика ЦТС с различной относительной пористостью и размером пор.

Комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические коэффициенты пористой керамики и КМК определялись методом пьезоэлектрического резонансного анализа импедансных спектров и программного обеспечения PRAP [3]. Исследования микроструктуры образцов (сколы и полированные поверхности) выполнялись с помощью сканирующего электронного (SEM, Karl Zeiss) и оптического (NeoPhot-21) микроскопов.

На рисунке в качестве примера показаны частотные зависимости коэффициентов затухания и соответствующих скоростей ультразвука для КМК ЦТС/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с различным объемным содержанием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$.

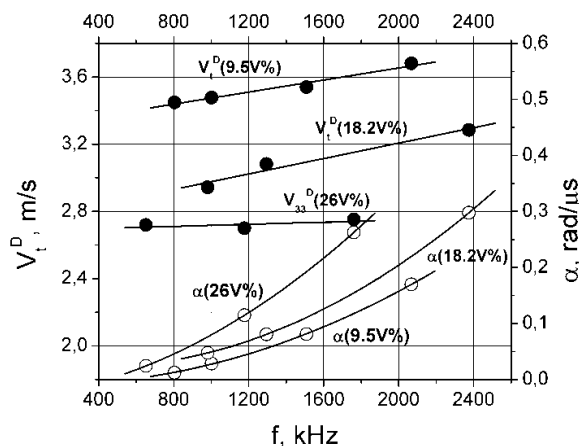


Рисунок. Частотные зависимости скоростей ультразвука V_t^D и V_t^E и соответствующих коэффициентов затухания $\alpha(V_t^D)$ и $\alpha(V_t^E)$ для КМК ЦТС/ $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ с различными объемными долями $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$

Показано, что в зависимости от диапазона частот и размера рассеивающих частиц механизм рассеяния может меняться от Рэлеевского ($\lambda \gg D$) к стохастическому типу ($\lambda \sim D$), что приводит к соответствующим изменениям дисперсионного характера и хорошо согласуется с общими соотношениями Крамерса-Кронига:

$$\alpha(\omega) = \frac{\pi\omega^2}{2V_0^2} \frac{dV(\omega)}{d\omega} \quad \text{и} \quad \Delta V = V(\omega) - V_0 = \frac{2V_0^2}{\pi} \int_{\omega_0}^{\omega} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2} d\omega', \quad (1)$$

где скорость звука, $V(\omega)$ записывается как $V + \Delta V(\omega)$ при $\Delta V(\omega) \ll V_0$ и сохраняются

только члены порядка $\Delta V(\omega)$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 16-58-48009-Инд-оми).

Литература

1. Rybyanets A.N. Ceramic piezocomposites: modeling, technology, and characterization / A.N. Rybyanets, A.A. Rybyanets // IEEE Trans. UFFC. - 2011. - V. 58. - P. 1757-1774.
2. Rybyanets A.N. Complete characterization of porous piezoelectric ceramics properties including losses and dispersion / A.N. Rybyanets, A.V. Nasedkin // Ferroelectrics. - 2007. - V. 360. - P. 57-62.
3. Rybyanets A.N. Automatic iterative evaluation of complex material constants of highly attenuating piezocomposites / A.N. Rybyanets, R. Tasker // Ferroelectrics. - 2007. - V. 360. - P. 90-95.

УДК 539.67

ВКЛАД ЗЕРНОГРАНИЧНЫХ ПОР В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ ФОН ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МЕТАЛЛАХ С УЛЬТРАМЕЛКИМ ЗЕРНОМ

В.Г. Кульков¹, А.А. Сыщиков²

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, vikulov@yandex.ru

²Аспирант, alexsyshchikov@yandex.ru

Филиал ФГБОУВО НИУ «Московский энергетический институт» в г. Волжском

На основе решения неоднородного уравнения диффузии для вакансий в границе зерен находится зависимость величины внутреннего трения от частоты и температуры.

Ключевые слова: внутреннее трение, вакансии, уравнение диффузии.

Большинство методов получения металлов и сплавов с ультрамелким зерном связано с появлением остаточной пористости в конечном продукте. После выдержки образца при несколько повышенной температуре поры преимущественно располагаются на межзеренных границах или залечиваются. В первом случае материал обладает повышенным уровнем внутреннего трения по сравнению с беспористым аналогом. Под действием переменного внешнего напряжения изменяется химический потенциал вакансий в границах зерен. В результате возникают диффузионные потоки вакансий между порами и областями сопряжения зерен, приводящие к перераспределению вещества в области границ. Беспористые участки границ поочередно играют роль источников и стоков вакансий. Это приводит к взаимному смещению сопрягающихся по границе смежных кристаллитов, что является причиной рассеяния энергии колебаний.

Из решения нестационарного неоднородного уравнения диффузии с периодическим источником вакансий находится зависимость избыточной по сравнению с равновесной концентрации вакансий от координат и времени. Задача имеет двумерный характер. На основе решения рассчитывается скорость взаимного смещения кристаллитов. Из зависимости химического потенциала вакансий от их концентрации и величины нормального напряжения находится распределение напряжения в различных областях границы. Расчет производится с учетом эффекта подстройки напряжений, учитывающего изменение локального напряжения в зависимости от перераспределения вещества в границе.

Зависимость логарифма внутреннего трения от обратной температуры имеет вид линии, имеющей два прямолинейных участка с изломом. Различные величины углов наклона прямолинейных участков свидетельствуют о наличии двух эффективных энергий активации процесса в различных температурно-частотных областях. Положение областей излома зависит от геометрических размеров пор и диффузионных характеристик вакансий. Подобный вид зависимости уровня фона внутреннего трения характерен для материалов с другими неоднородностями, присутствующими на границах зерен.

МОДЕЛЬ СУ-ШРИФФЕРА-ХИГЕРА И АНАЛИЗ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СОСТОЯНИЙ В ЛИОТРОПНЫХ СИСТЕМАХ С ДИССИПАЦИЕЙ

Л.В. Ельникова

Канд. физ.-мат. наук, н.с., elnikova@iter.ru

ФГБУ «Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова НИЦ «Курчатовский институт»

Рассмотрена модель Су-Шриффера-Хигера для оценки энергии, проводящих состояний в многокомпонентных системах с активным и пассивным режимом эволюции параметра порядка в тривиальных и топологических фазах.

Ключевые слова: топологические фазы, модель Су-Шриффера-Хигера, активные состояния.

Поверхностные топологические состояния исследуются в связи с актуальностью современных спинтронных приложений, развитием производства фотонных, акустических и механических метаматериалов и нанокompозитов, актуаторов как активных динамических систем [1].

Существует теоретическая модель Су-Шриффера-Хигера (СШХ), предназначенная для описания топологических дефектов солитонного типа, которые определяют перенос заряда в легированных материалах, или топологический фазовый переход. Впервые она была проиллюстрирована для случая полиацетилена [2], имеющего один π -электрон углеродной связи в качестве проводящего состояния. В настоящее время модель СШХ получила развитие для расчета проводящих свойств широкого класса полимерных композитов, топологических изоляторов и графенов, она ассоциируется с фазой Зака фотонных кристаллов [3-6] и пр. СШХ - гамильтониан сильной связи [7] выражается как

$$H_{SSH} \approx \sum_i \frac{1}{2} M_i \dot{\mathbf{r}}_i^2 + \sum_{ij} \frac{K}{2} \left[b_{ij} - \frac{4\sqrt{\gamma}\alpha}{\pi K} \right] - \sum_{ij} [\gamma_0 - \sqrt{\gamma} a b_{ij}] (C_i^+ C_j + C_j^+ C_i) - \varepsilon \sum_i C_i^+ C_i, \quad (1)$$

где M_i и \mathbf{r}_i – масса и положение вектора i -го атомного узла, $b_{ij} = |\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$ длина связи между атомными узлами, K – константа динамической жесткости, t_0 – реперный прыжковый интеграл, α – линейная электрон-фононная константа связи узлов i и j , C_i^+ и C_i – операторы рождения и уничтожения электрона в узле i . Численное решение (1) показано на рис. как аналог изменения краевых состояний.

В общем случае модель СШХ может быть распространена на диссипативные системы [1], например, применяться для анализа активных коллоидных фаз [8].

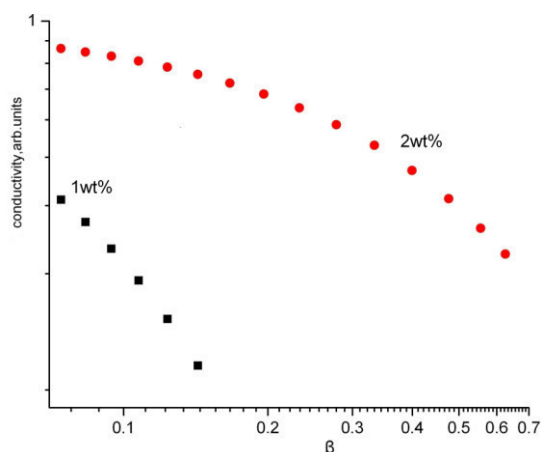


Рисунок. Расчетные температурные зависимости проводимости полимерного композита при различных концентрациях наполнителей. Применен решеточный метод Монте Карло с гамильтонианом (1) «пассивной» модели СШХ

В одномерных и двумерных активных системах действует механизм самоподдерживающихся колебаний, активирующий топологические краевые состояния, тогда как в 3D эти связи разрушены. Это вызывает проблему вычисления топологического инварианта, например, числа кручения. Вместе с тем изменяются проводящие и механические свойства композитов.

Литература

1. Kotwal T., Ronellentsch H., Moseley F. and Dunkel J. Active topoelectrical circuits // arXiv:1903.10130v2.
2. Su W.P., Schrieffer J.R. and Heeger A.J. Solitons in Polyacetylene// Phys. Rev. Lett. - 1979. - V. 42. - P. 1698–1701.
3. Özsoy O., Sünel N. Localized states of a narrow single-walled carbon nanotube by using Su–Schrieffer–Heeger model Hamiltonian// Czechoslovak Journal of Physics. - 2004.- V. 54. - P. 841–847.
4. Li X., Meng Y., Wu X., Yan Sh., Huang Y., Wang Sh., Wen W. Su-Schrieffer-Heeger Model Inspired Acoustic Interface States and Edge States// Appl. Phys. Lett. - 2018. - V.113.- P. 203501.
5. Gorlach M.A. Slobozhanyuk A.P., Nonlinear topological states in the Su-Schrieffer-Heeger model// Nanosystems : physics, chemistry, mathematics.-2017. - V.8(6). - P. 695–700.
6. Asbóth J.K., Oroszlány L., Pályi A. A Short Course on Topological Insulators// arXiv:1509.02295v1.
7. Botelho A.L., Shin Y., Li M., Jiang L. and Lin X. Unified Hamiltonian for conducting polymers// J. Phys.: Condens. Matter - 2011.- V.23.- P. 455501-1–6.
8. Souslov A., Dasbiswas K., Fruchart M., Vaikuntanathan S. and Vitelli V. Topological waves in fluids with odd viscosity// Phys. Rev. Lett.- 2019.- V.122.- P. 128001-1-4.

УДК 548.4

О РАДИАЦИОННОМ ЗАТУХАНИИ ИЗГИБНЫХ КОЛЕБАНИЙ ДИСЛОКАЦИИ В ДИССИПАТИВНОМ КРИСТАЛЛЕ

В.В. Дежин

Канд. физ.-мат. наук, доцент, viktor.dezhin@mail.ru
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Рассмотрены изгибные колебания дислокации в диссипативном кристалле. Найдены вклады изгибных колебаний в радиационное торможение дислокации для следующих случаев: низкочастотные колебания в длинноволновом и коротковолновом пределах, коротковолновые колебания произвольной частоты, длинноволновые колебания произвольной частоты.

Ключевые слова: дислокация, изгибные колебания, обобщенная восприимчивость, динамическое торможение.

Радиационное затухание колеблющейся прямолинейной дислокации (излучение упругих волн дислокацией) впервые рассмотрено Эшелби [1]. Позднее задача об излучении упругих волн дислокацией произвольной формы в изотропной бездиссипативной среде была решена в работах Нацика [2, 3]. Ниномия [4] получил уравнение движения дислокации в изотропной среде, имеющее мнимое слагаемое, обусловленное радиационными потерями. В данной работе с учетом определения обобщенной восприимчивости [5] и на основе результатов [6-8] найден вклад изгибных колебаний дислокации в радиационное трение для диссипативного кристалла.

Предполагалось, что ось Oz лежит вдоль линии дислокации, которая совершает малые колебания вблизи положения равновесия. Учитывалось электронное торможение дислокации. Получены выражения для вклада изгибных колебаний в радиационное затухание W .

Для низкочастотных изгибных колебаний в длинноволновом пределе

($|k_z l| \ll 1$) имеем

$$W = \frac{\rho}{10\pi} \gamma^0 \omega \left[\left(3 - 8\xi + \frac{16}{3} \xi^2 \right) b_s^2 + \left(4\xi - \frac{8}{3} \xi^2 \right) b_e^2 \right] (k_z l)^2 \ln \frac{c_d}{l|\omega|}.$$

Здесь ρ – плотность кристалла, γ^0 – константа коэффициента электронного торможения, ω – частота, $\xi = c_t^2 / c_l^2$, c_t и c_l – скорости поперечных и продольных звуковых волн в бездиссипативном кристалле, b_s и b_e – винтовая и краевая компоненты вектора Бюргера дислокации, k_z – компонента волнового вектора вдоль линии дислокации, l – длина свободного пробега электрона, c_d – скорость изгибных волн вдоль дислокации.

Для низкочастотных изгибных колебаний в коротковолновом пределе ($1 \ll |k_z l| \ll k_m l$) имеем

$$W = \frac{\rho}{18\pi} \gamma^0 \omega \left[\left(\frac{20}{\pi} - \frac{64}{\pi} \xi + 4\pi \xi^2 \right) b_s^2 + \left(\frac{4}{\pi} + \frac{40}{\pi} \xi - \frac{5\pi}{2} \xi^2 \right) b_e^2 \right] \frac{l}{c_d} |\omega|,$$

где k_m – максимальное волновое число.

Для коротковолновых изгибных колебаний дислокации произвольной частоты получим

$$W = \frac{3}{4\pi} \rho b_s^2 \omega_t^2 (k_z l)^2 \arctg \frac{8\gamma_0 \omega}{3\pi \omega_t^2 |k_z l|} + \left(\frac{16}{\pi^3} - \frac{1}{\pi} \xi \right) \rho b_s^2 \omega_t^2 (k_z l)^2 \arctg \frac{\pi \gamma_0 \omega}{3\omega_l^2 |k_z l|} + \\ + \frac{3}{\pi} \xi \rho b_e^2 \omega_l^2 \left[\left(\frac{8}{3\pi^2} - \frac{1}{6} \xi \right) (k_z l)^2 - \left(\frac{4}{3\pi^2} - \frac{1}{6} \xi \right) \frac{\omega^2}{\omega_l^2} \right] \arctan \frac{\pi \omega \gamma^0}{3\omega_l^2 |k_z l|}.$$

Здесь $\omega_t = c_t / l$, $\omega_l = c_l / l$.

Для длинноволновых изгибных колебаний дислокации произвольной частоты получим

$$W = C \frac{\rho \gamma^0}{10\pi} b_s^2 \omega \ln \frac{\omega_t}{|\omega|} (k_z l)^2 + \frac{\rho b_e^2}{10\pi} \gamma^0 \omega \left[\left(4\xi - \frac{8}{3} \xi^2 \right) (k_z l)^2 \ln \frac{1}{|k_z l|} + \right. \\ \left. - \left(2\xi - \frac{8}{3} \xi^2 \right) \frac{\omega^2}{\omega_l^2} \ln \frac{1}{|k_z l|} - \left(\frac{\pi}{2} \xi - \frac{64}{9\pi} \xi^2 \right) \frac{\omega^2}{\omega_l^2} |k_z l| \right],$$

где C – константа порядка единицы, зависящая от коэффициента Пуассона.

Отметим, что полученные выражения соответствуют интерференционному вкладу в затухание колебаний дислокации за счет радиационного торможения и взаимодействия с диссипативной средой.

Литература

1. Eshelby J.D. Dislocations as a cause of mechanical damping in metals / J.D. Eshelby // Proc. Roy. Soc. London A. – 1949. – V. 197. – N 1050. – P. 396-416.
2. Нацик В.Д. Радиационное торможение дислокационных петель / В.Д. Нацик // Физика твердого тела. – 1966. – Т. 8. – № 7. – С. 2244-2246.
3. Нацик В.Д. Излучение звука дислокацией, выходящей на поверхность кристалла / В.Д. Нацик // Письма в ЖЭТФ. – 1968. – Т. 8. – № 6. – С. 324-328.
4. Ninomiya T. Eigenfrequencies in a dislocated crystal / T. Ninomiya // Fundamental aspects of dislocations theory. – New York: Nat. Bur. Stand. Spec. Publ. 317. – 1970. – V. 1. – P. 315-357.
5. Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т. V. Статистическая физика. Ч. 1 / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Физматлит, 2002. – 616 с.

6. Рошупкин А.М. Обобщенная восприимчивость дислокации в диссипативном кристалле / А.М. Рошупкин, И.Л. Батаронов, В.В. Дежин // Известия РАН. Сер. Физическая. – 1995. – Т. 59. – № 10. – С. 12-16.

7. Dezhin V.V. On damping of an edge dislocation vibrations in a dissipative crystal: limiting cases / V V Dezhin // J. of Physics: Conf. Ser. – 2017. – V. 936. – 012062.

8. Dezhin V.V. On damping of screw dislocation bending vibrations in dissipative crystal: limiting cases / V V Dezhin // IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering – 2018. – V. 327. – 032017

УДК 519.87

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В АМОРФНЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ МЕТАЛЛОВ

А.В. Бондарев¹, И.Л. Батаронов², И.М. Пашуева³

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, bondarev_a_v@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, i-bataronov@mail.ru

³Канд. техн. наук, доцент, varushka@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Методом Монте-Карло исследованы магнитные свойства аморфных сплавов Re-Tb и Re-Gd. Определены температуры перехода в состояние спинового стекла, построены магнитные фазовые диаграммы. Исследована релаксация намагниченности.

Ключевые слова: аморфные сплавы, тербий, гадолиний, метод Монте-Карло, спиновое стекло, магнитные фазовые диаграммы.

Двойные аморфные сплавы (АС) переходной металл – редкоземельный металл (ПМ–РЗМ) представляют собой системы, обладающие уникальными магнитными свойствами. В широком интервале концентраций в этих сплавах наблюдается переход в состояние спинового стекла. Природа спин-стеклового состояния в аморфных сплавах и механизмы релаксации намагниченности являются предметом интенсивных исследований в настоящее время.

Методом молекулярной динамики были построены модели атомной структуры АС систем $\text{Re}_{100-x}\text{-Tb}_x$ ($x=5\text{--}91$ ат. %) и $\text{Re}_{100-x}\text{-Gd}_x$ ($x=4\text{--}93$ ат. %), а также чистых аморфных тербия и гадолиния. Затем методом Монте-Карло в рамках модели Гейзенберга были исследованы магнитные свойства данных моделей. В гамильтониане для АС Re-Tb учитывалось обменное взаимодействие между магнитными моментами атомов Tb, находящихся в пределах первой координационной сферы, и случайная одноосная анизотропия. Для АС Re-Gd учитывалось ферромагнитное взаимодействие магнитных моментов атомов Gd в пределах первой координационной сферы и антиферромагнитное – в пределах второй координационной сферы.

В процессе охлаждения моделей рассчитывались температурные зависимости спонтанной намагниченности, магнитной восприимчивости и потенциальной энергии системы. Определены температуры перехода из парамагнитного в спин-стеклоное состояние в зависимости от концентрации атомов РЗМ, построены магнитные фазовые диаграммы. Исследовано поведение моделей при приложении внешнего магнитного поля: рассчитаны петли гистерезиса при различных температурах и концентрациях атомов РЗМ, по которым определены величины коэрцитивной силы и остаточной намагниченности.

Исследованы процессы релаксации намагниченности в моделях после отключения внешнего магнитного поля. Зависимости намагниченности от времени подчиняются разным законам для АС со случайной анизотропией (Re-Tb) и с флуктуациями обменного взаимодействия (Re-Gd).

II. МЕХАНИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

УДК 538.9

РЕЛАКСАЦИЯ МОДУЛЯ СДВИГА В МЕТАЛЛИЧЕСКОМ СТЕКЛЕ Pd₄₀Ni₄₀P₂₀ ПОСЛЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ КРУЧЕНИЕМ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Ю.П. Митрофанов¹, Е.В. Гончарова², Н. Zhou³, G. Wilde⁴, В.А. Хоник⁵

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, с. н. с. кафедры общей физики, mitrofanovup@gmail.com

²Канд. физ.-мат. наук, м. н. с. кафедры общей физики, goncharova.evg@mail.ru

³PhD student of the Institute of Material Physics, h_zhou04@uni-muenster.de

⁴PhD in Materials Science, University Professor, Director of the Institute of Material Physics, Dean of the Department of Physics, gwilde@uni-muenster.de

⁵Д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой общей физики, г. н. с., v.a.khonik@vspsu.ac.ru

^{1,2,5}Воронежский государственный педагогический университет, Воронеж (Россия)

^{3,4}University of Münster, Münster (Germany)

Исследована релаксация сдвиговой упругости в металлическом стекле Pd₄₀Ni₄₀P₂₀ после пластической деформации кручением под давлением. Деформация влияет на кинетику нерелаксированного модуля сдвига при термообработке стекла, что свидетельствует о значительном изменении энергетического спектра структурной релаксации вследствие интенсивной пластической деформации.

Ключевые слова: металлическое стекло, модуль сдвига, релаксация, пластическая деформация.

Методы интенсивной пластической деформации являются эффективным инструментом модификации структуры кристаллических сплавов, позволяя создавать объемные наноматериалы с особыми физическими свойствами [1]. Вопрос о влиянии такого рода деформаций на структуру аморфных (некристаллических) сплавов остается в значительной степени открытым и является предметом неослабевающего интереса физиков-металловедов.

Нерелаксированный модуль сдвига G является важнейшей термодинамической величиной, которая характеризует релаксационную (медленную) и атомно-молекулярную (быструю) динамику структуры аморфных веществ (жидкостей и стекол) [2]. В частности, для металлических стекол величина G оказывается важнейшим интегральным индикатором тепловых эффектов, которые сопровождают процесс релаксации некристаллической структуры [3].

В данном исследовании *впервые* были выполнены измерения нерелаксированного модуля сдвига G при нагреве образцов металлического стекла Pd₄₀Ni₄₀P₂₀, подвергнутых предварительной интенсивной пластической деформации методом кручения под давлением. Измерения G проводились методом электромагнитного акустического резонанса (детали см., например, в работе [4]). На рисунке представлены результаты измерений при 3 К/мин для недеформированного образца (в виде относительного изменения модуля сдвига $g = G / G_{340\text{K}} - 1$, где $G_{340\text{K}}$ – величина модуля сдвига при 340 К), а также после предварительной деформации при комнатной температуре T_{r} под давлением около 12 ГПа после $N = 3, 10$ и 100 оборотов. Пластическая деформация вызывает изменение кинетики G (рис. 1). После нагрева образца до $620\text{ K} > T_g$ (где T_g – температура стеклования) и последующего охлаждения до T_{r} реализуется релаксированное состояние. При этом итоговая величина релаксации модуля сдвига (g_{rel}) (см. вставку на рисунке для $T = 340\text{ K}$) зависит от числа оборотов N , т.е. от эффективной величины пластической деформации. Кинетика модуля сдвига в релаксированном образце (рис. 2) отличается от исходного (не отожженного) стекла.

В работе обсуждаются возможные причины изменения кинетики G вследствие формирования полос сдвига после интенсивной пластической деформации.

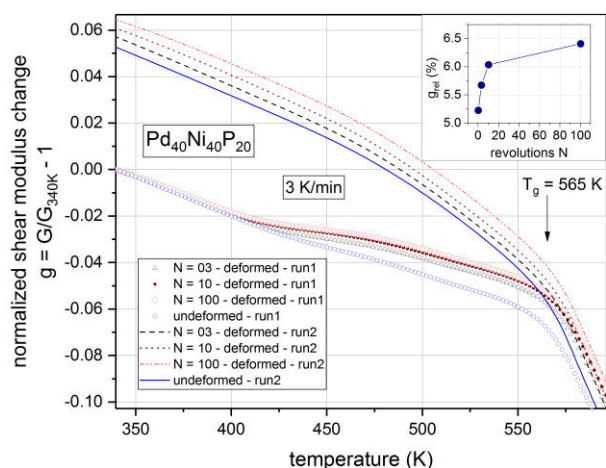


Рисунок. Температурная зависимость относительного изменения модуля сдвига в недеформированном и деформированном стекле Pd₄₀Ni₄₀P₂₀

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (задание 3.1310.2017/4.6).

Литература

1. Estrin Y. Extreme grain refinement by severe plastic deformation : A wealth of challenging science / Y. Estrin, A. Vinogradov // *Acta Amaterialia*. – 2013. – Vol. 61. – P. 782–817.
2. Dyre J.C. The glass transition and elastic models of glass-forming liquids / J.C. Dyre // *Reviews of Modern Physics*. – 2006. – Vol. 78. – P. 953–972.
3. Khonik V. Metallic glasses : A new approach to the understanding of the defect structure and physical properties / V. Khonik, N.P. Kobelev // *Metals*. – 2019. – Vol. 9. – P. 605-1–605-21.
4. Mitrofanov Y.P. Towards understanding of heat effects in metallic glasses on the basis of macroscopic shear elasticity / Y.P. Mitrofanov, D.P. Wang, A.S. Makarov, W.H. Wang, V.A. Khonik // *Scientific Reports*. – 2016. – Vol. 6. – P. 23026-1–23026-6.

УДК 544.6

ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ В СТРУКТУРАХ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ХРОМА

Ю.Н.Шалимов¹, В.И.Кудряш², Д.Л.Шалимов³

¹Д-р техн. наук, профессор, shalimov_yn@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, kudrjash_vi@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

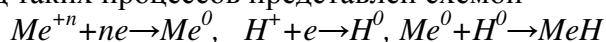
²ФГБОУ ВО «Воронежский институт МВД»

³НКТБ «Феррит»

В работе рассмотрены вопросы формирования структур из электролитического хрома в условиях стационарного и импульсного электролиза. Показано, что роль дефектов выполняют границы зерен, по которым преимущественно происходит формирование металлгидридов.

Ключевые слова: металлгидриды, дефекты структуры импульсный электролиз, внутреннее трение.

Известно, что электролитические металлы и сплавы как системы с меньшей степенью упорядоченности атомов образуют дефекты структуры, по которым возможно формирование металлгидридов при условии протекании сопряженных процессов на катоде [1]. Общий вид таких процессов представлен схемой



Как правило, энергия связи в этих соединения невелика и для хромовых покрытий лежит в пределах 0,45-0,6 eV, что соответствует температуре экстракции водорода из гидрида в пределах 125-150°C. Таким образом, возможность гидридного хранения

водорода для электролитических металлов и сплавов значительно выше, чем для металлов, полученных методом плавления. Однако и для металлов, полученных металлургическими методами, можно сформировать дефекты путем термической обработки или механического воздействия путем обработке в растворе ультразвуком в режиме кавитации.

В качестве пример рассмотрим электролитического формирование дефектов в структуре хрома. На рисунке представлены температурные зависимости внутреннего трения $Q^{-1}(T)$ электролитического хрома, полученного из сернокислых электролитов хромирования в условиях стационарного и импульсного электролиза [2]. Амплитуда пика внутреннего трения имеет максимальное значение для режимов нестационарного электролиза. То есть число дефектов структуры увеличивает при импульсном режиме электролиза. С точки зрения совершенства структуры это позволяет утверждать, что рост числа дефектов связан с увеличением суммарной эффективной длины границ зерен. Что позволяет предположить наличие стимуляции образования гидридов на дефектах структуры в этих областях.

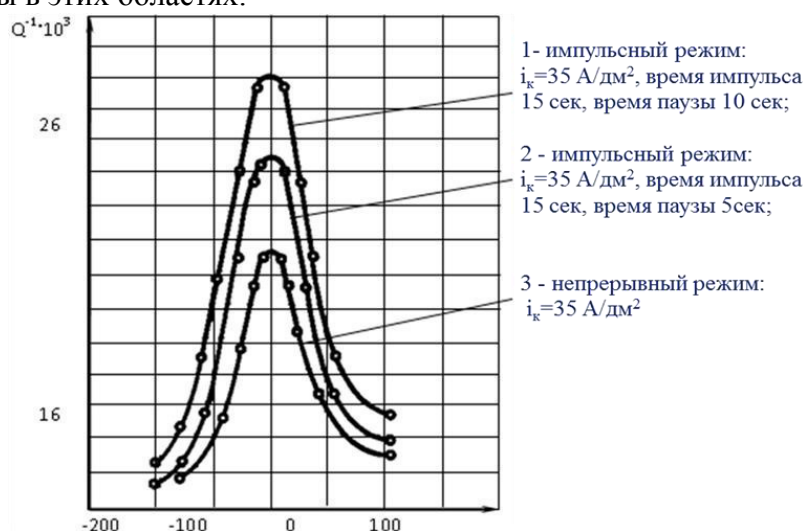


Рисунок. Температурная зависимость внутреннего трения электролитического хрома, полученного из сернокислого электролита

Увеличение ширины пиков $Q^{-1}(T)$ соответствующих нестационарным режимов электролиза свидетельствует о распределении энергии активации процессов, связанным с образовавшимися гидридными структурами. Что говорит о возможности использования редуцирующего эффекта при последующем извлечении водорода при практическом использовании таких гидридных систем в качестве накопителей водорода.

В зависимости от свойств электролитов условия образования электролитических осадков могут сильно различаться за счет величины времени релаксации при реализации элементарного акта. В электролитах хромирования на основе хромсульфатных электролитов процесс восстановления хрома осуществляется из анионной формы на катоде. Формирование атомарной структуры протекает в совершенно иных условиях, чем в электролитах на основе сернокислого хрома, так как энергии элементарного акта различается. Количество водорода в случае хромсульфатных электролитов выделяется значительно больше на катоде. Тем не менее, в сернокислых электролитах образуется больше гидридов. Предположительно в условиях пассивации поверхности формируются гетероструктуры: хрома и оксида хрома.

Литература

1. Феттер К. Электрохимическая кинетика. М.: Химия. 1967. 856с.
2. Научная школа В. С. Постникова в Воронежском политехе: А. А. Щетинин отв. ред. Воронеж: Кварта, 2015. 211с.

FORMATION OF THE ENHANCED DAMPING STATE IN HIGH-PURITY COLD-ROLLED Fe-18Cr ALLOY

A.K. Mohamed¹, M.Yu. Zadorozhnyy², D.V. Saveliev³, I.B. Chudakov⁴, I.S. Golovin⁵

¹PhD student, abdelkarim@misis.ru

²Dr, priboy38@mail.ru

³Dr, dimsav94@gmail.com

⁴Dr, i-chudakov@yandex.ru

⁵Prof, i.golovin@misis.ru

^{1,2,5}National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

¹Benha University, Shoubra Faculty of Engineering, Cairo, Egypt

³Russian Technological University "MIREA", Pr. Vernadskogo, Moscow, Russia

⁴I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, Russia

Keyword: magneto-mechanically damped alloys; Grain size; spinodal decomposition; forced vibration; free decay; recrystallization temperature.

The vibration level in industry can be reduced using various vibro-isolating and vibro-absorbing devices based on viscoelastic organic materials [1, 2]. However, viscoelastic organic materials are characterized by low elastic modulus, and application of these materials reduces rigidity of the assembly. Also, organic materials cannot be used at elevated (higher than 200°C) or low (less than -70°C) temperatures, for instance in the satellite systems, where a small vibration of the laser beam makes the system useless. It is well-known that vibration, acoustic and operating properties of various precision devices can be improved with the help of High Damping Metals (HIDAMETs) [3, 4].

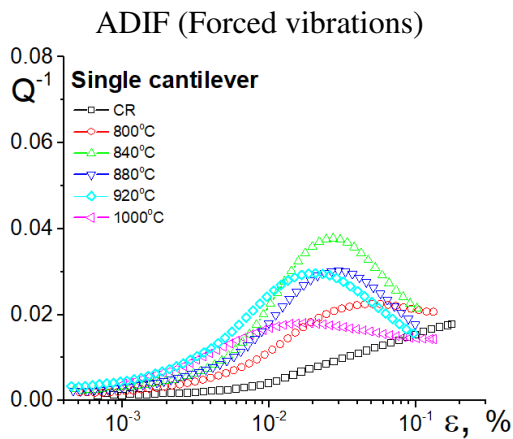


Fig. 1. Dependence of damping capacity on the annealing temperature

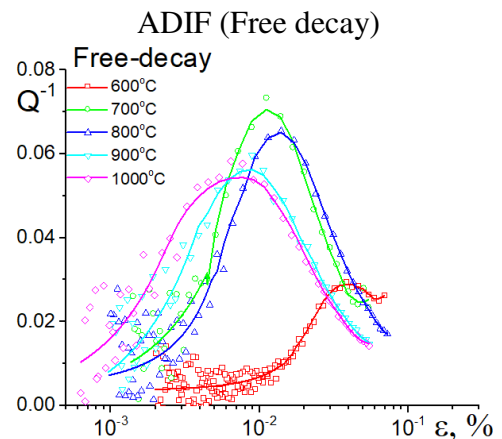


Fig. 2. Dependence of damping capacity on the annealing temperature

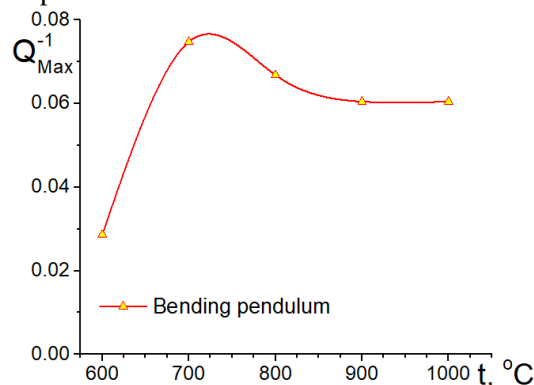


Fig. 3. Dependence of max. damping capacity on annealing temperature

The main structural mechanism of damping for the Fe-Cr alloys is magneto-

mechanical damping due to irreversible motion of magnetic domain walls (DWs), which also leads to a magnetostriction effect. In this investigation, we used cold-rolled (CR) sheets of a high-purity Fe-18Cr alloy to find out the correlation between heat treatment and damping capacity as well as magnetic properties including magnetostriction and grain size. Damping capacity of the samples was measured in several structural states after different annealing treatments using forced vibrations by means of dynamical mechanical analyzer Q800 TA Instrument and self-made vibrating reed with free-decay of bending vibrations. The results show that the optimal properties for Fe-18Cr binary alloy were achieved after 800°C annealing of the CR sheets. Slow cooling of the samples after high-temperature heat treatment causes a marked decrease of the impact toughness, reduction of damping capacity and increase in the coercive force of the Fe-18Cr alloy. This effect is caused by spinodal decomposition of the Fe-Cr solid solution and formation of local zones enriched with Cr. Damping capacity results are shown in the following Fig. 1, 2 and 3.

The work was carried out with support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of increase Competitiveness Program of NUST “MISIS”, implemented by a governmental decree dated 16th of March 2013, No 211. This work was supported by the RNF project 19-72-20080.

References

1. T. Claudia, N. Valentin, L. Gabriel, Actual stage of industrial noise reduction, *Journal of Engineering Studies and Research*, 17 (2011) 89–95.
2. C.H. Hansen, B.I.F. Goelzer, *Engineering noise control*, 10 (2007) 245–296.
3. D.W. James, High damping metals for engineering applications, *Mater. Sci. Eng.*, 4 (1969) 1–8. doi:10.1016/0025-5416(69)90033-0.
4. R. De Batist, High damping materials: mechanisms and applications, *J. Phys. Colloq.*, 44 (1983) 39–50.

UDC 620.182

STUDY OF STRUCTURE, PHASE TRANSITIONS AND ANELASTIC EFFECTS IN Fe-x at. %Ga ALLOYS (x=25, 27, 33)

A.K. Mohamed¹, V.V. Palacheva², V.V. Cheverikin³, A.V. Pozdnyakov⁴, A.M. Balagurov⁵,
I.A. Bobrikov⁶, J.- G. Gasser⁷, P. Tabary⁸, T. Mounier⁹, I.S. Golovin¹⁰

¹PhD student, abdelkarim@misis.ru

²PhD student, lera.palacheva@mail.ru

³Dr, cheverikin80@rambler.ru

⁴Dr, pozdniakov@misis.ru

⁵Prof, bala@nf.jinr.ru

⁶Dr, bobrikov@nf.jinr.ru

⁷Prof, jean-georges.gasser@univ-lorraine.fr

⁸MSc student, paul.tabary@etu.emse.fr

⁹MSc student, theo.mounier0205@gmail.com

¹⁰Prof, i.golovin@misis.ru

^{1,2,3,4,8,9,10}National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia

¹Benha University, Shoubra Faculty of Engineering, Cairo, Egypt

^{5,6}Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁵Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

⁷Université de Lorraine. Laboratoire de Chimie et Physique, France

⁸Ecole des Mines de Saint-Etienne, 158 cours Fauriel, F-42023 Saint-Etienne, Cedex 2, France

⁹ENISE (Ecole Nationale d’Ingénieurs de Saint-Etienne), Cedex 2, France

Keywords: Neutron diffraction; Fe-Ga ; Phase transition; internal friction; activation energy; phase characterization; In situ resistivity measurement.

One of the reasons for the promise of Magnetostrictive materials in a host of applications is the development of a new class of structural magnetostrictive materials. Iron–gallium alloys (galfenol) exhibit moderate magnetostriction (~ 350 ppm) under very low magnetic fields 100 Oe (8000 A.m^{-1}), have very low hysteresis, and demonstrate high tensile strength (500 MPa) and limited variation in magnetomechanical properties for temperatures between -20 and 80°C [1]. They have a high Curie temperature [1] and are corrosion resistant [2] and biodegradable [3]. The raw materials used to produce FeGa alloys are relatively inexpensive [2].

Several research techniques were used to study structure and phase transitions at heating and cooling of three Fe-Ga alloys with 25, 27 and 33 at.% Ga. Structure of these alloys in the as cast state and after different annealing regimes were characterized by XRD, SEM, MFM, HV and low-temperature heat capacity. Using high resolution neutron diffraction, it is proved that initial state of the as cast samples has the high temperature BCC-derivative D0_3 phase which is metastable at room temperature. Heating of the as cast samples and their subsequent cooling lead to a cascade of phase transitions changing sample's structure, mechanical and physical properties including damping capacity. The phase transitions were characterized by in situ neutron diffraction, internal friction, resistivity, vibrating sample magnetometry, dilatometry, and differential scanning calorimetry. Activation energy and relaxation time were calculated for thermally-activated relaxation peaks. Transition from metastable D0_3 to stable L1_2 phase at heating or isothermal annealing leads to significant changes in macro (grain size) and micro (atomic ordering) structure, hardness and magnetic properties (magnetostriction, magnetization and internal friction). According to our structural studies ND which shown in the following figure, composition Fe-25.5 at.% Ga below $\sim 600^\circ\text{C}$ belongs to a single phase (L1_2) range in contrast with existing equilibrium phase diagrams.

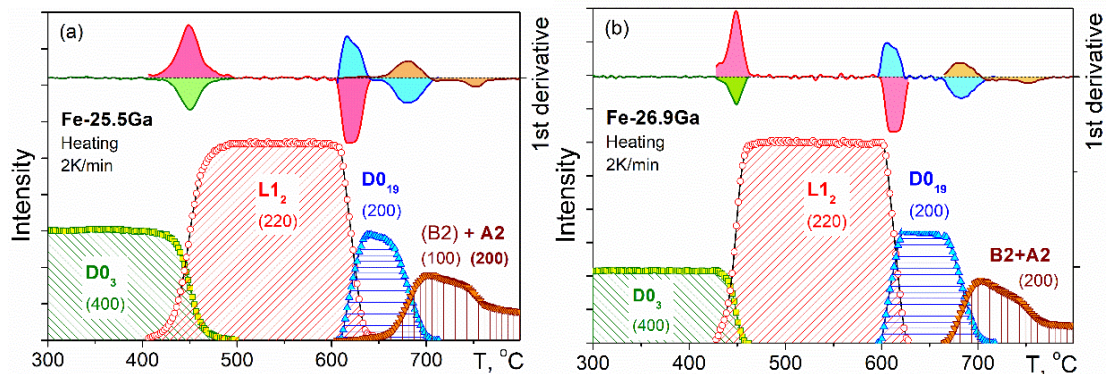


Figure. Temperature dependences of the intensities of fundamental diffraction peaks and their first derivatives (transformation rate, right upper Y-axis) of different phases during the transition from the initial (D0_3 phase at RT) to the final (A2 phase above 750°C) state of the alloy Fe-25.5Ga (a), and of the alloy Fe-26.9Ga as well (b) during heating

The work was carried out with support from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in the framework of Increase Competitiveness Program of NUST “MISIS”, implemented by a governmental decree dated 16th of March 2013, No 211 and RNF project no. 19-72-20080.

References

1. R.A. Kellogg, Development and modeling of iron–gallium alloys, PhD Thesis Engineering Mechanics, Iowa State University, Ames, Iowa, 2003.
2. T.V. Jayaraman, N. Srisukhumbowornchai, S. Guruswamy, M.L. Free, Corrosion studies of single crystals of iron–gallium alloys in aqueous environments, *Corros. Sci.* 49 (2007) 4015–4027. doi:10.1016/j.corsci.2007.05.010.

3. H. Wang, Y. Zheng, J. Liu, C. Jiang, Y. Li, In vitro corrosion properties and cytocompatibility of Fe-Ga alloys as potential biodegradable metallic materials, Mater. Sci. Eng. C. 71 (2017) 60–66. doi:10.1016/j.msec.2016.09.086.

УДК 678.5.046

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ТРЕНИЕ СТЕКЛОУГЛЕПЛАСТИКОВ С МАТРИЦЕЙ Т-107

Ю.Е. Калинин¹, О.А. Караева², А.М. Кудрин³, О.В. Овдак⁴, М.А. Каширин⁵

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, kalinin48@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

²Ведущий инженер-исследователь, karaeva@rusaviainter.com

³Канд. физ.-мат. наук, директор по науке, kudrin@rusaviainter.com

ЗАО «Русавиаинтер»

⁴Аспирант, ovovdak@mail.ru

⁵Младший научный сотрудник, mnitro@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Представлены результаты исследования температурных и амплитудных зависимостей внутреннего трения (ВТ) гибридных композитов из углеродных однонаправленных волокон и стеклянных тканей в эпоксидной расплавной матрице Т-107. По высокотемпературному участку фона внутреннего трения с учетом низкотемпературного участка фона была сделана оценка энергии миграции и образования вакансиоподобного дефекта аморфной матрицы исследуемых стеклоуглепластиков.

Ключевые слова: углепластик, стеклопластик, эпоксидная матрица, внутреннее трение.

Цель работы заключалась в исследовании высокотемпературной зависимости внутреннего трения гибридного полимерного композиционного материала (ПКМ) на основе угле- и стекловолокон с разным процентным соотношением компонентов в матрице расплавленного эпоксидного связующего марки Т-107, состав которого разработан химическим факультетом МГУ [1]. В качестве армирующего наполнителя использовались однонаправленная лента с углеродным волокном Formosa TC-35 (12К) ($\sigma_B=4000$ МПа, $E=240$ ГПа) [2] и стеклоткань Т-10-14 [3]. Препреги на основе угле- и стеклонаполнителей и связующего Т-107 были получены методом Hot-melt с помощью технологического комплекса пропитки COS.T.A. [4]. На рис. 1а представлены температурные зависимости внутреннего трения стеклоуглепластиков в матрице Т-107 с различным содержанием углеродных и стеклянных волокон. При комнатной температуре величина внутреннего трения практически не отличается и составляет $Q^{-1} \sim 5 \cdot 10^{-3}$. Повышение температуры до $T \sim 450$ К сопровождается незначительным ростом, который сменяется экспоненциальным ростом ВТ. При приближении к температуре стеклования ($T = 458$ К) величина Q^{-1} еще больше возрастает.

Наблюдаемые экспериментальные результаты при температурах, близких к температуре стеклования, показывают, что ВТ заметно возрастает и этот рост связан с полимерной матрицей, а не с материалом наполнителя. Такой рост обычно называют высокотемпературным фоном ВТ и он описывается экспоненциальной зависимостью от обратной температуры [5]. На рис. 1б представлена зависимость натурального логарифма ВТ от обратной температуры для стеклоуглепластика, углепластика и стеклопластика с матрицей Т-107. Как видно из рис. 1 б, в области высокотемпературного фона на зависимостях $\ln Q^{-1} \sim (1/T)$ наблюдаются два прямолинейных участка (до температуры стеклования и после температуры стеклования).

Проведенный анализ показал, что, аппроксимируя полученные зависимости внутреннего трения до температуры стеклования, можно оценить энергию активации миграции дефектов для матрицы исследуемого композита по тангенсу угла наклона зависимости $\ln Q^{-1} \sim (1/T)$.

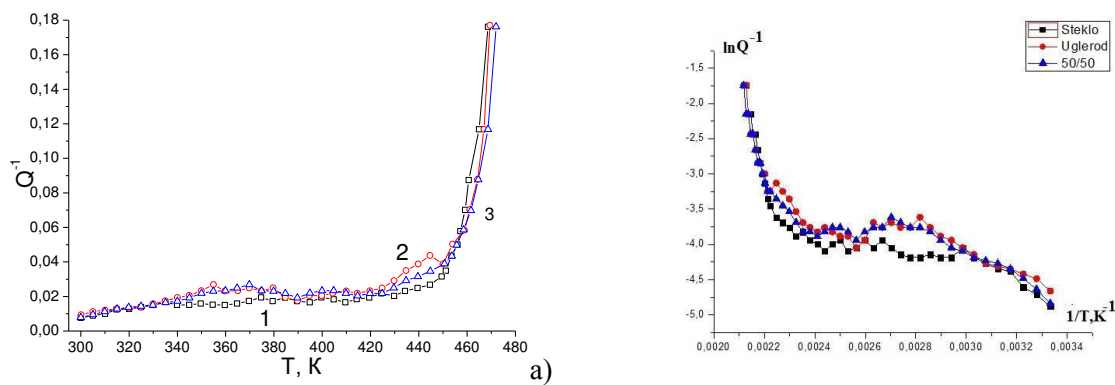


Рисунок. Температурные зависимости внутреннего трения для стеклопластика (1), углепластика (2) и стеклоуглепластика (3) с матрицей Т-107 в координатах $Q^{-1} \sim T$ (а) и $\ln Q^{-1} \sim (1/T)$ (б)

Оценки показали, что значение энергии активации миграции точечного дефекта матрицы, которая оказалась равной $E_m = 0,70 \pm 0,05$ эВ, а энергия образования вакансиоподобного дефекта аморфной матрицы исследуемых стеклоуглепластиков равной $E_v = 0,66 \pm 0,05$ эВ. Полученное значение энергии образования вакансиоподобного дефекта аморфной матрицы в пределах погрешности совпадает со значением энергии миграции.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках проектной части государственного задания (проект № 3.1867.2017/4.6).

Литература

1. Т-107 Институт новых углеродных материалов и технологий. 2015. URL: <http://www.inumit.ru/img/file/t107.pdf>.
2. URL: http://www.fpc.com.tw/fpcwuploads/pdocument/pdocument_141202152439.pdf.
3. ГОСТ 19170-2001. Стекловолокно. Ткань конструкционного назначения. Технические условия. – Взамен ГОСТ 19170-70; введ. 2002-01-10. – Минск: Межгос. Совет по стандартизации, метрологии и сертификации; Москва: Изд-во стандартов, 2002.– 16 с.
4. Овдак О.В., Калинин Ю.Е., Кудрин А.М., Караева О.А., Дегтярев Д.Я. Влияние армирующего наполнителя на механические свойства стеклоуглепластика в матрице Т-107 // Материаловедение, 2017, № 7, с.
5. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в твердых телах. – М.: Атомиздат, 1975. – 472 с.

УДК 532.13

О ПРИРОДЕ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ

Р.А. Кончаков¹, А.С. Макаров², Ю.П. Митрофанов³, В.А. Хоник⁴, Н.П. Кобелев⁵

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, konchakov@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, a.s.makarov.vrn@gmail.com

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, mitrofanovyup@gmail.com

⁴Д-р физ.-мат. наук, профессор, v.a.khonik@vspu.ac.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет»

⁵Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, kobelev@issp.ac.ru

ФГБУН «Институт физики твердого тела Российской академии наук»

В данной работе на основе межузельной теории получено соотношение для описания температурной кинетики высокочастотного внутреннего трения в металлических стеклах. Выполнена его экспериментальная проверка.

Ключевые слова: металлические стекла, внутреннее трение, дефекты.

Внутреннее трение в металлических стеклах (МС) очень чувствительно к локальным атомным перестройкам, поэтому его изучение представляется чрезвычайно важным для понимания релаксационных процессов МС. Согласно современным представлениям, структура МС представляет собой единообразную по своим характеристикам аморфную матрицу, в которой имеются локальные нарушения – структурные дефекты, которые и определяют кинетику структурной релаксации. Одним из наиболее перспективных представлений о природе этих дефектов является межузельная теория [1]. Согласно этой теории, приращение внутренней энергии U аморфного тела при изменении относительной концентрации c дефектов межузельного типа описывается выражением

$$dU = \alpha G \Omega_0 dc, \quad (1)$$

где G – модуль сдвига, Ω_0 – атомный объем, α – параметр, характеризующий поле упругих напряжений дефекта. Величина G связана с их концентрацией:

$$G = \mu \exp(-\alpha \beta c), \quad (2)$$

где μ – модуль сдвига бездефектного материала, а β – сдвиговая восприимчивость (характеризует ангармонизм вещества, т.к. $\beta = -3\gamma_4 / \mu$, где γ_4 – модуль сдвига четвертого порядка [2]).

Пусть ε_0 – средняя локальная деформация, создаваемая дефектом, N_0 – число дефектов на единицу объема, Ω_{event} – объем, охватываемый элементарной перестройкой, а V_{act} – активационный объем. Тогда внутреннее трение можно записать в виде

$$Q^{-1} = \varepsilon_0 N_0 \Omega_{event} \frac{V_{act} G}{k_B T} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (3)$$

где $\tau = \tau_0 \exp(\alpha G \Omega / k_B T)$, Ω – объем, приходящийся на атом. Ранее подобное выражение было получено в рамках модели симметричного двухъямного потенциала [3]:

$$Q^{-1} = a_1 \frac{G}{T} \frac{\omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (4)$$

где параметр a_1 зависит от числа релаксационных центров (дефектов).

На рисунке представлены экспериментальная кривая температурной зависимости внутреннего трения в релаксированном стекле $\text{Pd}_{43.2}\text{Cu}_{28}\text{Ni}_{8.8}\text{P}_{20}$ и результаты расчета по формуле (4), используя экспериментальные данные по релаксации модуля сдвига. Детали методики эксперимента описаны в работе [4]. Из рисунка видно, что расчет и эксперимент отлично согласуются между собой.

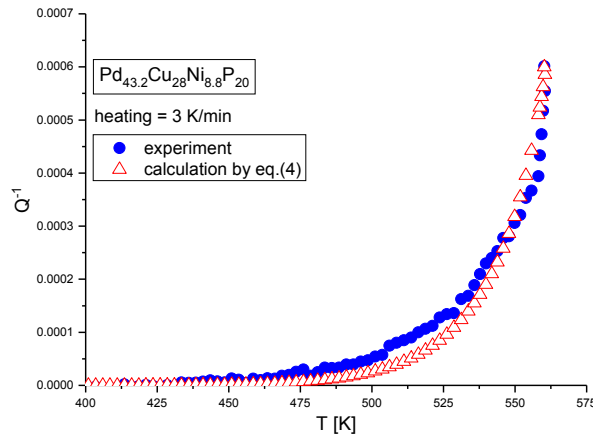


Рисунок. Расчетная и экспериментальная температурная зависимость внутреннего трения в стекле $\text{Pd}_{43.2}\text{Cu}_{28}\text{Ni}_{8.8}\text{P}_{20}$

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (задание 3.1310.2017/4.6).

Литература

1. Granato A.V. Interstitialcy model for condensed matter states of face-centered-cubic metals / A.V. Granato // *Physical Review Letters*. – 1992. – V. 68. – P. 974–977.
2. Konchakov R. A. Estimate of the fourth-rank shear modulus in metallic glasses / R.A. Konchakov, A.S. Makarov, G.V. Afonin, Yu.P. Mitrofanov, N.P. Kobelev, V.A. Khonik // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – V. 714. – P. 168–171.
3. Bobrov O.P. Experimental evidence of Snoek-like relaxation in annealed metallic glass / O.P. Bobrov, Yu.V. Fursova, V.A. Khonik // *Materials Science and Engineering A*. – 2004. – V. 370. – P. 341–345.
4. Mitrofanov Y.P. Towards understanding of heat effects in metallic glasses on the basis of macroscopic shear elasticity / Y.P. Mitrofanov, D.P. Wang, A.S. Makarov, W.H. Wang, V.A. Khonik // *Scientific Reports*. – 2016. – V. 6. – P. 23026-1–23026-6.

UDC 620.187

EFFECT OF SPINODAL DECOMPOSITION ON REVERSIBLE MARTENSITIC TRANSFORMATION IN Mn-15Cu AND Mn-12Cu-3Cr ALLOYS

Liyang Sun¹, A.Kh. Islamov², Weimin Guo³, J. Cifre⁴, M.Y. Zadorozhnyy⁵, I.S. Golovin⁶

¹ PhD student, liyang.sun@mail.ru

² Dr, islamov@nf.jinr.ru

³ Dr, weimin.guo@hotmail.com

⁴ Dr, joan.cifre@uib.es

⁵ Dr, priboy38@mail.ru

⁶ Prof. i.golovin@misis.ru

^{1,5,6}National University of Science and Technology “MISIS”, Moscow, Russia

²Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

³Key Laboratory of Applied Technology of Sophisticated Analytical Instruments, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), 19# Keyuan Road, Jinan 250014, China

⁴Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, Spain

Effect of spinodal decomposition on structure and reversible f.c.c. ↔ f.c.t. martensitic transformation in as-quenched Mn-15Cu and Mn-12Cu-3Cr alloys is investigated after different ageing treatment. According to the small angle neutron scattering, degree of spinodal decomposition in Mn-15Cu samples aged for 8 h at 480 °C is maximal, whereas for samples aged at 440 °C, degree of spinodal decomposition increases by increasing ageing time up to 120 hrs in agreement with DSC and internal friction results.

Keywords: Mn-Cu alloys, spinodal decomposition, martensitic transformation, damping capacity, SANS.

Mn-Cu alloys are well-known materials with a remarkable damping capacity, shape memory effect and good mechanical properties [1-3]. Functional properties of Mn-Cu alloys are based on the f.c.c. ↔ f.c.t. thermoelastic martensitic transformation (TEMT) [4, 5]. Martensitic transformation in Mn-Cu alloys leads to a lattice structure change from the face centred cubic (f.c.c.) parent phase to the face centred tetragonal (f.c.t. with $c/a < 1$) martensite phase [6-8]. Mn-Cu alloys have a small transformation thermal hysteresis and phase transformation temperature is strongly affected by Mn content and heat treatment [9].

The structure of studied as-quenched from 850 °C alloys is f.c.c., f.c.t. phases and α -Mn, while an ageing treatment leads to a change in the volume fraction of co-existing phases and in the transition temperatures. The heat flow (DSC) and internal friction (IF) results show that the temperatures of the direct and reverse MT in Mn-12Cu-3Cr alloy approximately linearly increase by increasing ageing temperature from 400 °C to 520 °C at ageing time for 8 h. After ageing at 440 °C from 1 to 8 h, temperatures of MT of as-quenched samples sharply in-

crease, further long-term ageing leads to a slower increase. During MT, softening of elastic modulus is observed. Quenched Mn-12Cu-3Cr samples after ageing at 440 °C for 5 h have enhanced amplitude dependent IF. According to the small angle neutron scattering (SANS), the degree of spinodal decomposition in the Mn-15Cu samples aged for 8 h at 480 °C is maximal, whereas in the case of samples aged at 440 °C, the degree of spinodal decomposition increases by increasing ageing time in agreement with DSC and IF results. Variations in temperatures of direct and reverse MT due to ageing of the studied alloys are explained by spinodal decomposition of Mn-Cu solution and formation of zones enriched by Mn. Ageing temperature and time, i.e. decomposition of the solid solution, have also a pronounced effect on the samples hardness.

References

1. Q.C. Tian, F. Yin, T. Sakaguchi, K. Nagai, Reverse transformation behavior of a prestrained MnCu alloy, *Acta Mater.* 54 (2006) 1805-1813.
2. G. Markova, E. Klyueva, Martensitic anelasticity in 40Mn60Cu alloy, *Mater. Today* 4 (2017) 4722-4726.
3. J.Z. Yan, N. Li, F. Xu, Y. Zhang, The strengthening effect of spinodal decomposition and twinning structure in MnCu-based alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 618 (2014) 205-209.
4. Q.C. Tian, F.X. Yin, S. Takuya, K. Nagai, Internal friction behavior of twin boundaries in tensile-deformed Mn-15 at.% Cu alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 442 (2006) 433-438.
5. G.V. Markova, D.M. Levin, S.E. Kazharskaya, E.S. Klyueva, G.M. Tateladze, E.A. Bannikova, I.K. Popovichenko, The Effect of Spinodal Decomposition on Martensitic Transformation and Shape Memory Effect in Mn-Cu Alloys, *Mater. Today* 2S (2015) S841 - S844.
6. W. Liu, N. Li, Z. Zhong, J. Yan, D. Li, Y. Liu, X. Zhao, S. Shi, Novel cast-aged MnCuNi-FeZnAl alloy with good damping capacity and high usage temperature toward engineering application, *Mater. Design* 106 (2016) 45-50.
7. Z.Y. Zhong, W.B. Liu, N. Li, J.Z. Yan, J.W. Xie, D. Li, Y. Liu, X.C. Zhao, S.Q. Shi, Mn segregation dependence of damping capacity of as-cast M2052 alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 660 (2016) 97-101.
8. Y. Zhong, T. Sakaguchi, F.X. Yin, Effects of transformation twin on Hall-Petch relationship in MnCu alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 492 (2008) 419-427.
9. K. Tsuchiya, H. Sato, S. Edo, K. Marukawa, M. Umemoto, Effect of aging on martensitic transformation in γ -MnCu alloy, *Mater. Sci. Eng. A* 285 (2000) 353-356.

UDC 620.187

STUDY OF MARTENSITIC TRANSITION IN Fe-Mn BASED ALLOYS

Liying Sun¹, W.C. Cheng², A.M. Balagurov³, I.A. Bobrikov⁴, J. Cifre⁵,
I.B. Chudakov⁶, V.V. Cheverikin⁷, M.Y. Zadorozhnyy⁸, I.S. Golovin⁹

¹ PhD student, liying.sun@mail.ru

² Prof, weicheng@mail.ntust.edu.tw

³ Prof, bala@nf.jinr.ru

⁴ Dr, bobrikov@nf.jinr.ru

⁵ Dr, joan.cifre@uib.es

⁶ Dr, i-chudakov@yandex.ru

⁷ Dr, mcm@misis.ru

⁸ Dr, priboy38@mail.ru

⁹ Prof. i.golovin@misis.ru

^{1,7,8,9} National University of Science and Technology "MISIS", Moscow, Russia

² Department of Mechanical Engineering, NTUST, Taipei, Taiwan, ROC

^{3,4} Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁵ Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca, Spain

⁶ I.P. Bardin Central Research Institute for Ferrous Metallurgy, Moscow, Russia

The microstructural changes, volume fraction of co-existent phases, microstrains and internal friction of Fe-16Mn-8Cr-2Cr, Fe-22Mn-3Si and Fe-26Mn-4Si (wt.%) alloys have been investigated.

From *in situ* neutron diffraction tests, we found that microstrains are isotropic in the γ -austenite in the samples, whereas microstrains in the ϵ -martensite are apparently higher and strongly anisotropic. During thermal cycling, the internal friction and DSC peak of Fe-Mn based alloys for the direct martensitic transformation shifts in the direction of a lower temperature, for the reverse martensitic transformation shifts to a higher temperature, enhancing the thermal hysteresis ΔT .

Keywords: Fe-Mn based alloys, martensitic transformation, microstructure, *in situ* neutron diffraction, internal friction.

The Fe-Mn based alloys are known as materials with an excellent combination of high strength, high ductility, and enhanced damping capacity [1-4]. They have been extensively investigated in recent years, and have even been given a special name HIDAS (high damping steels) [5].

After thermal cycling between room temperature and 350 °C with a 10 min holding time at high temperature over the phase transformation, volume fraction of ϵ -martensite in the annealed Fe-26Mn-4Si samples increases, while volume fraction of ϵ -martensite in the cold rolled samples decreases. These results explain the changes in the hardness with thermal cycling by increasing the ratio ϵ/γ in the annealed samples and by decreasing the ratio ϵ/γ in the cold rolled samples. *In situ* neutron diffraction tests reveal that microstrains are isotropic in the γ -austenite in the samples, whereas microstrains in the ϵ -martensite are pronouncedly higher and strongly anisotropic. During thermal cycling, the internal friction and DSC peak of Fe-22Mn-3Si alloy for the direct martensitic transformation shifts in the direction of a lower temperature, for the reverse martensitic transformation shifts to a higher temperature, enhancing the thermal hysteresis ΔT (Fig. 1). The transmission electron microscope and neutron diffraction results demonstrate that lattice defects accumulation in the γ -austenite and ϵ -martensite phases due to the volume difference of the transformed phases. They explain corresponding increase in the martensitic transformation hysteresis. Transient peaks height of the Fe-16Mn-8Cr-2Cr alloy (Q_{Tr}^I) are dependent on a function $K(\dot{T}/f \times \epsilon_0)$ ($Q_{Tr}^I = 3,5 \times 10^{-4} \dot{T}$; $Q_{Tr}^I = 7,5 \times 10^{-4} f^{-1} + 7,3 \times 10^{-3}$; $Q_{Tr}^I = 4,1 \times 10^{-7} \epsilon_0^{-1} + 0,01$) during heating for reverse martensitic transformation in accordance with the Wang model. On contrast to Ni-Ti and Mn-Cu alloys, the elastic softening does not take place during martensitic transformation in Fe-Mn based alloys.

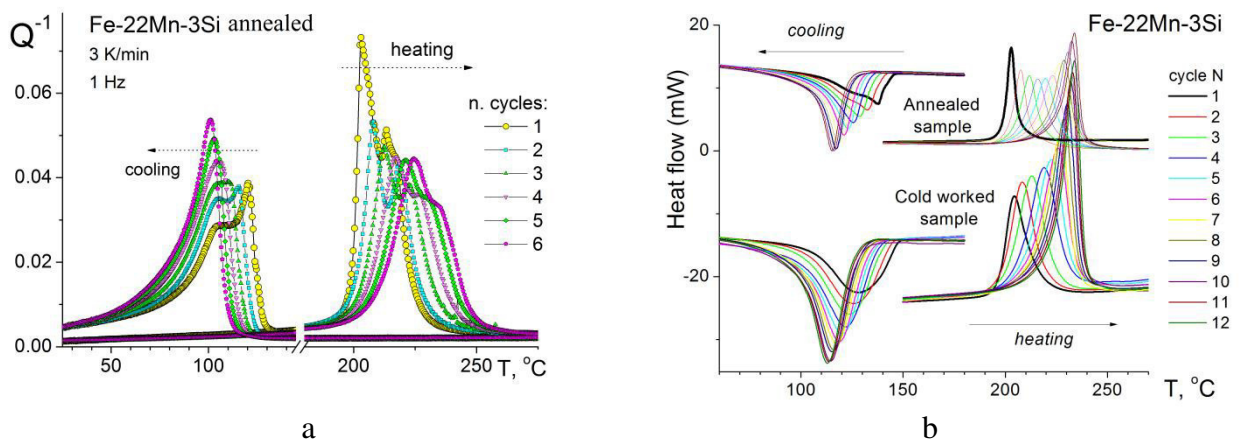


Figure. Effect of thermocycling between 0-350°C on the position and the shape of (a) the internal friction peaks ($f = 1$ Hz, $\epsilon_0 = 3.6 \times 10^{-5}$, $T = 3$ K/min, n is cycle number); and (b) the DSC peaks during martensitic transition in Fe-22Mn-3Si alloy

References

1. X. Li, L. Chen, Y. Zhao, X. Yuan, R.D. Kumar Misra, Influence of original austenite grain size on tensile properties of a high-manganese transformation-induced plasticity (TRIP) steel, Mater. Sci. Eng. A 715 (2018) 257-265.
2. K. Li, B. Yu, R.D.K. Misra, G. Han, Y.T. Tsai, C.W. Shao, C.J. Shang, J.R. Yang, Z.F. Zhang, Strain rate dependence on the evolution of microstructure and deformation mechanism during nanoscale deformation in low carbon-high Mn TWIP steel, Mater. Sci. Eng. A 742 (2019) 116-123.
3. S. Sevse, F. Brasche, C. Haase, W. Bleck, Combined deformation twinning and short-range ordering causes serrated flow in high-manganese steels, Mater. Sci. Eng. A 746 (2019) 434-442.
4. B.C. De Cooman, Y. Estrin, S.K. Kim, Twinning-induced plasticity (TWIP) steels, Acta Mater. 142 (2018) 283-362.
5. N. Igata, Applications for high damping stainless alloys (HIDAS), Key Eng. Mat. 319 (2006) 209-216.

УДК 539.385

СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБРАЗЦОВ ИЗ БЫСТРООХЛАЖДЕННЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АІ, КОНСОЛИДИРОВАННЫХ МЕТОДОМ КРУЧЕНИЯ ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ

А.И. Лимановский¹, В.Н. Саяпин², В.М. Ткаченко³, Т.В. Цветков⁴, Е.А. Свиридова⁵,
В.И. Парфений⁶, С.В. Васильев⁷, С.В. Терехов⁸, В.И. Ткач⁹

¹Канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., alexlim@i.ua

²Вед. инженер, den_syaopin@mail.ru

³Канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., vfti@mail.ua

⁴Вед. инженер, chuguevskiyv@rambler.ru

⁵Мл. научн. сотр., kasv@i.ua

⁶Аспирант, valerii.parfenii@gmail.com

⁷Канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., vasils75@gmail.com

⁸Д-р физ.-мат. наук, вед. научн. сотр., svlter@yandex.ru

⁹Д-р физ.-мат. наук, гл. научн. сотр., stalker_1345@mail.ru

ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк
ГО ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка

В работе представлены результаты экспериментов по консолидации методом кручения под давлением пакетов из быстроохлажденных чешуек сплава $Al_{95.3}Cr_{2.7}Zr_{0.7}Mo_{1.3}$ с кристаллической структурой и аморфных лент сплава $Al_{87}Ni_8Gd_5$. Установлены критические величины деформации, необходимые для получения консолидированных образцов и исследовано влияние давления и деформации на их структуру и механические свойства.

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, неравновесные структуры, консолидация, кручение под высоким давлением.

Сплавы на основе Al с аморфной и нанокompозитной структурами представляют большой практический интерес, благодаря высокому уровню предела прочности, значения которого достигают 1,0 и 1,56 ГПа соответственно [1]. Однако, вследствие низкой склонности к аморфизации расплавов Al для получения объемных образцов с неравновесными структурами необходима консолидация быстроохлажденных дисперсных продуктов закалки.

Объектами исследования в работе были полученные закалкой из расплава ленты сплава $Al_{87}Ni_8Gd_5$ шириной 10 мм и толщиной 66 ± 8 мкм чешушки сплава $Al_{95.3}Cr_{2.7}Zr_{0.7}Mo_{1.3}$ длиной несколько сантиметров и толщиной 45 ± 2 мкм. В исходном состоянии ленты сплава $Al_{87}Ni_8Gd_5$ имели аморфную структуру, а дифрактограммы чешуек содержали преимущественно линии твердого раствора на основе Al (рис. 1 а,б). Эксперименты по консолидации лент проводили методом кручения под высоким давлением (КВД) [2] между двумя пуансонами (наковальнями Бриджмена) в форме усе-

ченных конусов с плоскими поверхностями диаметром 5 мм. Обработка производилась при комнатной температуре при приложенном давлении 2 ГПа со скоростью вращения нижнего подвижного пуансона 1 об/мин. Величина истинной деформации кручения рассчитывалась по соотношению [2] $\gamma = \vartheta r / l$, где ϑ – угол поворота (в радианах), r – расстояние от центра образца, а l – толщина деформированного образца.

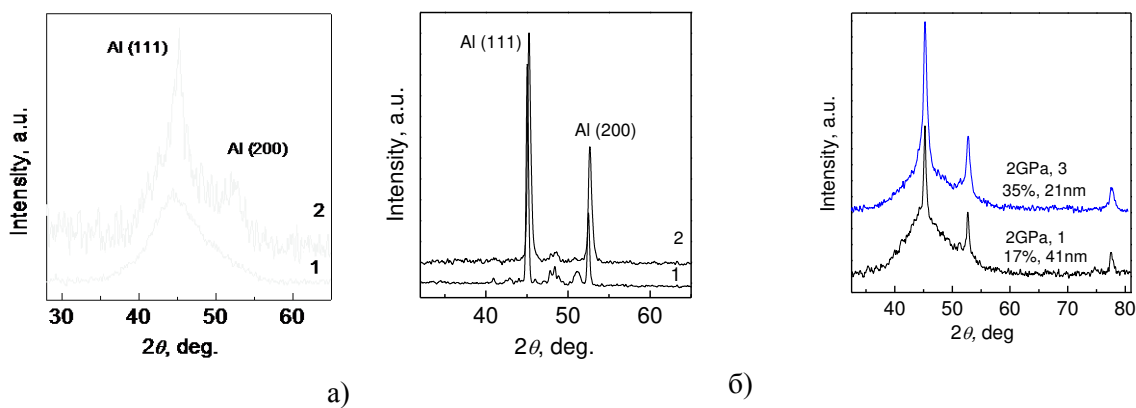


Рисунок. Дифрактограммы: (а) быстроохлажденных лент сплавов $Al_{87}Ni_8Gd_5$, (б) чешуек сплава $Al_{95.3}Cr_{2.7}Zr_{0.7}Mo_{1.3}$ (б) в исходном состоянии (1) и консолидированных дисков после деформации (2); (в) трехслойных пакетов «лента-чешуйка-лента»

Эксперименты по консолидации двухслойных пакетов из лент и чешуек и трехслойных «лента-чешуйка-лента» показали, что

- деформация лент сплава $AlNiGd$ приводит к частичной нанокристаллизации аморфной матрицы – формированию нанокристаллов Al со средним размером 13 nm и объемной долей 21% (рис. 1а);

- деформация лент сплава $AlCrZrMo$ приводит к существенному уменьшению областей когерентного рассеяния (от 128 до 44 nm) и уменьшению степени насыщенности твердого раствора (рис. 1б);

- в трехслойных пакетах формируется нанокompозитная структура средний размер нанокристаллов Al, в которой уменьшается, а доля растет по мере увеличения степени деформации (рис. 1в);

- оцененные по макроструктуре поперечных сечений дисков критические значения деформаций по использованным в работе режимам КВД, необходимые для консолидации аморфных лент сплава $AlNiGd$ и кристаллических чешуек сплава $AlCrZrMo$, составляют 52.6 и 25.6 соответственно;

- микротвердости, измеренные вдоль диаметров деформированных дисков, возрастают от центра к периферии и достигают значений 3.34 и 2.1 ГПа в сплавах $AlNiGd$ и $AlCrZrMo$ соответственно, что на 31.4 и 60% выше значений H_u исходных недеформированных образцов;

- максимальные значения микротвердости поверхностных слоев трехслойных пакетов возрастают от 3,1 до 4,1 ГПа по мере увеличения максимальной деформации от 218 до 720.

Литература

1. Louzguine D.V. Full or partial replacement of Y by rare-earth and some other elements in the $Al_{85}Y_8Ni_5Co_2$ alloy / D.V. Louzguine, A. Inoue // J. Light Metals. – 2001. – V. 1. – P. 105–109.
2. Valiev R.Z. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation / R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov // Progr. Mater. Sci. – 2000. – V. 45. – P. 103–189.

ВЛИЯНИЕ СОСТАВА НА НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ХАРАКТЕР ЗАРОЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СТЕКЛАХ

С.В. Васильев¹, В.И. Парфений², Е.А. Свиридова³, В.И. Ткач⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., vasil75@gmail.com

²Аспирант, valerii.parfenii@gmail.com

³Мл. научн. сотр., kasv@i.ua

⁴Д-р физ.-мат. наук, гл. научн. сотр., stalker_1345@mail.ru

ГУ «Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина», Донецк

ГО ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Макеевка

Проведен анализ изотермической кристаллизации металлических стекол FeNiPВ и FeCoPВ и определены температурные зависимости характерных времен кристаллизации. Установлен нестационарный характер зарождения в исследованных сплавах и его влияние на термическую устойчивость аморфного состояния.

Ключевые слова: металлические стекла, кристаллизация, нестационарность, термическая устойчивость.

Факторы, определяющие термическую устойчивость (ТУ) структуры металлических стекол (МС), представляют не только практический интерес в связи с широким использованием, но и важны с фундаментальной точки зрения для понимания и контроля процессов кристаллизации. Наиболее перспективным путем для решения этой задачи представляется анализ экспериментальных данных в рамках адекватных теоретических моделей. Очевидно, что ТУ аморфных фаз определяется скоростями зарождения и роста кристаллов, исследованиям которых посвящено большое число работ, однако практически не изученным является влияние нестационарности скорости зарождения.

В работе приведены результаты анализа кинетики изотермической кристаллизации трех МС Fe₄₀Ni₄₀P₁₄B₆, Fe₄₀Co₄₀P₁₄B₆ и Fe₄₈Co₃₂P₁₄B₆ [1] с высоким уровнем магнитно-мягких свойств. Представление зависимостей $X(t)$ в координатах Аврами дало значения показателя Аврами $n > 4$ (рис. 1а), что указывает на нестационарный характер зарождения. Анализ нестационарности был проведен в рамках аналитического уравнения кинетики кристаллизации [2], представляющего собой комбинацию интегральной формы кинетического уравнения Колмогорова [3] и модели нестационарного зарождения Кэшиева [4]

$$X_{\text{ext}}(t) = \frac{\pi}{3} J_{\text{st}} U^3 \tau_{\text{ns}}^4 \left[\left(\frac{t}{\tau_{\text{ns}}} \right)^4 - \frac{2\pi^2 (t/\tau_{\text{ns}})^3}{3} + \frac{7\pi^4 (t/\tau_{\text{ns}})^2}{30} - \frac{31\pi^6 (t/\tau_{\text{ns}})}{630} + \Sigma \right], \quad (1)$$

где $\Sigma = 48 \left[\frac{127\pi^8}{1209600} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^8} \exp\left(-m^2 \frac{t}{\tau_{\text{ns}}}\right) \right]$. Здесь: X_{ext} – расширенный объем, J_{st} –

стационарная скорость зарождения, U – скорость роста, а τ_{ns} – время нестационарности, характеризующее приближение скорости зарождения к стационарному значению. Объ-

единя величины J_{st} и U в единый параметр $\tau_c = \left[(\pi/3) J_{\text{st}} U^3 \right]^{-1/4}$ – характеристическое время кристаллизации, получаем, что в кинетическом уравнении (1) остаются два свободных параметра τ_c и τ_{ns} .

Анализ показал, что уравнение (1) корректно описывает кинетические кривые кристаллизации исследованных стекол и по результатам подгонки расчетных и экспериментальных данных были оценены значения τ_c и τ_{ns} , температурные зависимости которых аппроксимируются уравнением типа Аррениуса. Построенные по этим данным температурные зависимости параметра нестационарности $Z = \tau_{\text{ns}}/\tau_c$ показанные на рис. 1б, свидетельствуют, что с повышением температуры изотермического отжига степень

нестационарности возрастает в МС $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ в отличие от двух других стекол. Различный характер изменения нестационарности связан с различным соотношением энергий активации времен τ_c и τ_{ns} .

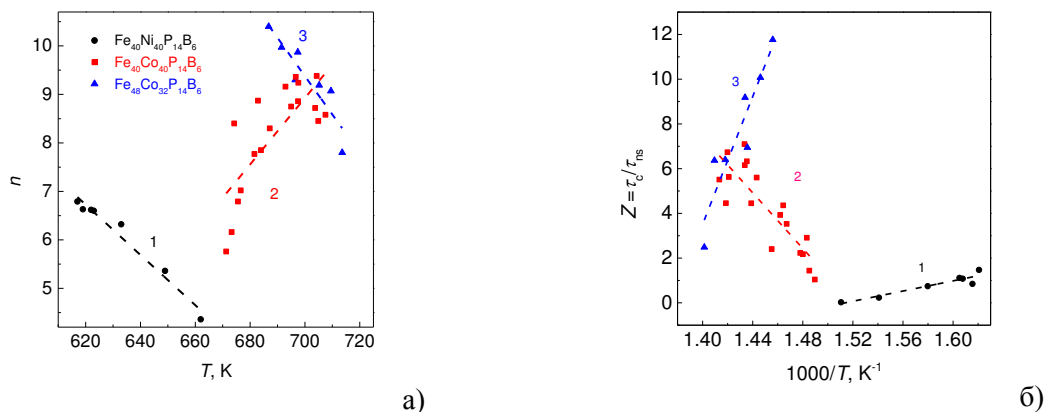


Рисунок. Температурные зависимости параметров (показателя Аврами, n , и отношения времен кристаллизации и нестационарности, Z), характеризующих степень нестационарности скоростей зарождения кристаллов в МС $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (1), $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (2) и $\text{Fe}_{80}\text{Co}_{42}\text{P}_{14}\text{B}_6$ (3)

Проведенный анализ показал, что повышенная ТУ МС $\text{Fe}_{40}\text{Co}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ по сравнению с $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ при повышенных температурах отжига в существенной мере обусловлена различной степенью нестационарности процесса кристаллизации. Обсуждено возможное влияние фиктивных температур стекол на релаксационные процессы, связанные с формированием равновесных распределений докритических зародышей по размерам.

Литература

1. Tkatch V.I. Thermal stability and saturation magnetization of a new series of amorphous $\text{Fe}_{80-x}\text{Co}_x\text{P}_{14}\text{B}_6$ ($20 \leq x < 40$) alloys / V.I. Tkatch, S.G. Rassolov, V.V. Popov, V.Yu. Kameneva, O.A. Petrenko // Mater. Lett. – 2004. – V. 58. – P. 2988-2992.
2. Vasiliev S.V. Analysis of the transient behavior of nucleation in the $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ glass / S.V. Vasiliev, V.I. Tkatch, A.S. Aronin, O.V. Kovalenko, S.G. Rassolov // J. Alloys Compds. – 2018. – V. 744. – P. 141–145.
3. Колмогоров А.Н. К статистической теории кристаллизации металлов / А.Н. Колмогоров // Изв. АН СССР. Сер. матем. – 1937. – № 3. – С. 355–360.
4. Kashchiev D. Solution of the non-steady state problem in nucleation kinetics / D. Kashchiev // Surface Sci. – 1969. – V. 14. – P. 209–220.

III. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

UDK 538.91

SIMULATION OF THE SWITCHING IN THIN FERROELECTRIC FILMS

O. S. Baruzdina¹, O. G. Maksimova², A. V. Maksimov³

¹ Post-graduate student, olgabaruzdina91@mail.ru

² Ph. D., Associate Professor, og62@mail.ru

³ Dr. Sci., Professor, a_v_maximov@mail.ru

Cherepovets State University

In this paper, the results of simulation of the switching in thin ferroelectric films are demonstrated. A study of the effect of boundary conditions is presented. The study was conducted using the Ising model by the Monte Carlo method.

Keywords: hysteresis curve, computer simulation, ferroelectric thin films, Monte Carlo method, depolarizing field, film thickness.

To study the switching in thin ferroelectric films, we used a modified three-dimensional Ising model. It is taken into account that under the influence of an internal electric field caused by spontaneous polarization, free particles move to the outer surfaces of the film and create an additional depolarizing field which depends on the value of the long-range orientation order in the film. The polarization was calculated by the Monte Carlo method.

The hysteresis curves were calculated as a function of the frequency and the amplitude of the field, the temperature and the film thickness. The influence of the depolarizing field on the hysteresis curves for thin ferroelectric films has been investigated. To study this effect, the dependences of the area of the hysteresis curves for different values of film were also calculated. The effect of the depolarizing field weakens with increasing thickness of the film. This effect has a negligible influence for the film thickness of greater than 10 unit cells.

The dependences of the magnitude of the coercive field on the film thickness are presented.

Acknowledgement: The study was supported by the Russian Foundation For Basic Research, Project № 19-32-50032.

УДК 546.882.821.87

ОСОБЕННОСТИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ НА ГРАНИЦАХ ЗЕРЕН КЕРАМИЧЕСКОГО СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-ПОЛУПРОВОДНИКА

Г.С. Григорян¹, А.М. Солодуха²

¹Канд. физ.-мат. наук, ассистент, gri7287@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, asn2@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

Представлены структурные данные, а также результаты исследования в слабых электрических полях методом импедансной спектроскопии релаксационных процессов в области температур ниже и выше сегнетоэлектрического фазового перехода керамического сегнетоэлектрика-полупроводника. Интерпретация результатов и расчет плотности электронных состояний на межзеренных границах проводятся в рамках модели Хейванга.

Ключевые слова: релаксация, импеданс, сегнетоэлектрики-полупроводники, ПТКС, модель Хейванга.

Керамические полупроводниковые материалы со структурой перовскита привлекают внимание исследователей в области производства электронных компонентов в связи с широкими возможностями практического применения этих соединений.

В данной работе исследовали керамические образцы состава $Ba_{0.97}Sr_{0.03}TiO_3$ с добавками ионов La и Ce (0.35 и 0.60 ат. % соответственно), полученные по стандартной твердофазной технологии для позисторов. При соответствующих режимах ионы трехвалентного лантана, внедряясь в решетку перовскита, замещают ионы двухвалентного бария, что приводит к формированию полупроводниковой керамики с электронным типом проводимости. Для четырехвалентного церия возможно изовалентное замещение ионов титана, что вызывает размытие фазового перехода и образование релаксора [1].

Морфологию, фазовый состав и структуру образцов контролировали с помощью методов рентгеновского фазового анализа и растровой электронной микроскопии. Для электрических измерений использовали RLC-метр Wayne Kerr 4270.

Трактовка диэлектрического отклика образцов полупроводниковой сегнетокерамики является непростой задачей, т.к. отражает их сложную структуру. Согласно модели Хейванга [2] вдоль границ зерен сегнетоэлектрика-полупроводника существует двойной барьер Шоттки, который формируется при захвате электронов акцепторными уровнями на межзеренных границах. Это приводит к образованию потенциальных барьеров и обедненных носителями заряда областей, которые дают вклад в емкость образца. Дополнительный емкостной эффект могут давать структурные дефекты, например вакансии ионов бария и кислорода.

На представленном рисунке видно, что смещение размытых максимумов ϵ' и M'' с ростом частоты тестового сигнала происходит в сторону низких температур. Это указывает на присутствие в RC-цепочке, определяющей время релаксации, сопротивления границ зерен, которое резко возрастает в параэлектрической фазе.

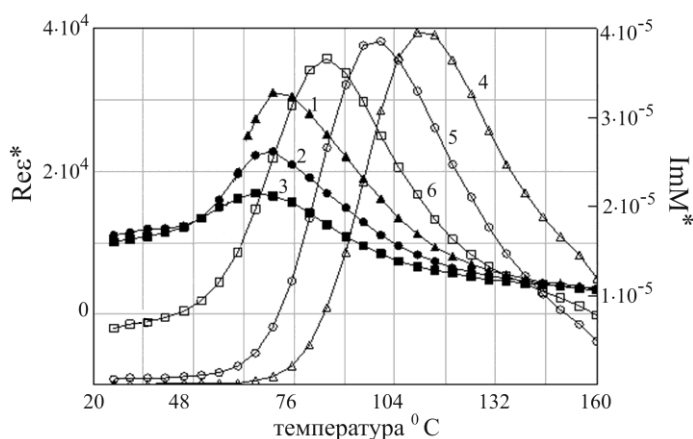


Рисунок. Температурные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости (кривые 1, 2, 3) и мнимой части электрического модуля (кривые 4, 5, 6) образца на различных частотах тестового сигнала: 1 кГц (1, 4), 10 кГц (2, 5), 100 кГц (3, 6)

Учитывая данные структурных и электрических исследований, а также формулы, описывающие диффузионный дрейф носителей заряда через барьер Шоттки [3], можно получить следующую зависимость сопротивления R образца на постоянном токе от температуры T :

$$R(T) = R_0 \exp(e^2 N_e d / 8 \epsilon_0 \epsilon_{gb} kT),$$

где R_0 – константа, e – заряд электрона, N_e – плотность заполненных электронных состояний на границах зерен, d – средний размер зерен керамики, ϵ_0 , ϵ_{gb} – диэлектрическая постоянная и барьерная диэлектрическая проницаемость, k – постоянная Больцмана.

По наклону графика в координатах $\ln R - 1/\epsilon_{gb} T$ рассчитывается величина N_e (в нашем случае она равна $2.94 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-2}$), которая является важным параметром теории. Значения других характеристик получали с помощью компьютерного моделирования.

Литература

1. Tsur Y. Crystal and Defect Chemistry of Rare Earth Cations in BaTiO₃ / Y. Tsur, T.D. Dunbar, C.A.Randall // J. of Electroceram. – 2001. – V. 7. – P. 25–34.
2. Heywang W. Semiconducting Barium Titanate / J. Mater. Sci. – 1971. – V. 6. – P. 1214–1226.
3. Zhang F. Investigation of surface acceptor state density and resistivity jump of ytterbium-doped (Ba, Sr)TiO₃ materials / F. Zhang, Z. Zhang, Q. Mi, Z. Tang, P. Zhu // J. Mater. Sci. – 1999. – V. 34. – P. 5051–5054.

UDC 537.226.83

PHOTOCHROMIC EFFECT IN THE PZT FERROELECTRIC CERAMICS

A.I. Burkhanov¹, Al Walo Walo², S.V. Mednikov³, A.S. Ponomarev⁴

¹D-r Phys.-Math. Sci., professor, burkhanov@inbox.ru

²Master student, alwalowalo@gmail.com

³Cand. Phys.-Mat. Sci., Associate Professor, mednikov17@yahoo.com

⁴Chief of the laboratory, alpo5404@gmail.com

Volgograd State Technical University

The photochromic effect in unpolarized thin ferroelectric ceramics PZT was investigated. The numerical characteristics of the time dependences of the decrease in the optical transmittance during the exposure of the samples to the full spectrum of a fluorescent lamp at room temperature, as well as the numerical characteristics of the time dependences of the restoration of their optical transmittance upon subsequent exposure of the samples under darkened conditions, were obtained. The effect of thermal annealing of the exposed samples on the restoration of their initial light transmittance was studied.

Keywords: photochromic effect, ferroelectrics, piezoelectric ceramics, kinetics of photochrome color change, thermal annealing.

The photochromic effect is understood as a reversible change in the optical properties of a substances (transmission, absorption, reflection, luminescence) induced by electromagnetic radiation [1]. The most attractive type of photochromism is a reversible change in optical light transmittance.

The photochromic effect was studied in samples of the PLZT transparent ferroelectric system [2-3]. In this work, we investigated the reversible change of optical transmittance in thin samples of the PZT (ЦТС-19) standard ferroelectric ceramics, which were previously subjected to prolonged aging under darkened conditions.

Samples with a thickness of 0.3 mm were irradiated with the full spectrum of a Camelion fluorescent lamp (PESL-SF2 11 W / 865 E14). Registration of the light flux passing through the sample was carried out using an SF-4 photo element. Fig. 1A shows the kinetics of a decrease in the relative light transmission of samples $T(t)$, in fig. 1B the kinetics of restoration the initial light transmission $T(t)$ after the end of the exposure is shown.

The kinetics of growth of the photochromic effect is described by the exponential function

$$T(t) = (1 - B_1) \cdot \left(\exp\left(\frac{-t}{\tau_1}\right) \right) + B_1,$$

and the kinetics of light transmission restoration after the end of exposure is described by the exponential function

$$T(t) = (1 - B_2) \cdot \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\tau_2}\right) \right) + B_2.$$

The obtained values of the constants of these exponents are: $\tau_1 = 14.82 \pm 3.24$ min, $B_1 = 0.79 \pm 0.04$, $\tau_2 = 13.10 \pm 1.54$ min, $B_2 = 0.78 \pm 0.03$.

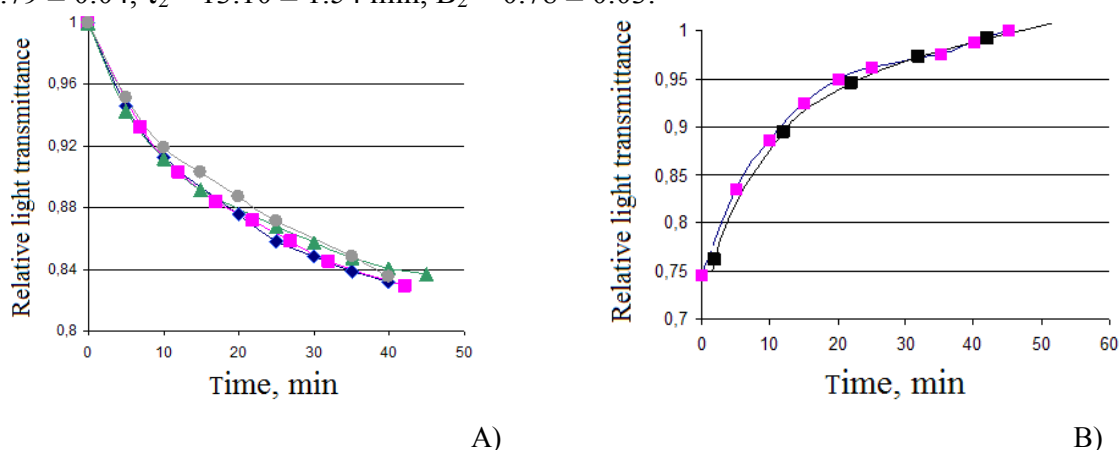


Figure. A. The kinetics of reducing the light transmittance of samples during exposure; B. Kinetics of the restoration of light transmittance of samples after the end of the exposure

In contrast to the results of Caixia Xu *et al* [3], the kinetics of both processes in the PZT-19 ceramics are characterized by the same kinetic parameters of the exponents.

The initial light transmission of the samples is fully restored after they are exposed in air at a temperature of $+55 \pm 3$ °C for 10 minutes. Such small values of both the temperature and duration of thermal annealing suggest the physical nature of the photochromic effect in the PZT ceramics, which is caused by the presence of small traps in the band structure of lead zirconate – titanate.

The obtained results are considered with using a Dember's photo effect theory for structures with point defects.

References

1. Organic photochromes / Ed. prof. A.V. Eltsov // L., Chemistry Printing House, 1982. - 288 p.
2. Tanaka K. Photochromic effect in Fe-doped PLZT ceramics / K. Tanaka, Y. Hamakawa, K. Wakino, M. Murata // J. Amer. Cer. Soc. – 1976. – V. – 59. – No 11-12. – P. 465 – 469.
3. Caixia Xu. Mechanism of photochromic effect in $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ and $(\text{Pb},\text{La})(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ceramics under violet/infrared light illumination / Caixia Xu, Jingwen Zhang, Long Xu, Hua Zhao // J. Appl. Phys. – 2015. – V. – 117. – P. 023107-1 - 023107-7.

UDC 538.9

CONDITIONS OF THE FERROELECTRIC PHASE FORMATION IN DIISOPROPYLAMMONIUM IODIDE

A. Yu Milinskiy¹, S. V. Baryshnikov², E. V. Charnaya³, I. V. Egorova⁴

¹Candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, a.milinskiy@mail.ru

²Doctor of physical and mathematical sciences, professor, svbar2003@list.ru

³Doctor of physical and mathematical sciences, professor, charnaya@mail.ru

⁴Doctor of chemical sciences, professor, bgpu.chim.egorova@mail.ru

^{1,2,4}Blagoveshchensk State Pedagogical University

³St. Petersburg State University

Temperature dependences of dielectric constant for the organic ferroelectric of diisopropylammonium iodide ($\text{C}_6\text{H}_{16}\text{NI}$) have been investigated. It was found that upon the first heating, only one phase transition occurred without the presence of ferroelectric phase. For samples preheated over

420 K, two phase transitions at 363 and 378 K appeared in heating process, and the ferroelectric state was also observed between them.

Keywords: diisopropylammonium iodide; organic ferroelectrics; phase transition; dielectric properties.

Diisopropylammonium iodide ($C_6H_{16}NI$) belongs to the family of organic ferroelectrics, which have several advantages over the widely used inorganic ferroelectrics in relation to light weight and environmental friendliness because of the absence of heavy metals in their structure [1-3]. In this regard, the present work is devoted to clarifying dielectric and thermal properties of polycrystalline sample of diisopropylammonium iodide.

In the present work, diisopropylammonium iodide was synthesized through the reaction between diisopropylamine and acidic aqueous solution of hydroiodic acid with mole ratio of 1:1. The diisopropylamine (Sigma-Aldrich, 99,95%) and HI (Scharlau chemie S.A., 57.0%) were utilized for the preparation process. The reaction mixture was stirred for 30 min and then filtered to get a solid residue, which was recrystallized from ethyl alcohol at 350 K. After evaporation of the solvent, acicular colorless diisopropylammonium iodide crystals were obtained and then dried in a desiccator with calcium chloride. A crystalline powder formed after drying was carefully washed by diethyl ether and dried again in the desiccator with calcium chloride. Finally, the synthesized powder was compressed into tablets of 12 mm in diameter and 1.5 mm in thickness under a pressure of 7500 kg/cm^2 .

The obtained results for temperature dependences of dielectric constant ϵ' for samples of DIPAI at different frequencies are presented in Fig. 1. Upon the first heating to 390 K, an anomaly found at 381 K as seen in Fig. 1 corresponds to the transition from the orthorhombic $P2_12_12_1$ to monoclinic $P2_1/m$ phases [2]. Upon cooling, the transition temperature decreased and was detected at 361 K. For temperature dependences of $\text{tg}\delta(T)$, there were two minima at 381 and 361 K observed during heating and cooling, respectively (the inset, Fig. 1). Besides, the increase in measuring frequencies led to the reduction of ϵ' and $\text{tg}\delta$ values, indicating the presence of dielectric dispersion. This dependence is in good agreement with the experimental data obtained for single crystals of DIPAI [2].

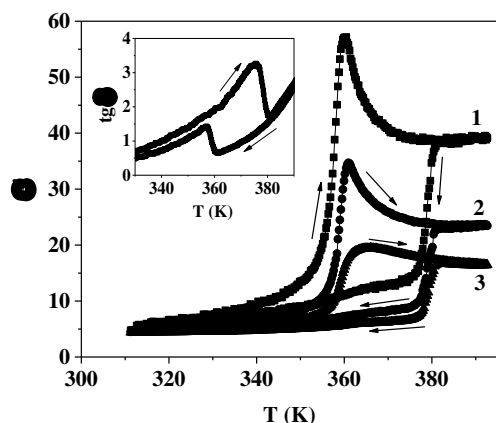


Fig. 1. Temperature dependences of dielectric constant ϵ' for polycrystalline samples of DIPAI upon the first heating/cooling round up to 390 K at frequencies of 1 kHz – 1, 10 kHz – 2 and 100 kHz – 3. The inset shows temperature dependences of $\text{tg}\delta(T)$ obtained upon the first heating/cooling round at 1 kHz

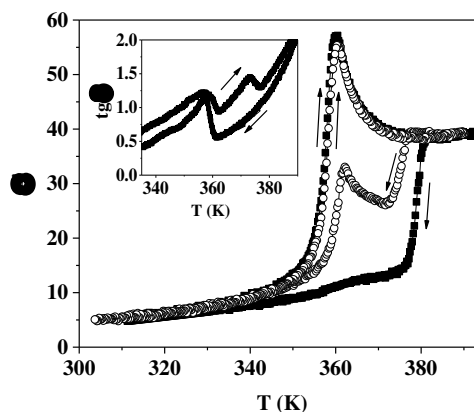


Fig. 2. Temperature dependences of dielectric constant ϵ' for polycrystalline samples of DIPAI at 1 kHz upon the first heating/cooling round up to 390 K (closed symbols) and after preheating to 420 K (open symbols). The inset shows temperature dependences of $\text{tg}\delta(T)$ obtained upon the first heating/cooling round at frequency of 1 kHz after preheating to 420 K

It was found that the heating history strongly affected the sequence of phase transitions in polycrystalline samples of DIPAI. Indeed, after preheating samples up to 420 K and higher,

two phase transitions at 363 and 378 K appeared upon heating (Fig. 2). Correspondingly, two minima at 363 and 378 K in $\text{tg}\delta(T)$ dependence were also observed in heating mode. Meanwhile, upon cooling, these phase transition temperatures were slightly different from the heating ones (within 1 degree) (Fig. 2).

Thus, the influence of thermal prehistory on the appearance of ferroelectric state in polycrystalline samples of DIPAI was clarified. After preheating samples over 420 K, the ferroelectric phase was found between 363 and 378 K. During cooling process, the ferroelectric state occurred from 361 to 300 K. In the case of keeping samples at room temperature over 24h, polycrystalline DIPAI was completely converted into the paraelectric phase.

References

1. Saripalli R.K. Observation of ferroelectric phase and large spontaneous electric polarization in organic salt of diisopropylammonium iodide./ Saripalli R.K, Swain D, Prasad S, et al. // J. Appl. Phys. – 2017.-V.121(11). - P.114101-5.
2. Piecha-Bisiorek A. Phase sequence in diisopropylammonium iodide: avoided ferroelectricity by the appearance of a reconstructed phase / Piecha-Bisiorek A, Gařor A., Isakov D., et al. // Inorg Chem Front. – 2017- V. 4(3).- P. 553-558.
3. Baryshnikov S.V, Milinskii A.Yu, Charnaya E.V, et al. Size Effect in Nanocomposites Based on Molecular Ferroelectric Diisopropylammonium Bromide / Baryshnikov SB, Milinskii AYu, Charnaya EV, et al. // Phys. Solid. State. – 2019 - V. 61(2).- P. 134-138.

УДК 538.9

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАНОКОМПОЗИТОВ $\text{C}_6\text{H}_{16}\text{NBr}/\text{Al}_2\text{O}_3$

А. Ю. Милинский¹, С. В. Барышников², Е. В. Чарная³, И. В. Егорова⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, a.milinskiy@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, svbar2003@list.ru

³Д-р физ.-мат. наук, профессор, charnaya@mail.ru

⁴Д-р хим. наук, профессор, bgpu.chim.egorova@mail.ru

^{1,2,4}ФГБОУ ВО «Благовещенский государственный педагогический университет»

³ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет»

В работе проведены диэлектрические исследования бромида диизопропиламмония, внедренного в матрицы оксида алюминия с различными размерами пор. Исследования выявили смещение температуры Кюри к низким температурам тем больше, чем меньше размер пор пленок Al_2O_3 . Для наночастиц DIPAB в порах Al_2O_3 размером 60 nm наблюдаются два фазовых перехода, между которыми формируется сегнетоэлектрическая фаза.

Ключевые слова: размерные эффекты, органические сегнетоэлектрики, фазовый переход, диэлектрические свойства.

Структуры на основе упорядоченных матриц (опал, пленки пористого оксида алюминия и др.), заполненные сегнетоэлектриками, могут использоваться для изготовления различных элементов нанoeлектроники. Однако, влияние эффектов, связанных с размерами и геометрией сетки пор, взаимодействием частиц со стенками пор и между собой приводят к тому, что сегнетоэлектрические свойства частиц в матрицах разного типа могут отличаться. В качестве одних из перспективных матриц, используемых для получения наноструктур, является оксид алюминия (Al_2O_3), представляющий собой пленку с регулярно расположенными порами, ориентированными перпендикулярно поверхности. В данной работе приводятся результаты исследований линейных и нелинейных диэлектрических свойств органического сегнетоэлектрика диизопропиламмония бромид ($\text{C}_6\text{H}_{16}\text{NBr}$, DIPAB) внедренного в матрицы Al_2O_3 с диаметром пор 330, 100 и 60 нм.

Диизопропиламмония бромид, имеет спонтанную поляризацию ($P_s \sim 23 \text{ } \mu\text{C}\times\text{cm}^{-2}$) близкую к титанату бария, высокую температуру Кюри ($T_c = 426 \text{ K}$) и демонстрирует хороший пьезоэлектрический отклик [1]. Эти атрибуты делают его альтернативой перовскитоподобным сегнетоэлектрикам. В наших исследованиях диизопропиламмония бромид был получен реакцией диизопропиламина с 48%-ным водным раствором HBr по методике, приведенной в [2]. Согласно спектру XRD, при комнатной температуре объемный DIPAB имеет сегнетоэлектрическую структуру ($P2_1$).

На рис. 1 и 2 представлены зависимости $\varepsilon'(T)$ в режиме нагрева - охлаждения для объемного образца DIPAB и заполненных пленок Al_2O_3 с различными размерами пор. Максимумы на кривых $\varepsilon'(T)$ для объемного образца наблюдаются при температуре 426 К, что соответствует структурному переходу $P2_1 \rightarrow P2_1/m$ и согласуется с результатами, представленными в работах [3]. При охлаждении максимум ε' сдвигается в сторону низких температур примерно на 3-4 К. Для нанокompозитов DIPAB/ Al_2O_3 аномалии $\varepsilon'(T)$ в области фазового перехода менее выражены по сравнению с объемными образцами и сдвигаются в сторону более низких температур.

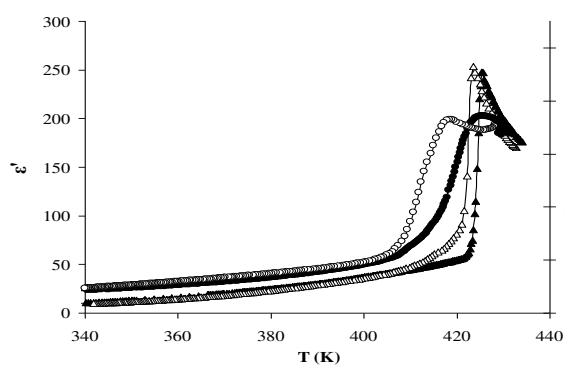


Рис.1. Зависимости $\varepsilon'(T)$ для DIPAB (треугольники, левая ось) и заполненных DIPAB/ Al_2O_3 диаметром 330 нм (круги, правая ось) в режиме нагрева и охлаждения на частоте 1 kHz

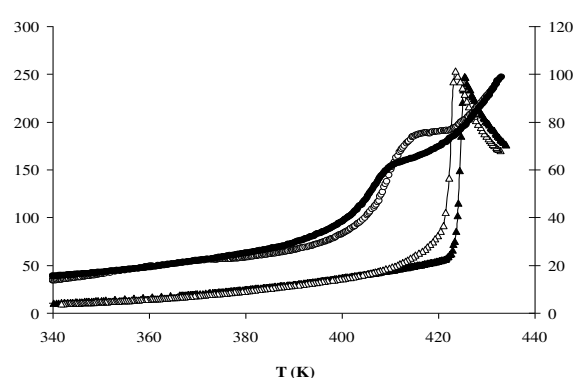


Рис.2. Зависимости $\varepsilon'(T)$ для DIPAB (треугольники, левая ось) и DIPAB/ Al_2O_3 с диаметром пор 60 нм (круги, правая ось) в режиме нагрева и охлаждения на частоте 1 kHz

Для уточнения температурной области существования сегнето-электрической фазы в нанокompозитах были исследованы их нелинейные свойства в сравнении с объемным DIPAB. Согласно результатам по генерации третьей гармоники, полученным при нагреве, для DIPAB и композитов DIPAB/ Al_2O_3 с размерами пор 330 и 100 nm высокие значения коэффициента $\gamma_{3\omega}$ наблюдаются в интервале температур от комнатной до 426, 423 и 420 К соответственно. Выше указанных температур $\gamma_{3\omega}$ меняется незначительно, что связано с переходом образцов в параэлектрическое состояние. Другая картина наблюдается для композита DIPAB/ Al_2O_3 с размерами пор 60 nm, где резкий рост коэффициента $\gamma_{3\omega}(T)$ наблюдается в интервале температур 403-418 К при нагреве и 401-416 при охлаждении. При втором и последующих проходах также прослеживаются два фазовых перехода.

Таким образом, можно заключить, что для наночастиц DIPAB в порах 60 nm при нагреве и охлаждении реализуется два фазовых перехода, между которыми формируется сегнетоэлектрическая фаза.

Литература

1. Y. Li. Domain structures and phase transitions in diisopropylammonium bromide molecular ferroelectric crystal./ Y. Li, K. Li, J. He. //Chem. Phys. Lett. – 2017.-V.689.- P. 174-178.
2. A. Piecha. Room-temperature ferroelectricity in diisopropylammonium bromide./ A. Piecha, A. Gağor, R. Jakubas, P. Szklarz. // Cryst Eng Comm – 2013.- V.15 (5). - P. 940.

UDC 537.226

DIELECTRIC AND CALORIMETRIC STUDIES OF FERROELECTRIC COMPOSITIONS $(C_6H_{16}NBr)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$

E.V. Stukova¹, E.Yu. Koroleva², S.V. Baryshnikov³, A.V. Sakhnenko⁴

¹Dr. of physical and mathematical sciences, Professor, lenast@bk.ru

²Dr. of physical and mathematical sciences, Senior Researcher, e.yu.koroleva@mail.ioffe.ru

³Dr. of physical and mathematical sciences, Professor, svbar2003@list.ru

⁴Teacher, anna_izbickaya@mail.ru

¹Amur State University. Blagoveschensk, 675027 Russia

²Ioffe Physical Technical Institute, St. Petersburg 194021 Russia

³Blagoveschensk State Pedagogical University, Blagoveschensk, 675000 Russia

⁴Far Eastern Higher Combined Arms Command School named after the Marshal of the Soviet Union, Blagoveschensk, 675021 Russia

This work given results of dielectric and calorimetric researches of ferroelectric composite $(C_6H_{16}NBr)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$. It is shown, that mutual influence of composite components can lead to change an order of phase transitions.

Keywords: organic ferroelectrics, phase transition, ferroelectric composite, dielectric permeability

When studying of dielectric properties of ferroelectric composite (see [1-3] and references therein), it was found that for such systems mutual components influence on both properties is possible. For composites $(KNO_3)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$, $(KNO_3)_{1-x}/(KNbO_3)_x$ expansion of potassium nitrate ferroelectric phase existence was observed [1, 2]. Significant shift of Curie temperature for $AgNa(NO_2)_2$ was found in composite $AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[BaTiO_3]_{0.1}$ [3].

In recent years, a number of organic compounds with polar point group at room temperature and relatively high melting point (~450K) were discovered. Particularly, such ferroelectrics include diisopropylammonium bromide $(C_6H_{16}NBr)$ $P_s \sim 23$ ~C/cm², $T_c = 426$ K [4]. Diisopropylammonium bromide has a spontaneous polarization close to that of barium titanate, high Curie temperature and exhibits good piezoelectric response. Experimental results of $BaTiO_3$ particle influence on phase transitions of composite $(C_6H_{16}NBr)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ for $x=0.05, 0.1$ are given in the present work.

In experiment samples of $C_6H_{16}NBr$ and $C_6H_{16}NBr$ with $BaTiO_3$ volume fractions of inclusion 5 and 10%. Broadband dielectric spectrometer Novocontrol BDS-80 with frequency range from 0,1 Hz to 10 MHz was used to complex dielectric constant measurement.

As dielectric studies shows (Fig.1), at room temperature $C_6H_{16}NBr$ is ferroelectric (with $P2_1$ symmetry). At frequencies about several Hz spontaneous polarization gives significant contribution to dielectric permittivity and minimum $\epsilon'(T)$ corresponds to phase transition due to spontaneous polarization equal zero. According calorimetric and dielectric studies, at $T=421,6$ K $C_6H_{16}NBr$ converted into paraphrase (with $P2_1/m$ symmetry), and when cooling down lower $T=419$ K shifted back to polar (with $P2_1$ symmetry).

For composite $(C_6H_{16}NBr)_{0.9}/(BaTiO_3)_{0.1}$ (Fig.2) at room temperature realize the orthorhombic phase with space group $P2_12_12_1$, which is ferroelectrically inactive. During heating above 415K it goes to polar structure with $P2_1$ symmetry. This structure exists at range from 415 to 421K. At temperature, higher than 421K a transition occurs to non-polar monoclinic phase $P2_1/m$. When cooling down at 418K $C_6H_{16}NBr$ structure changes directly from $P2_1/m$ to $P2_1$ symmetry). Determination of phase transitions temperatures from the maximum dielectric constant is not accurate because of composite $(C_6H_{16}NBr)_{1-x}/(BaTiO_3)_x$ maximum temperature depends of frequency and changes from 419,8K at 1Hz to 424,5K at 500 kHz. At the

same time according to calorimetric measurements this value is 426,5K. It means that composite present relaxor properties.

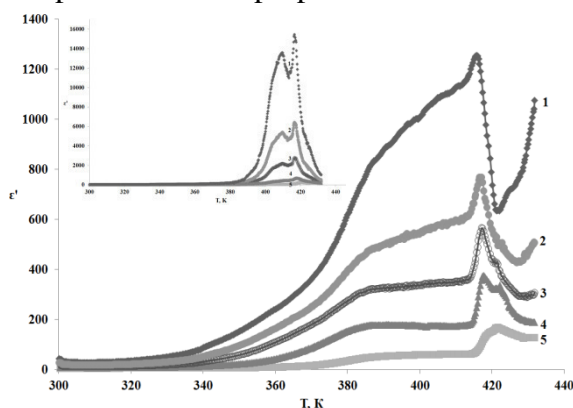


Fig. 1. Dependence $\epsilon''(T)$ for $C_6H_{16}NBr$ at heating and cooling (the inset)

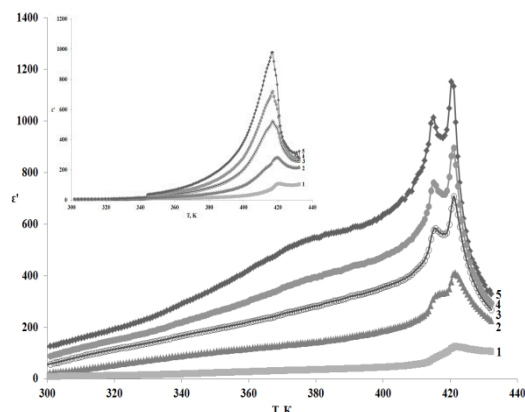


Fig. 2. Dependence $\epsilon''(T)$ for $(C_6H_{16}NBr)_{0.9}/(BaTiO_3)_{0.1}$ at heating and cooling (the inset)

Non-polar phase instead of polar one implementation is connected with the fact that composite free system energy includes components energy and the energy of dipole-dipolar interaction. In this case dipole-dipolar interaction of $BaTiO_3$ and $C_6H_{16}NBr$ polar particles leads to increase of free energy and ferroelectric state will be disadvantageous.

References

1. Stukova, E.V. Stabilization of the ferroelectric phase in $(KNO_3)_{1-x}-(BaTiO_3)_x$ composites / E.V. Stukova, S.V. Baryshnikov // *Inorganic materials: applied research.* – 2011. – V.2, N5. – P. 434-438.
2. Stukova, E.V., Baryshnikov S.V. Dielektricheskiye issledovaniya segnetoelektricheskikh kompozitov na osnove $(KNO_3)_{1-x}-(KNbO_3)_x$ / E.V. Stukova, S.V. Baryshnikov // *Perspektivnyye materialy* – 2011. – N13. – P. 801-805.
3. Baryshnikov, S. Dielectric properties of the ferroelectric composites $[AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[NaNO_2]_{0.1}$ and $[AgNa(NO_2)_2]_{0.9}/[BaTiO_3]_{0.1}$ / S. Baryshnikov, A. Milinskiy & E. Stukova // *Ferroelectrics.* – 2018. – V.536 – P. 91 - 98.
4. Fu, D.-W. Diisopropylammonium bromide is a high-temperature molecular ferroelectric crystal / D.-W. Fu, H.-L. Cai, Y. Liu, Q. Ye, W. Zhang, Y. Zhang, X.-Y. Chen, G. Giovannetti, M. Capone, J. Li, and R.-G. Xiong // *Science.* – 2013. – V.339. –P. 425-428.

УДК 538.9

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $PbMn_{1/3}Nb_{2/3}O_3$

Б.К.Абдулвахидов¹, С.А. Садыков², М.А. Сирота³, И.П. Дмитренко, А.В. Солдатов⁴,
К.Г. Абдулвахидов⁵, А.П.Будник⁶, П.С. Пляка⁷

¹Аспирант, babdulvakhidov@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, ssadyk@yandex.ru

Дагестанский государственный университет

³Аспирант, mari.sirota@ya.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, soldatov@sfedu.ru

Южный федеральный университет

⁵Д-р физ.-мат. наук, phys.kam@mail.ru

⁶Канд. физ.-мат. наук, abudnik.sfedu@yandex.ru

⁷Канд. физ.-мат. наук, pavstef@mail.ru

Южный научный центр РАН

В работе представлены результаты изучения структуры и диэлектрических свойств как чистого, так и допированного сегнетомагнетика $Pb(Mn_{1/3}Nb_{2/3})O_3$.

Ключевые слова: релаксор, твердые растворы, ширина запрещенной зоны.

Твердые растворы на основе $\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ являются интересными и малоизученными составами, обладающими поведением сегнетоэлектрического релаксора и спонтанным намагничиванием. Литературных данных по комплексному изучению концентрационных фазовых переходов твердых растворов $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ практически нет, поэтому нашей целью является восполнение этого пробела.

В работе представлены результаты изучения структурных параметров, диэлектрических свойств, удельной электропроводности $(1-x)\text{Pb}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3-x(\text{PbTiO}_3)$ и оптических спектров в широком концентрационном диапазоне.

Показано, что симметрия $\text{PbMn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ лучше всего описывается пространственной группой $R3m$, и он является релаксором. Увеличение концентрации допирующей компоненты до 0.15PbTiO_3 приводит к подавлению релаксорного поведения и формированию морфотропной области (МО), представляющей совокупность $R3m+P4mm$ фаз. Область МО простирается до концентрации допанта, равной 0.25PbTiO_3 . Обнаружено, что ширина запрещенной зоны E_g также изменяется в зависимости от концентрации допанта.

Авторы благодарны за поддержку Вн.гр. № 07/2017-08 Южного федерального университета и ГЗ ЮНЦ РАН на 2019 г., № гр. проекта АААА-А19-119040390084-3.

УДК 538.9

УПРАВЛЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКОВ МЕХАНИЧЕСКИМ СИЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

К.Г.Абдулвахидов¹, М.А. Сирота²

¹ Д-р физ.-мат.наук, phys.kam@mail.ru

²Аспирант, mari.sirota@ya.ru

¹Южный научный центр РАН

^{1,2}Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов ЮФУ

²Донской государственный технический университет

В работе представлены результаты изучения влияния силового воздействия в сочетании со сдвиговой деформацией на физические свойства сегнетоэлектриков, сегнеторелаксоров, антисегнетоэлектриков и мультиферроиков.

Механическое силовое воздействие на твердые кристаллические тела с помощью наковален Бриджмена является одним из методов формирования физических их свойств.

В предлагаемом докладе изучено влияние такого воздействия на свойства синтезированных классических сегнетоэлектриков, антисегнетоэлектриков, сегнетоэлектриков - релаксоров и мультиферроиков. Контролируемыми параметрами при изучении порошковых образцов выступали размеры ОКР и микродеформации, параметры ИК - спектров, параметры кристаллической решетки, концентрации фаз, среднеквадратичные смещения, характеристическая температура Дебая и фактор Дебая - Валлера.

Для контроля влияния механоактивации на физические свойства керамических образцов изучались диэлектрические и оптические спектры, удельную электропроводность и теплоемкость, петли магнитного и сегнетоэлектрического гистерезиса.

Авторы благодарны за поддержку Вн.гр. № 07/2017-08 Южного федерального университета и темы АААА-А19-119040390084-3 Южного научного центра РАН.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ИМПУЛЬСНЫХ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В КРИСТАЛЛАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-РЕЛАКСОРА SBN

А.В.Бурцев¹, Б.Б. Педько²

¹lexusbur@inbox.ru

ООО «ПК «Альтоника», г. Зеленоград, нач-к производства

²Канд. физ.-мат. наук, декан, boris_pedko@mail.ru

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет», г. Тверь

В данной работе представлены результаты спектрального анализа импульсных процессов переключения, инициированных внешним электрическим полем и изменением температуры, в кристаллах сегнетоэлектрика-релаксора SBN с применением модернизированной классической установки по исследованию теплового эффекта Баркгаузена.

Ключевые слова: спектральный анализ, процессы переключения.

Результаты исследования эффекта Баркгаузена (ЭБ) в классических сегнетоэлектриках достаточно хорошо известны [1]. Традиционно основные закономерности поведения скачкообразных импульсных процессов переключения инициированных приложением внешнего электрического поля связываются с элементами петли диэлектрического гистерезиса, а температурного поведения с температурной зависимостью спонтанной поляризации. Иная ситуация возможна в сегнетоэлектриках-релаксорах, характеризующихся размытым фазовым переходом [2]. Отметим, что спектральный анализ импульсов переключения, на основании которого можно говорить о конкретных механизмах и их вкладе в процесс сегнетоэлектрического переключения в релаксорных сегнетоэлектриках практически не проводился.

В данной работе проведены исследования процессов переключения в кристаллах сегнетоэлектрика-релаксора $\text{Sr}0.61\text{Ba}0.39\text{Nb}2\text{O}6$ (SBN), построены спектры амплитуд импульсов, которые определяют протекающие в кристалле процессы переключения, получены спектры времени протекания одиночных импульсов, проведена оценка объема переключения кристалла для отдельных механизмов импульсов и их вклад в общий объем переключения, инициированного термическими воздействиями.

Исследуемые кристаллы SBN выращены методом Чохральского и подготовлены к исследованиям в институте физики г. Оснабрюк, ФРГ. Исследования проводились на чистом кристалле SBN и с примесями Ce, Cr, Rh, Ru и их комбинациях.

Для инициирования процессов переключения кристаллы подвергались воздействию внешнего электрического поля 50 и 100 В и нагревались до температур 200С (выше максимума температурной зависимости диэлектрической проницаемости). В качестве основы исследовательской установки применялась модернизированная авторами установка для исследования теплового эффекта Баркгаузена. Электрические импульсы поступали на вход высокоскоростного операционного усилителя, а после усиления фиксировались платой АЦП L-783 ООО «Л Кард».

Зависимость интенсивности следования импульсов переполаризации от температуры в кристаллах SBN, чистых и с примесями, во всем интервале исследованных температур в большинстве кристаллов имеет три максимума, соответствующих трем температурным областям: 1 – область протекания импульсных процессов переключения в кристалле до «фазового перехода», 2 – область температуры, близкой к температуре максимума диэлектрической проницаемости, 3 – область протекания импульсных процессов существенно выше этой температуры. Наличие третьей области нехарактерно для сегнетоэлектрических кристаллов и может быть объяснено релаксорными свойствами SBN.

Обработка данных, зафиксированных АЦП, проводилась с помощью программного обеспечения, разработанного авторами. Результаты обработки позволили получить

спектры распределения амплитуд импульсов, их длительности, оценить объём переключившейся области.

Спектры в ряде случаев демонстрировали наличие нескольких максимумом, что авторами трактуется как доказательство наличия нескольких механизмов протекания процессов переключения, например, таких как зародышеобразование и движение доменной стенки.

На рис. приведены типичные полученные спектров для температур, в которых были зафиксированы максимумы следования импульсов переключения.

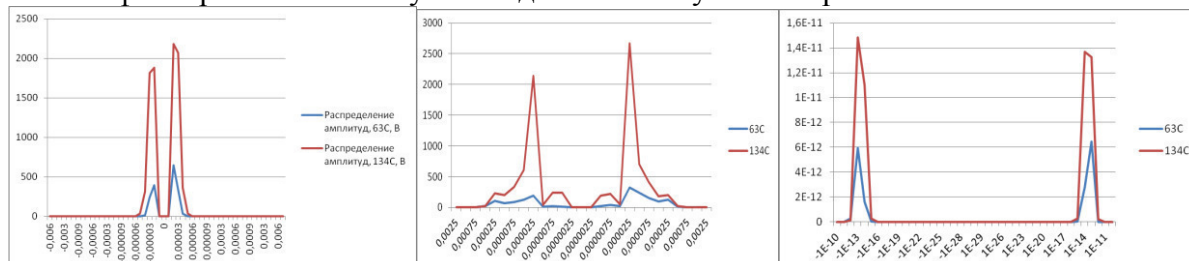


Рисунок. Спектры амплитуд, времени следования и рассчитанного относительных единиц объёма переключения кристалла для кристалла SBN с примесью 500ppmCe при температурах 63 и 134 С

Установлено, что объём переключившейся области не всегда прямо пропорционален амплитуде импульсов и их длительности. Наибольший вклад в общий объём, переключившийся при термическом воздействии, может быть внесён теми типами скачкообразных процессов, количество которых существенно меньше.

Литература

1. Рудяк В.М. Эффект Баркгаузена // Успехи физической науки. - 1970. - т.101. - №3, - с.429-462.
2. Бурцев А.В., Педько Б.Б., Зазнобин Т.О., Юпатов А.Н., Котрова(Бойцова) К.Н.. // Термически индуцированные скачкообразные импульсные процессы в кристалле ниобата бария-стронция с примесями металлов. // Физика твердого тела. 2009, Т 51, № 7, С.1407-1409.

UDC 538.913

DOMAIN STRUCTURE IN NANOSCALE FERROELASTICS

V. N. Nechaev¹, A. V. Viskovatykh²

¹ Dr. Phys.-Mat. sciences, professor, ostrovisk@mail.ru

² PhD student, ostrovisk@mail.ru
Voronezh State Technical University

In this work, in the framework of the thermodynamic theory of Landau for phase transitions, it is shown by an exact numerical solution of a nonlinear system of differential equations that a ferroelastic nanoparticle has a domain structure in the low-temperature phase. This structure depends on the size and shape of the particle, as well as on the boundary conditions for the order parameter.

Keywords: ferroelastic, domain structure, phase transition, nanocomposite.

Nanoscale materials are of great interest both from the point of view of studying physical laws in low-dimensional systems and from the practical side - they are associated with the search for materials with new properties. The main reason for the difference between the properties of nanoscale materials and the properties of bulk analogs is associated with an increase in the proportion of atoms on the surface of the particle. As a result, the balance of various contributions to the free energy of a material changes and its ground state may change [1-3]. In [1-2], it was shown that the ground state of a ferroelectric nanoparticle formed during the phase transition from the high-temperature paraphase is inhomogeneous domain-like. The heterogeneity of the order parameter refers to a change in the direction (sign) of the order pa-

parameter, and not a change in the order parameter in magnitude. Such a heterogeneous structure depends on the temperature, shape and size of the sample, boundary conditions for the order parameter, the presence of external fields, etc. The same situation occurs in thin ferroelectric films [3]. But the basic state in magnetic materials, in particular in frustration magnets, is most studied [4-7].

The purpose of this study is to study the structure of the low-temperature phase in ferroelastic nanoparticles.

The thermodynamic potential of a ferroelastic nanoparticle is the sum of three components: the elastic potential, the contribution to the thermodynamic potential associated with the order parameter, and the term that takes into account the interaction of the order parameter with elastic stresses.

$$\Phi_1 = \int \varphi_1(\vec{r}) dV = \int \frac{1}{2} s_{iklm} \sigma_{ik} \sigma_{lm} dV, \quad (1)$$

$$\Phi_2 = \int \varphi_2(\vec{r}) dV = \int \left(\frac{1}{2} \kappa (\nabla \eta)^2 - \frac{1}{2} \alpha \eta^2 + \frac{1}{4} \beta \eta^4 \right) dV, \quad (2)$$

$$\Phi_3 = \int \varphi_3(\vec{r}) dV = - \int \eta \sigma_{13} dV, \quad (3)$$

where s_{iklm} is the elastic compliance tensor, having the following form in an isotropic elastic environment:

$$s_{iklm} = \frac{1}{2} [s_1 \delta_{ik} \delta_{lm} + s_2 (\delta_{il} \delta_{km} + \delta_{im} \delta_{kl})], \quad s_1 = -\frac{\nu}{E}, \quad s_2 = \frac{1+\nu}{E}, \quad (4)$$

where s_1 и s_2 is two independent components are expressed in terms of the Young modulus E and the Poisson's ratio ν , σ_{ik} is the elastic stress tensor, α , β are the Landau coefficients of the bulk ferroelastic, κ is the correlation constant.

In addition, when writing expressions (1) - (3), it was assumed that as a result of a phase transition in the material there is a spontaneous (plastic) shear deformation $u_{13}^{(p)}$, taken as a parameter of the order η , as in potassium trihydroelenite $KH_3(SeO_3)_2$. This assumption explains the kind of expression for Φ_3 .

As an object of study, we consider a parallelepiped nanoparticle, which is a homogeneous ferroelastic crystal. Its size is $30 \times 30 \times d$ nm, where d is the thickness (height) of the nanoparticle.

The plastic deformation distribution also has a domain-like structure in a ferroelastic nanoparticle below the Curie temperature similarly to the domain-like picture in ferroelectric nanoparticles. As it was shown, the cause of the division of ferroelectric particles into domains is depolarizing electric field. In the case of a ferroelastic particle, the elastic fields are the cause. At $d \leq 8$ nm, the phase transition at Curie temperature occurs in a single-domain state. At $9 \text{ nm} \leq d \leq 12 \text{ nm}$ a two-domain state is observed. For $d \geq 13$ nm it is observed three and more domains.

In conclusion, we note that the formation of the domain structure of a ferroelastic nanoparticle, in addition to the size and shape should certainly be influenced by the following parameters. These are the boundary conditions for the order parameter and mobility of the boundaries of nanoparticle, the presence of stresses at the nanoparticle boundaries, thermal stresses, primarily due to the production technology, the presence and concentration of defects, and others. All this complicates the analysis of such states and is the subject of future research.

Referenses

1. Nechaev V.N. On the Change in the Phase Transition Mechanism in the Ferroelectric Inclusion of Ferroelectric–Dielectric Nanocomposite as a Function of Its Size / V.N. Nechaev, A.V. Viskovatykh // Physics of the Solid State. – 2015. - V. 57. - № 4 - P. 722-727.

2. Nechaev V.N. Inhomogeneous polarized states in ferroelectric inclusions in a ferroelectric-dielectric nanocomposite / V.N. Nechaev, A.V. Viskovatykh // *Izvestiya Vuzov. Physics.* – 2018. – V. 61. - № 2. P. 12-18. (in Russian)
3. Nechaev V.N. On inhomogeneous polarized states near the phase transition point in a thin ferroelectric film / V.N. Nechaev, A.V. Shuba // *Physics of the Solid State.* – 2018. – V. 60. - № 7 - P. 1322-1327. (in Russian)
4. Vasiliev A.N. Spin Crack in Low-Dimensional Magnets / A.N. Vasiliev, M.M. Markina, E.A. Popova // *Physics of the Low Temperature.* 2005. - V. 31. - P. 272-299. (in Russian)
5. Kassan-Ogly F.A. Frustrations and Ordering in Magnetic Systems of Different Dimensions / F.A. Kassan-Ogly, A.I. Proshkin // *Physics of the Solid State.* – 2018. - V. 60. - № 6 - P. 1078-1085. (in Russian)
6. Kamilov I. K. Monte Carlo Studies of Phase Transitions and Critical Phenomena / I.K. Kamilov, A.K. Murtazaev, Kh.K. Aliev // *Phys. USP.* – 1999. - V. 42. - № 6 – P. 689–709.
7. Dotsenko V.S. Critical Phenomena and Quenched Disorder / V.S. Dotsenko // *Phys. USP.* – 1995. - V. 38. - № 5 – P. 457–496.

UDC 538.913

**INHOMOGENEOUS POLARIZATION FLUCTUATIONS AND RELAXATION
OF THE POLARIZATION OF THE FERROELECTRIC INCLUSIONS
IN NANOCOMPOSITE FERROELECTRIC-DIELECTRIC**

V. N. Nechaev¹, A. V. Viskovatykh²

¹Dr. Phys.-Mat. sciences, professor, ostrogvisk@mail.ru

²PhD student, ostrogvisk@mail.ru

Voronezh State Technical University

This paper presents an approach for determining the oscillation spectrum of ferroelectric nanoparticles of different shapes in a dielectric matrix. The spectrum of their oscillations determines many important thermodynamic and kinetic characteristics. On the basis of this approach, the influence of the size, shape and concentration of ferroparticles on the macroscopic properties of the nanocomposite material is determined.

Keywords: ferroelectric, phase transition, nanocomposite, eigenvalues, polarization relaxation.

The fluctuations spectrum of a material determines its many important thermodynamic and kinetic characteristics, such as heat capacity, thermal conductivity, electrical conductivity, acoustic and optical properties, etc. [1]. A fundamental reorganization of the fluctuations spectrum occurs in the composite material due to the presence of inclusions of another phase in the matrix phase. The purpose of this work is to study the features of the fluctuations spectrum of a ferroelectric-dielectric nanocomposite, necessary to clarify a number of fundamental issues of their behavior.

Consider a representative cell of a composite material, which is a parallelepiped of a dielectric with a ferroelectric particle located in its center. For this representative cell, we proceed from the Lagrangian of the form:

$$L = \int_V \left\{ \frac{1}{2} \mu \dot{P}^2 - \kappa \frac{1}{2} (\vec{\nabla} P)^2 + \frac{1}{2} \alpha P^2 - \frac{1}{4} \beta P^4 \right\} dV + \int_S \left\{ \frac{1}{2} \alpha_S P^2 \right\} dS, \quad (1)$$

where μ is the mass coefficient for the fluctuations of polarization, $\mathbf{P} = \{0, 0, P\}$ is the vector of polarization, which plays the role of the order parameter in the phase transition; $\alpha = \alpha_0(T_C - T)$ and β are the Landau coefficients in the expansion of free energy [15], T_C is the Curie temperature of homogeneous infinite crystal, T is the current composite temperature, κ is the correlation constant, α_S is the coefficient of the quadratic term characteriz-

ing the order parameter at the border [2]. The integration is taken over the volume V and the surface S of the ferroelectric particle.

The mass coefficient μ for polarization oscillations is estimated as

$$\mu = \frac{m_e}{e^2 N}, \quad (2)$$

where m_e is the mass of unit cell, N is the number of cells per unit volume. Evaluation of μ for TGS (triglycine sulfate) gives: $\mu \approx 0,8 \cdot 10^{-23} \text{cek}^2$ [3].

Varying expression (1), we obtain an equation describing the oscillations of a ferroelectric nanoparticle, and the boundary condition to it:

$$m\ddot{P} - \kappa\Delta P - \alpha P + \beta P^3 = 0; \quad M \in D \quad (2)$$

$$\kappa \frac{\partial P}{\partial n} + \alpha_S P = 0. \quad Q \in \Gamma \quad (3)$$

where $P(M) = P(x, y, z), x, y, z \in D; P(Q) = P(x, y, z), x, y, z \in \Gamma;$
 $\bar{D} = D \cup \Gamma$ is the area of the space occupied by the nanoparticle, with the border $\Gamma; \frac{\partial P}{\partial n}$ is the derivative of the normal to the surface Γ , external to the region D .

For stationary oscillations $P = p e^{-i\omega t}$ the equation (2) takes the form:

$$-m\omega^2 p - \kappa\Delta p - \alpha p = 0. \quad (4)$$

The boundary condition (3) does not change.

The problem of finding the oscillation spectrum of ferroelectric inclusions in a nanocomposite is posed as an eigenvalue problem.

Equation (4) is the eigenvalue equations for the parameter $\lambda = \alpha + m\omega^2$. Solving problem (3) - (4) we obtain the set of eigenfunctions $\{p_n\}$ and eigenvalues $\{\lambda_n\}$. The lowest eigenvalue λ_0 corresponds to the phase transition and determines the phase transition temperature shift. Higher eigenvalues determine the eigenfrequencies ω_n of the nanoparticle oscillations::

$$\omega_k = \sqrt{\frac{\lambda_k - \alpha}{m}}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (5)$$

The eigenfrequencies ω_n depend on the temperature according to (5), on the size and shape of nanoparticles. A ferroelectric particle of elliptical shape and particles of the simplest geometries (spherical, cylindrical forms) are considered in the work. For particles of spherical, cylindrical and parallelepiped-shaped, the solution can be obtained in general form through Bessel functions. The spectrum of oscillations is analyzed depending on the size, shape of particles, and boundary conditions for polarization.

Referenses

1. Vaks V.G. Introduction to the microscopic theory of ferroelectricity. - M.: Nauka, 1973. - 327 p. (in Russian).

2. Nechaev V.N. On the parameters determining the special features of phase transitions in composite materials / V.N. Nechaev, A.V. Shuba and A.V. Viskovatykh // Russian Physics Journal, Consultants Bureau. – 2015. - V. 58. - № 5 – P. 114–118.

3. Jonah F., Shirane D. Ferroelectric crystals, trans. from english - M.: Mir, 1965. 555 p. (in Russian).

UDC 537.228.1

**THE RELIEF SHAPE CHANGING OF THE CRYSTAL Rb_2ZnCl_4
ELECTRICAL ENERGY DEPENDENCE FROM POLARIZATION IN THE
DOMAIN STRUCTURE FREEZING TEMPERATURE VICINITY ($T^*\approx 150$ K)**

V. V. Gorbatenko¹, B. N. Prasolov², S. A. Gorbatenko³, N. V. Datsenko⁴

¹Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, vlgorbatenko@mail.ru
Voronezh state technical university

²Doctor of physical and mathematical sciences, professor, vlgorbatenko@mail.ru
Investments and technologies LLC, Voronezh, Russia

³Doctor of technical sciences, professor, sv_gorbatenko@mail.ru
Voronezh state institute of physical culture

⁴Candidate of technical sciences, associate professor, natdatsenko@mail.ru
Voronezh state university of engineering technologies

The group A_2BX_4 model crystal - chlorzincate rubidium Rb_2ZnCl_4 repolarization process under the harmonic electric field action with the amplitude above the coercive field intensity in the domain structure freezing temperature vicinity ($T^*\approx 150$ K) by the harmonic analysis method was investigated.

The study of the current density harmonics that arising in the sample under the harmonic field action allowed constructing the sample volume unit electric energy W_c dependence on the polarization P_c measured in the dynamics. It is shown that in a relatively small temperature range in the T^* vicinity there is a significant dependence $W_c(P_c)$ potential relief shape change.

Keywords: polarization, phase transition, incommensurate phase, ferroelectrics.

It is known that the behavior of dielectric and polarization Rb_2ZnCl_4 crystal properties in the ferroelectric phase in the temperature range from the Curie point T_C to $T^*\approx 150$ K is determined by the dynamics of ferroelectric domain boundaries as solitons, and their contributions values significantly depend on the crystal background and in particular on the temperature and samples holding time in the paraelectric and incommensurate phases [1,2]. Structural changes like phase transition in the domain wall are observed in Rb_2ZnCl_4 in the vicinity of $T^* 150$ K [3, 4], accompanied by a change of the domain wall width. The domain wall width decrease results to a sharp decrease in its mobility due to increased interaction with lattice defects, which is accompanied by the coercive field sharp increase with a small polarization change [5].

In order to remove the soliton structure dynamic contribution to the crystal dielectric and polarization properties the experiment was carried out as follows. First, the sample was cooled below T^* by 20 K, where, as was established in [2], the soliton structure disappears almost completely, and then the sample was heated to 151 K. The polarization harmonics and current density components measurements at the sinusoidal electric field amplitudes E_m above the coercive one that was applied to the test sample at its isothermal exposure in the temperature range from 151 K to 159 K were carried out. The study of the current density harmonics that arising in the sample under the harmonic field action allowed constructing the sample volume unit electric energy W_c dependence on the polarization P_c measured in the dynamics. The dependence $W_c(P_c)$ measured at the test sample isothermal exposure at a temperature $T=159$ K and application to the test sample plates harmonic electric field with amplitude $E_m=3.2 \cdot 10^4$ V/m and frequency $f_0=0.3$ Hz shown in Fig.

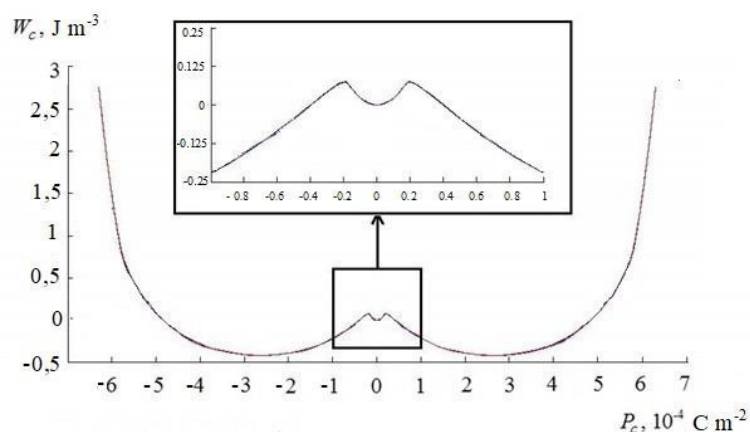


Figure. Dependences of the test sample volume unit electrical energy W_c on its polarization P_c constructed by means of harmonic analysis

It is found that in a relatively small temperature range in the T^* vicinity there is a significant dependence $W_c(P_c)$ potential relief shape change.

References

1. Gridnev S. A. Relaxation of long-lived metastable states in the ferroelectric Rb_2ZnCl_4 with a incommensurate phase / S.A. Gridnev, V.V. Gorbatenko, B.N. Prasolov // *Crystallography*. 1994. Vol. 39. P. 106-113.
2. Gridnev S. A. Soliton and domain contributions to non-equilibrium dielectric permittivity in Rb_2ZnCl_4 / S.A. Gridnev, B.N. Prasolov, V.V. Gorbatenko, *FIZ*. 1990. Vol. 32. No. 7. P. 2171.
3. Sawanda S. Ferroelectricity in Rb_2ZnCl_4 / S. Sawanda, Y. Shroishi, A. Yamamoto, M. Takashige, M. Matsuo // *J. Phys. Soc Japan*. 1977. V.43. P.2099-2100.
4. Levstic A. The interaction potential between discommensurations in Rb_2ZnCl_4 / Levstic A., Unruh H.-G. // *Ferroelectrics*, 1988. V.78. P.173-182.
5. Gridnev S. A. On the phase transition in the domain wall in Rb_2ZnCl_4 near 150K / S.A. Gridnev, V.V. Gorbatenko, B.N. Prasolov // *Crystallography*. 1997. Vol. 42. No. 4. P. 730-734.

UDC 537.228.1

THE CRYSTAL Rb_2ZnCl_4 ELECTRIC ENERGY TEMPORAL EVOLUTION AS A FUNCTION OF POLARIZATION IN THE FERROELECTRIC PHASE NEAR THE CURIE POINT

V. V. Gorbatenko¹, B. N. Prasolov², S. A. Gorbatenko³, N. V. Datsenko⁴

¹Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, vlgorbatenko@mail.ru
Voronezh state technical university

²Doctor of physical and mathematical sciences, professor, vlgorbatenko@mail.ru
Investments and technologies LLC, Voronezh, Russia

³Doctor of technical sciences, professor, sv_gorbatenko@mail.ru
Voronezh state institute of physical culture

⁴Candidate of technical sciences, associate professor, natdatsenko@mail.ru
Voronezh state university of engineering technologies

The group A_2BX_4 model crystal - chlorzincate rubidium Rb_2ZnCl_4 repolarization process under the harmonic electric field action with the amplitude above the coercive field (E_k) in the ferroelectric phase (FF) near the ferroelectric phase transition temperature T_c was researched by the harmonic analysis method. The current density harmonics study arising in the sample under the harmonic field action allowed constructing the sample unit volume electric energy W_c dependence on the polarization P_c measured in the dynamics. The dielectric hysteresis loops time evolution after exposure of

an alternating electric field E_{\square} with a frequency about 20 kHz and an amplitude higher than E_k in the FF near T_c to the sample was studied in detail by the harmonic analysis method. The temporal evolution of the dependence $W_c(P_c)$ after exposure to the sample E_{\square} was obtained. It is established that there is a significant change of the dependence $W_c(P_c)$ potential relief shape during relaxation.

Keywords: polarization, phase transition, coercive field, electric energy, ferroelectrics.

On the base of Rb_2ZnCl_4 crystal samples dielectric and polarization studies it was shown [1] that relaxation of nonequilibrium dielectric permittivity (ϵ_k) above the ferroelectric phase transition temperature ($T_c \approx 199.4$ K) is associated with the ferroelectric domain boundaries (DB) detachment from the stoppers and the subsequent domain structure disappearance in a incommensurate phase. There is a peak of dependence $\epsilon_x(T)$ recorded during the test sample heating at T_c temperature. It is noteworthy that in equilibrium conditions in the T_c vicinity in FF there is a temperature-independent behavior of E_k obtained after dielectric hysteresis loops processing measured at a frequency of 0.3 Hz. In [2] it is shown that $E_k = E_c + E_0$ where E_c - the field strength due to losses occurring in the sample, and E_0 - the switching field strength. The field strength E_0 is a value that must be added to E_c for maintaining almost full test sample monodomainisation. In equilibrium conditions in the T_c vicinity in FF E_0 tends to zero when T_c approaching, and E_c increases. It was suggested that in ultrapure crystals the value E_c associated with losses will not give a significant contribution to E_k and E_k will be determined practically by the E_0 value, i.e. E_k will tend to zero when T_c approaching, as follows from the thermodynamic representations [3]. According to the Landau-Ginzburg-Devonshire theory, in the case of a uniaxial ferroelectric, it is possible to decompose the free energy W_c into powers of a P_c single component. The Landau-Ginzburg-Devonshire theory use for quantitative estimates of the Rb_2ZnCl_4 crystal polarization properties measurements results is applicable if the free energy W_c is decomposed by degrees of a single polarization component limited to terms up to the fourteenth degree [4]. Thus, we have: $W_c = \frac{1}{2}aP_c^2 + \frac{1}{4}bP_c^4 + \frac{1}{6}cP_c^6 + \frac{1}{8}dP_c^8 + \frac{1}{10}eP_c^{10} + \frac{1}{12}fP_c^{12} + \frac{1}{14}gP_c^{14} - EP_c$, where a, b, c, d, e, f, g - coefficients having a certain physical meaning [3], E - the electric field strength. In [4] the Rb_2ZnCl_4 crystal repolarization process under the harmonic electric field action with amplitude higher than the intensity E_k was investigated by the harmonic analysis method. The current density time dependence $J_x(t)$ which occurs in the sample under the harmonic field action whose intensity is higher than the coercive has a complex periodic form. The harmonics $J_x(t)$ study allowed to construct the sample unit volume electric energy W_c dependence on the polarization P_c measured in the dynamics, to determine the values of the coefficients a, b, c, d, e, f and g. In [1] it was shown that, if E_{\square} are applied to Rb_2ZnCl_4 crystal samples in FF at isothermal exposure, then after E_{\square} disconnection ϵ_x and E_k relaxation are observed. The field E_{\square} influence on the sample leads to a E_k decrease which confirms the DB releasing process from defects. After E_{\square} shutdown the reverse process occurs - the DB fixing defects process which reveals in an E_k increase.

In this paper the dielectric hysteresis loops temporal evolution after E_{\square} exposure to the sample in the FF near T_c was studied in detail by harmonic analysis method. The dependence

$W_c(P_c)$ and expansion coefficients a, b, c, d, e, f, g time evolution is obtained. It is established that there is a significant change of the dependence $W_c(P_c)$ potential relief shape during relaxation.

References

1. Gridnev S. A. Dielectric relaxation in incommensurate phase of Rb_2ZnCl_4 / S.A. Gridnev, V.V. Gorbatenko, B.N. Prasolov // *Izv. RAS.Ser.Fiz.* 1993.Vol. 57. N3. P. 97-100.
2. Gorbatenko V. V. Pinning effect of domain boundaries in Rb_2ZnCl_4 crystal near Curie point / V. V. Gorbatenko, V. I. Kudryash, B.N. Prasolov, S.A. Gorbatenko // *Izv. RAS.Ser.Fiz.* 2011.Vol. 75. N10. P. 1394-1398.
3. Rabe K. M., Ana C. G., Triscone J.-M. *Physics of ferroelectrics (modern view)*. M., BINOM.Laboratory of knowledge, 2011.P. 89.
4. Gorbatenko V.V. Determination of the coefficients in the expansion of the crystal Rb_2ZnCl_4 electrical energy on polarization by the harmonic analysis method / V.V. Gorbatenko, B.N. Prasolov, S.A. Gorbatenko // *Izv. RAS.Ser.Fiz.* 2018.Vol. 82. N3. P. 323-326.

UDC 537.226.83

REVERSIBLE CHARACTERISTICS OF DIELECTRIC PROPERTIES IN MODIFIED FERROELECTRIC $Ba_{0.95}Pb_{0.05}TiO_3$ CERAMICS

A. I. Burkhanov¹, R. V. Dikov², and K. Bormanis³

¹Dr. phys., prof., burkhanov@inbox.ru

²PhD student, romanodc@yandex.ru

Volgograd State Technical University, Russia

³Dr. phys. emeritus, bormanis@cfi.lu.lv

Institute of Solid State Physics University of Latvia, Latvia

The effect of cobalt concentration on the character of the reversible dependences of the dielectric constant $\varepsilon'(E_{\pm})$ in the $Ba_{0.95}Pb_{0.05}TiO_3$ ferroelectric ceramics is studied.

Keywords: ferroelectric ceramics, dielectric constant, reversible dependences.

Despite the huge number studies of the physical properties of ferroelectric materials based on barium titanate, interest in them continues unabated today. The study of the properties of modified barium titanate and their structure remains an urgent problem of time stability of electrophysical properties (aging) and in the process of cyclically changing loads (durability of work) and continues to attract the attention of developers of end products [1].

In this study, the reversible dependence of the dielectric constant $\varepsilon'(E_{\pm})$ in ferroelectric ceramics $(1-x)Ba_{0.95}Pb_{0.05}TiO_3+xCo_2O_3$, obtained from high-purity oxides by the 2-step solid-phase synthesis method with different content of the cobalt modifying additive was studied. The dielectric response measurements on plane-parallel samples of size $S = 15 \text{ mm}^2$ (covered with silver electrodes) and thickness $d = 0.5 \text{ mm}$ were carried out by the bridge method device with a weak alternating field of frequency 1000 Hz and with a stepwise supply of constant bias field E_{\pm} with a step 0.85 kV/cm.

It was found that in the nominally pure composition $Ba_{0.95}Pb_{0.05}TiO_3$, in addition to the maxima $\varepsilon'(E_{\pm})$, corresponding to the coercive fields $\pm E_c$, for some values of the bias field $|E_{\pm}| > |\pm E_c|$ at the increasing and decreasing of E_{\pm} , the local minima of $\varepsilon'(E_{\pm})$ appears. These minima of $\varepsilon'(E_{\pm})$ are most likely due to the effect of piezoelectric clamping of antiparallel domains (Drougard – Young effect) [2]. The presence of cobalt into ferroelectric ceramics leads to the fact that in the used interval E_{\pm} local minima $\varepsilon'(E_{\pm})$ disappear. At the same time, the diffusion of the maxima $\varepsilon'(E_{\pm})$ in this region of E_c increases with a simultaneous increasing the values E_c .

The behavior of $\varepsilon'(E_{\pm})$ at room temperature for $x = 0$ and $x = 0.5$ (Figure) indicates that the curves are asymmetric with respect to $E = 0$, which is probably due to the preliminary polarization of the structural elements.

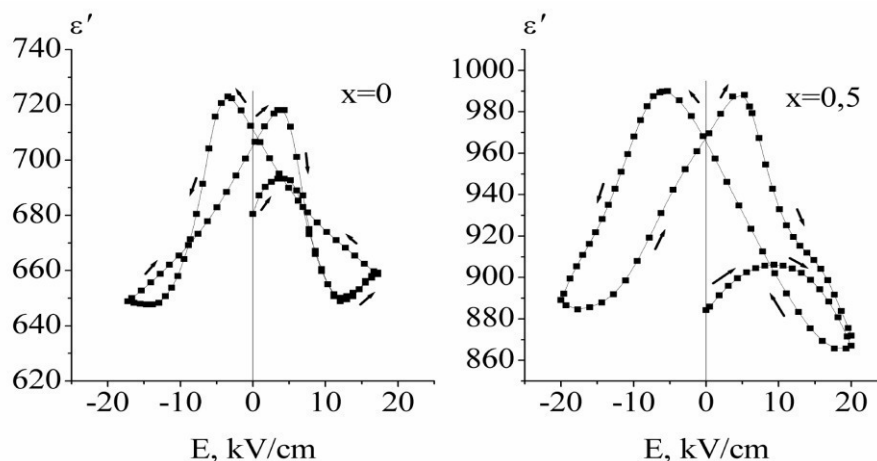


Figure. Reversible dependences of $\varepsilon'(E_{\pm})$ in $(1-x)\text{Ba}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{TiO}_3+x\text{Co}_2\text{O}_3$ compounds ($x = 0$ and 0.5 wt%) at $T = 25$ °C

Increasing the cobalt content ($\text{Co} > 0.5$ wt%) leads to a significant smearing of the maximum $\varepsilon'(E_{\pm})$ at E_c , which agrees well with the behavior of temperature dependences $\varepsilon'(T)$ in the region of the ferroelectric phase transition [3]. There was found that modifying by admixture of Co to change substantially the thermal anomalies of dielectric properties and shift the ferroelectric phase transition temperature.

The nature of the dielectric response $\varepsilon'(T)$ in $(1-x)\text{Ba}_{0.95}\text{Pb}_{0.05}\text{TiO}_3+x\text{Co}_2\text{O}_3$ compositions have shown that the phase transition at $x > 0.5$ wt% becomes substantially diffused, and can be described in the framework of existing approaches to the relaxation of polarisation in ferroelectrics with diffuse phase transition.

The obtained results are interpreted within the framework of the contribution of domain and phase boundaries to the processes of polarization and depolarization with different arrangement of the structure of the ferroelectric material under study.

The authors are grateful to A. Kalvane for the synthesis of the samples.

References

1. Haertling G.H. Ferroelectric ceramics: history and technology / G.H. Haertling // Journal of the American Ceramic Society. – 1999. – V. 82. - № 4. - P. 797–818.
2. Drougard M.E. Domain clamping effect in barium titanate single crystals / M.E Drougard, D.R.Joung // Phys. Rev. – 1954. - № 6. - P. 1561–1566.
3. Bormanis K. Dielectric and acoustic properties of modified barium titanate ceramics / K. Bormanis, A. Kalvane, A. I. Burkhanov, L. Eglite and R. V. Dikov // Ferroelectrics. – 2019. - V. 538. - № 1. - P. 12–19.
DOI: 10.1080/00150193.2019.1569980.

UDC 537.226.4

RELAXATION OF NONEQUILIBRIUM DOMAIN STRUCTURE OF TRIGLYCINE SULFATE NEAR THE CURIE POINT

O.M.Golitsyna¹, S.N.Drozhdin², V.O.Lesnikova³

¹Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, golitsynaom@yandex.ru

²Doctor of Physics and Mathematics, Professor, drozhdin@phys.vsu.ru

³ Assistent, chulakovavo@mail.ru

^{1,2}Voronezh State University

³Voronezh State Medical University

Relaxation of the non-equilibrium domain structure of a ferroelectric crystal triglycine sulfate (TGS) rejuvenated by a short-term exposure in the paraelectric phase was studied in the temperature

range $\Delta T = 1^\circ\text{C}$ near the Curie point T_C . The domain structure had been observed by means of AFM technique.

Keywords: triglycine sulfate, Curie point, non-equilibrium domain structure, relaxation, correlation length, scaling.

Relaxation of the non-equilibrium 180° -th domain structure emergent at the ferroelectric phase transition of the 2-nd order can be described using the ideas developed for the analysis of the ordering dynamics of two-phase systems described by the scalar order parameter [1].

In this paper, the relaxation of DS, visualized in ferroelectric crystal TGS by means of AFM technique in the temperature interval $T_C - 1^\circ\text{C} \leq T < T_C$ was investigated. Before these measurements, the aged samples were "rejuvenated" by exposure for 30 min at $T = 60^\circ\text{C}$ and as a result a fine striped domain structure [2] emerged initially in the ferroelectric phase just near T_C . Over time the enlargement of the domain structure occurs. This process is rather complicated and involves the various stages of transformation of the domain pattern.

Earlier studies were carried out, either by nematic liquid crystals for lenticular domain structure [3], or at a much greater distance from the T_C [4].

A quantitative description of the evolution of two-phase systems is carried out usually using a space-time correlation function of the macroscopic order parameter $K(r, t) = \langle \eta(r, t) \eta(r', t) \rangle$, from which the characteristic length $L_C(t)$ can be determined. According to [1], the dependences $L_C(t)$ are power-law: $L_C(t) \sim (t - t_0)^\alpha$, where $\alpha = 0,5$ for the non-conserved order parameter and $\alpha = 0,3$ - for the conserved one.

As a result of the studies was found the following:

1) the characteristic length L_C increases with time according to the power law $L_C(t) \sim t^\alpha$ (Fig.1); the decrease of the absolute values of the exponent α on the lowering of a temperature from T_C in the temperature range under study is a consequence of the transition of the domain structure during its evolution from the non-conservative state to the conservative one;

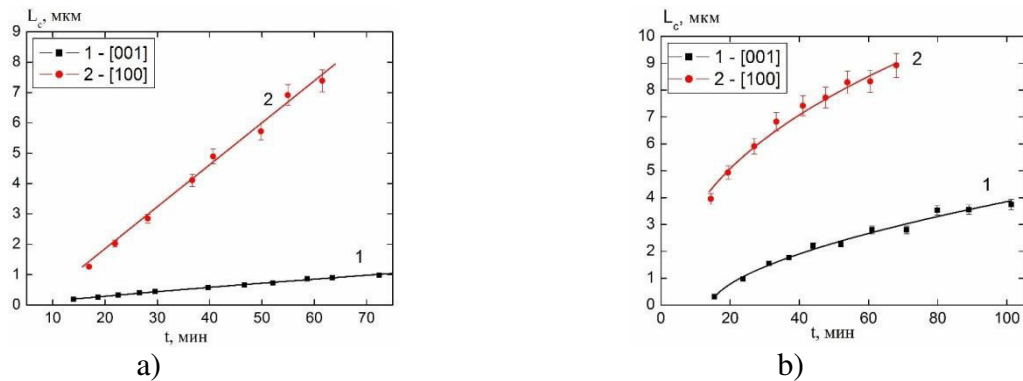


Fig. 1. The time dependences of the characteristic length for pure TGS: a) at a temperature $T = 48,9^\circ\text{C}$ along the crystallographic directions [001] and [100];
b) the same at a temperature $T = 48^\circ\text{C}$

2) the correlation functions, presented for different time moments as dependences $C(r, t) = f\left(\frac{r}{L_C}\right) \equiv f(x)$, have near the temperature of ferroelectric phase transition the form $f(x) = 1 - 0.5x$ (for $0 \leq x \leq 2$), which is the universal for ordering kinetics of two-phase systems with scalar order parameter (Fig.2).

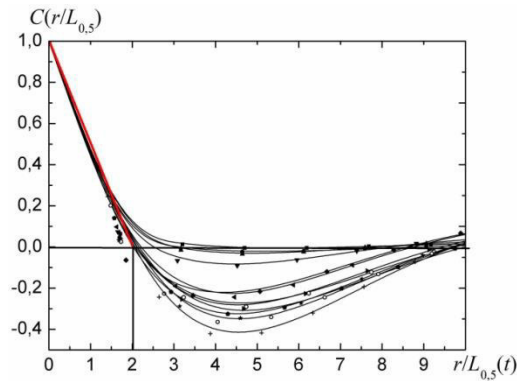


Fig. 2. Dependences $C(r, t) = f\left(\frac{r}{L_c}\right)$ for the time moments from 2 to 80 min for $\Delta T_C = 1^\circ\text{C}$, along the crystallographic direction [001]

References

1. A. J. Bray. Theory of phase-ordering kinetics / Advances in Phys. – 1994. – V. 43. – № 3. – P. 357-459.
2. K.Takahashi, M.Takagi. Topographic study of domain boundaries in TGS.1/ Journal of the Physical Society of Japan, 1978. – V.44. – 4. – P.1266-1274.
3. N. Tomita, H. Orihara, Y. Ishibashi. Ferroelectric domain pattern evolution in quenched triglycinesulphate / Journal of the Physical Society of Japan, 1989. – V. 58. – № 4. – P. 1190-1198.
4. V. Likodimos, V. Labardi, M. Allegrini. Kinetics of ferroelectric domains investigated by scanning force microscopy / Physical Review B. – 2000. – V. 61. – № 21. – P. 14440-14447.

UDC 537.226.4

EFFECT OF STATIC MAGNETIC FIELD ON THE DIELECTRIC AND FERROELECTRIC PARAMETERS OF TRIGLYCINE SULFATE CRYSTAL

O.M.Golitsyna¹, S.N.Drozhdin², A.Yu.Lun³

¹ Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, golitsynaom@yandex.ru

² Doctor of Physics and Mathematics, Professor, drozhdin@phys.vsu.ru

³ Graduate Student, asder793@mail.ru

Voronezh State University

The influence of weak static magnetic field on the nominally pure ferroelectric crystal triglycine sulphate (TGS), which depends on the mutual orientation of the vectors of magnetic induction and spontaneous polarization, leads to a long lasting and non-monotonic change of the dielectric permittivity, the tangent of the dielectric loss angle, the coercive field and the spontaneous polarization of the crystal.

Keywords: static magnetic field, ferroelectric triglycine sulphate crystal.

The effect of the magnetic field on ferroelectric crystals leads to certain changes in their electrophysical properties [1-3], but the insufficiently studied mechanisms of these phenomena are currently unclear, that requires further research.

In the present work the influence of weak static magnetic field (permanent magnet, $B = 0,3$ T, exposure time 30 minutes) on the dielectric permittivity ε , the tangent of dielectric loss angle $\text{tg } \delta$, the coercive field, E_C , the spontaneous polarization P_S of nominally pure triglycine sulfate (TGS) - chemical formula $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ -uniaxial ferroelectric crystal with the model second order ferroelectric phase transition at a temperature $T_C = 49^\circ\text{C}$ had been studied.

Measurements of these parameters were carried out in the temperature range from 20°C to 47°C . The influence of the magnetic field on the value of the Curie temperature T_C was also studied.

The following regularities were established.

1) The magnetic effect is essentially anisotropic and depends on the mutual orientation of the vectors \mathbf{B} and \mathbf{P}_S : the effect is completely absent when the vectors \mathbf{B} and \mathbf{P}_S are collinear; it is most strongly expressed when \mathbf{B} and \mathbf{P}_S are mutually orthogonal and the magnetic field is oriented along the crystal axis a . The effect is considerably weaker if the magnetic field is oriented along the crystal axis c .

2) The temporal behavior of the studied parameters is non-monotonous after exposure of the crystal in the magnetic field: after removal of the sample from the magnetic field a significant increase of the values of ε , a small increase of the values of P_S and a decrease of the values of the E_C take place initially. After about 30 hours these parameters reach their extreme values, and after that a long (tens of hours) restoration of their original values occurs (Figure).

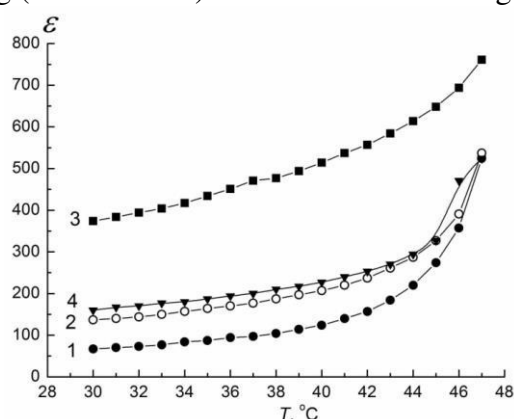


Figure. Temperature dependences of the dielectric permittivity ε : 1 – before placing the sample in a magnetic field; 2 – through $t = 0.5$ h; 3 – through $t = 30$ h; 4 – through $t = 168$ h after removal of the sample from the field

3) At a simultaneous action on a crystal of magnetic field and of electric field \mathbf{E} collinear to \mathbf{P}_S ($E = 2E_C$) the observed effects are expressed more strongly in case of the ac electric field E_{ac} , instead of dc field E_{dc} .

The relaxation nature of the observed effects, as well as the influence of the electric field on them, may point to the participation of the charge and defect subsystems of the crystal and of its domain structure in the processes under study.

References

1. Golovin Yu. I. Magnetic Plasticity of Solids / Physics of the Solid State.- 2004.- Vol. 46.- B. 5.- P. 769-803.
2. Levin, M. N., Postnikov V. V., Palagin, M. Y. The Influence of weak pulsed magnetic fields on crystals of triglycine sulfate / Physics of the Solid State.- 2003.- Vol. 45.- B. 3.- P. 513-517.
3. Yakushkin E. D. Dielectric response of a uniaxial ferroelectric in a magnetic field / JETP Letters.- 2014.- Vol. 99.- B. 7.- P. 483-487.

УДК 538.9

СИНТЕЗ ТЕКСТУРИРОВАННЫХ ПЛЁНОК LiNbO_3

В.А. Дыбов¹, Д.В. Сериков², Е.К. Белоногов³

¹Младший научный сотрудник, dybovvlad@gmail.com

²Младший научный сотрудник, dmitry.tut@mail.ru

³Доктор физ.-мат. наук, профессор, ekelonogov@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе установлено, что в процессе ВЧМР мишени LiNbO_3 на непогреваемой поверхности NiSi/Si формируется аморфный слой Li-Nb-O , который в процессе ТО при 550°C кристаллизуется с образованием фазы LiNbO_3 с произвольной ориентацией зерен. В процессе ВЧМР мишени LiNbO_3 и осаждении на поверхность NiSi/Si при 550°C формируется поликри-

сталлическая пленка, основная доля кристаллитов которой - фаза LiNbO_3 ; пленка имеет аксиальную текстуру [000.1].

Ключевые слова: ниобат лития, высокочастотное магнетронное распыление, структура.

Гетероструктуры на основе ниобата лития - элементная база современной электроники и оптоэлектроники. Цель работы – определение условий нанесения текстурированных пленок ниобата лития на поверхности монокристаллической пластины Si.

Для решения данной задачи первоначально были получены эпитаксиальные пленки NiSi на (111) Si методом термического напыления в вакууме на подогретую до 550°C подложку. Исходные тонкие пленки Li-Nb-O толщиной от 0,1 до 0,2 мкм наносили в процессе высокочастотного магнетронного распыления (ВЧМР) мишени монокристаллического ниобата лития на подогреваемую (550°C) и неподогреваемую пластину кремния с подслоем эпитаксиального силицида никеля (подложка NiSi/Si), синтезированного в процессе термического взрывного испарения и конденсации никеля. Фазовый состав и ориентацию пленок изучали методами электронографии (ЭГ-100М, методика «на отражение»). Пленки, нанесенные без нагрева подложки, термически обрабатывали (ТО) при температуре 550°C в воздушной среде в течение 1 часа.

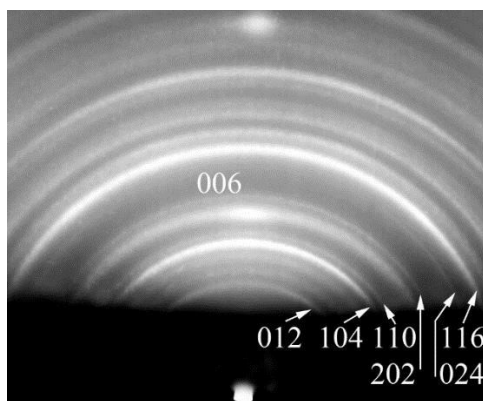


Рисунок. Электронограмма пленки Li-Nb-O, нанесенной в процессе ВЧМР на подогреваемую до 550°C подложку NiSi/Si

Установлено, что в процессе ВЧМР мишени LiNbO_3 на неподогреваемой поверхности NiSi/Si формируется аморфный слой Li-Nb-O, который в процессе ТО при 550°C кристаллизуется с образованием фазы LiNbO_3 с произвольной ориентацией зерен.

В процессе ВЧМР мишени LiNbO_3 и осаждении на поверхность NiSi/Si при 550°C формируется поликристаллическая пленка, основная доля кристаллитов которой - фаза LiNbO_3 ; пленка имеет аксиальную текстуру [000.1].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-11062 мк).

УДК 538.95

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕССВИНЦОВОЙ СЕГНЕТОКЕРАМИКИ $\text{BiNi}_{0.67}\text{Sb}_{0.33}\text{O}_3$

С.А. Гриднев¹, И.Ю. Кобяков²

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, s_gridnev@mail.ru

²Аспирант, kobyakov.vania@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

На частотах от 500 Гц до 1 МГц измерены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в бессвинцовой

сегнетокерамике $\text{BiNi}_{0.67}\text{Sb}_{0.33}\text{O}_3$. Максимум диэлектрических потерь имеет релаксационную природу, связанную с кислородными вакансиями.

Ключевые слова: бессвинцовая сегнетокерамика, релаксационный процесс, кислородные вакансии.

На разных частотах измерены температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ в образцах бессвинцовой сегнетокерамики $\text{BiNi}_{0.67}\text{Sb}_{0.33}\text{O}_3$.

Проводя анализ зависимостей, полученных в ходе эксперимента, можно выделить ряд особенностей поведения кривых. На температурной зависимости тангенса угла диэлектрических потерь вблизи 360 К обнаруживается ярко выраженный широкий пик, смещающийся вверх по температурной шкале при изменении частоты от 0,5 кГц до 1 МГц, что свидетельствует о его релаксационной природе. На зависимостях $\epsilon'(T)$ явно выраженных максимумов нет, но присутствует излом, который аналогичным образом зависит от частоты.

Перестройка температурной зависимости времени релаксации τ в координатах $\ln\tau(1/T)$ даёт линейную зависимость. По тангенсу угла наклона прямой рассчитано значение энергии активации релаксационного процесса $E_a \approx 0,81$ эВ. Полученное значение энергии активации близко к энергии взаимодействия доменных границ и точечных дефектов (вакансиями по кислороду) в сегнетоэлектриках имеющих структуру перовскита [1]. Для подтверждения гипотезы, что изучаемый релаксационный процесс связан с кислородными вакансиями был проведен отжиг образцов $\text{BiNi}_{0.67}\text{Sb}_{0.33}\text{O}_3$ в восстановительной среде углерода при температуре 600 °С в течение 48 часов и измерены температурные зависимости тангенса угла диэлектрических потерь на частоте 1 кГц. Высота пика после отжига значительно увеличилась, что связано с ростом концентрации точечных дефектов, поэтому можно утверждать, что релаксационный процесс в $\text{BiNi}_{0.67}\text{Sb}_{0.33}\text{O}_3$ связан с кислородными вакансиями.

Литература

1. Gridnev S.A. // *Ferroelectrics*. 2002. V. 266. P. 171–209.

УДК 538.9

РЕЛАКСОРНОЕ ПОВЕДЕНИЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО SrTiO_3

Л.Н. Коротков¹, А.И. Бочаров², М.А. Панкова³, Н.А. Толстых⁴, Ф.Д. Аль Джаафари⁵

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, l_korotkov@mail.ru

²Ведущий инженер, lekha.bocharoff@yandex.ru

³К.т.н., преподаватель, m_a_pankova@mail.ru

⁴Ведущий инженер, mad_nik@bk.ru

⁵Аспирант, fdashoor77@mail.ru

^{1,2,4,5}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

³Воронежский институт – филиал ФГБОУ ВО ИПСА ГПС МЧС России

Проведен сравнительный анализ диэлектрических свойств образцов нанокристаллического SrTiO_3 : произведенного фирмой «Sigma Aldrich» и полученного путем перемалывания предварительно синтезированного материала в планетарной мельнице. Показано, что первый образец демонстрирует свойства квантового параэлектрика, тогда как второй, может быть идентифицирован как релаксорный сегнетоэлектрик.

Ключевые слова: наноструктурированный материал, квантовый параэлектрик, релаксорный сегнетоэлектрик, диэлектрическая релаксация.

Титанат стронция – модельный квантовый параэлектрик со структурой перовскита, в котором «ожидаемый» сегнетоэлектрический фазовый переход не реализуется вследствие сильных квантовых флуктуаций [1]. Вместе с тем, допирование материала

некоторыми примесными атомами подавляет эти флуктуации, благодаря чему в SrTiO₃ при низких температурах образуется полярная фаза.

Введенные в небольшом количестве примесные атомы, по сути, являются дефектами кристаллической решетки. В связи с этим представляет интерес выяснить, может ли сегнетоэлектрическая фаза появиться в нанокристаллическом SrTiO₃, где большая удельная поверхность потенциально может подавить квантовые флуктуации и стабилизировать сегнетоэлектрическую фазу. Целью данной работы стала экспериментальная проверка этого предположения.

Для идентификации низкотемпературного состояния в ультрадисперсном SrTiO₃ удобно воспользоваться методом диэлектрической спектроскопии, чувствительной к сегнетоэлектрическому фазовому переходу.

В эксперименте использовали образцы в виде таблеток диаметром около 1 см и толщиной – 1 мм, на большие поверхности которых были нанесены серебряные электроды. Таблетки формировали из порошка титаната стронция, произведенного фирмой «Sigma Aldrich» (образец №1) и порошка, полученного путем перемалывания, предварительно синтезированного SrTiO₃ в планетарной мельнице (образец №2). Диаметр частиц в обоих случаях составлял около 100 нм. Измерения проводили с использованием измерителя иммитанса E7-20 на частотах 25 Гц – 1 МГц и сухого гелиевого криостата Janis Heliy Cryodyne CCS-350S в режиме медленного нагрева.

Полученные температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ представлены на рисунке.

Вид кривой $\epsilon(T)$ для образца №1 аналогичен тому, что наблюдается для объемного титаната стронция. Отсутствие максимума на температурной зависимости диэлектрической проницаемости говорит об отсутствии перехода в сегнетоэлектрическую фазу, по крайней мере, при температурах выше 10 К.

В случае образца №2 на зависимости $\epsilon(T)$ в окрестностях 40 К наблюдается размытый максимум (рис. 2а), близи которого имеет место сильная дисперсия диэлектрического отклика. Температура максимума $\epsilon - T_m$ существенно зависит от частоты измерительного поля и смещается вверх по мере ее повышения, что указывает на релаксационную природу диэлектрической аномалии.

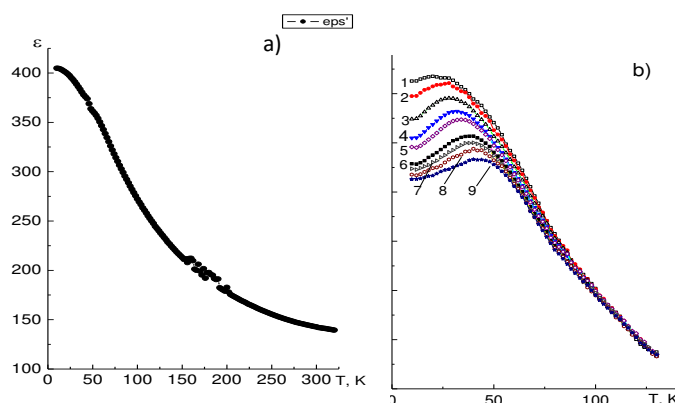


Рисунок. Температурные зависимости ϵ для образца №1 на частоте 10 кГц (а) и образца №2 (б) на частотах 0,025 (1), 0,120 (2), 1 (3) и 5 (4), 10 (5), 50 (6), 100 (7), 200 (8) и 500 (9) кГц

Анализ диэлектрических потерь показал, что наблюдаемая в окрестностях T_m релаксация диэлектрической проницаемости характеризуется размытым спектром времен релаксации, заметно расширяющимся по мере понижения температуры. Такое поведение диэлектрического отклика характерно для релаксорных сегнетоэлектриков.

Результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

1. Нанокристаллический титанат стронция произведенный фирмой «Sigma Aldrich» по гидротемальной технологии демонстрирует свойства квантового параэлектрика.

2. Дефекты кристаллической решетки, образовавшиеся в ходе перемалывания SrTiO₃ до нанокристаллического состояния обуславливают переход материала в релаксорное состояние при низких температурах.

3. Наблюдаемый вблизи T_m релаксационный процесс характеризуется широким спектром времен релаксации.

Данная работа выполнена при поддержке РФФИ (Грант № 18-52-00039 Бел_а).

Литература

1. Физика сегнетоэлектрических явлений / Г.А. Смоленский, В.А. Боков В.А. Исупов и др.; под ред. Г.А. Смоленского. – Л.: Наука, - 1985. – 476 с.

УДК 538.9

РЕТАРДАЦИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ФАЗЕ ДИГИДРОФОСФАТА КАЛИЯ

Л.Н. Коротков¹, Т.Н. Короткова²

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, l_korotkov@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, tn_korotkova@mail.ru

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

²Воронежский институт МВД РФ

Проведены результаты экспериментальных исследований временных зависимостей поляризации в сегнетоэлектрической фазе монокристалла KN₂PO₄ в слабом постоянном электрическом поле. Обнаружено, что характерное время релаксации τ немонотонно зависит от температуры. Вблизи 117 К зависимость τ(T) проходит через максимум, а при температурах ниже 90 К наблюдается сильное возрастание времени релаксации, обусловленное процессами в доменной структуре кристалла.

Ключевые слова: временная зависимость поляризации, время релаксации, доменная структура. Закон Фогеля - Фулчера.

Дигидрофосфат калия (KN₂PO₄ – аббревиатура KDP) претерпевает переход в полярную фазу при температуре T_C ≈ 122 К. Из литературы известно [1], что ниже T_C в кристалле возникает подвижная доменная структура, обуславливающая высокую диэлектрическую проницаемость кристалла. Около 100 К подвижность доменных границ существенно снижается. Об этом, в частности, свидетельствуют результаты многочисленных исследований диэлектрического отклика кристалла, проведенные в интервале частот 10⁻² - 10⁹ Гц.

Вместе с тем экспериментальные данные касательно динамики поляризации кристалла в малом постоянном электрическом поле практически отсутствуют.

В связи с этим целью данной работы стало изучение ретардации поляризации в кристалле KDP в интервале температур 80 – 125 К при подаче слабого электрического поля.

Для эксперимента использовали образцы с размерами 10x10x1 мм, вырезанные из монокристалла KDP, таким образом, что большие их грани были перпендикулярны полярной оси z. На большие поверхности методом термического распыления в вакууме были нанесены серебряные электроды. Образцы помещали в криостат, где температура изменялась в пределах 80 – 300 К и контролировалась с погрешностью ± 0,1 К.

Скачкообразное напряжение 1 – 10 В подавали на предварительно охлажденный до заданной температуры образец. Поляризацию образца (P) измеряли в режиме термостабилизации с помощью электростатического вольтметра В7-30 и эталонного конден-

сатора емкостью 4 мкФ. Временные зависимости поляризации записывали с помощью двухкоординатного самописца.

Полученные временные зависимости поляризации могут быть удовлетворительно описаны соотношением вида:

$$P(t) = P_0[1 - \exp(-t/\tau)^\gamma], \quad (1)$$

где $P_0 = P(t \rightarrow \infty)$, τ - времени релаксации, γ - параметр, принимающий значение от 0 до 3.

Полученная из экспериментальных данных температурная зависимость времени релаксации изображена на рис.

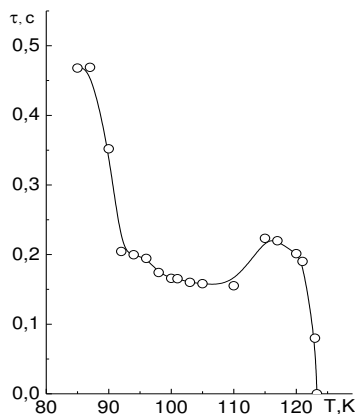


Рисунок. Температурная зависимость τ

Она проходит через максимум в окрестностях 117 К, ниже которого в интервале температур 95 -110 время τ слабо зависит от температуры. Ниже 90 К наблюдается сильный рост τ по мере понижения температуры, который может быть удовлетворительно описан эмпирическим соотношением Фогеля - Фулчера:

$$\tau = \tau_0 \exp[U/k(T-T_0)], \quad (2)$$

где τ_0 – время, приходящееся на одну попытку преодоления потенциального барьера U , k – постоянная Больцмана, T_0 – температура Фогеля – Фулчера. В случае исследуемого кристалла KDP температура $T_0 \approx 83$ К.

Полученные экспериментальные результаты обсуждаются в рамках модели, предусматривающей спонтанную перестройку доменной структуры кристалла.

Литература

1. Сегнетоэлектрические кристаллы группы KN_2PO_4 . / С.А. Гриднев, Л.Н. Камышева, А.С. Сидоркин, под ред. С.А. Гриднева. Воронеж: ВПИ, 1981. 116 с.

УДК 538.911

ЭКЗОТИЧЕСКИЕ СТРУКТУРА И ЭЛЕКТРОННЫЕ СВОЙСТВА ВАКАНСИИ ТИТАНА В НАНОПЛАСТИНКАХ TiO_2

А.И. Лебедев

Д-р физ.-мат. наук, профессор, swan@scon155.phys.msu.ru
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Вакансии титана с концентрацией около 9% всегда неизбежно присутствуют в нанопластинках двуокиси титана с толщиной в один монослой. В работе представлены результаты теоретических расчетов геометрии и электронных свойств вакансии титана. Обнаружено, что перенос электронов с внешних по отношению к нанопластинке атомов или молекул на нанопла-

стинку приводит к существенной перестройке геометрии дефекта и немонотонному изменению положения уровня Ферми в системе. Эти свойства дефектов определяют статический отрицательный заряд, который они проявляют в эксперименте. Объяснено, почему дефекты с подобными свойствами могут возникать только в квазидвумерных системах.

Ключевые слова: двуокись титана, нанопластинки, вакансии, расчеты из первых принципов.

Нанопластинки из двуокиси титана TiO_2 толщиной в один монослой в последнее время стали объектом значительного внимания в связи с их уникальными физическими и химическими свойствами [1]. В частности, в нанопластинках, легированных кобальтом и железом, был обнаружен ферромагнетизм при 300 К, наблюдались гигантский магнетооптический эффект и интересные фотокаталитические свойства.

В нанопластинках TiO_2 , которые получают путем расщепления протонированных слоистых соединений состава $\text{H}_x\text{Ti}_{1-y}\square_y\text{O}_2$ со структурой лепидокрокита, всегда присутствуют вакансии титана с концентрацией около 9%. Концентрация вакансий может быть увеличена при легировании TiO_2 литием или магнием. Это означает, что свойства нелегированных и слабо легированных нанопластинок в значительной степени определяются присутствием этих дефектов.

В настоящей работе представлены результаты теоретических расчетов геометрии и электронных свойств вакансии титана в нанопластинках TiO_2 , а также изменений этих свойств в результате взаимодействия нанопластинок с окружающими атомами. Вычисления проводились методом функционала плотности с использованием программы ABINIT.

Расчеты геометрии и электронной структуры нанопластинок состава $\text{Ti}_{0.875}\text{O}_2$ (концентрация вакансий титана 12.5%) обнаружили, что этот материал является диэлектриком – в отличие от объемного $\text{Ti}_{0.875}\text{O}_2$ с такой же концентрацией вакансий. Необычность этого результата связана с тем, что при перераспределении зарядов в ионном соединении недостаток числа электронов, возникающий из-за дефицита титана, должен приводить к появлению незаполненных состояний в валентной зоне, то есть к формированию вырожденного полупроводника *p*-типа (так происходит в объемном $\text{Ti}_{0.875}\text{O}_2$). Причина такого поведения была установлена из анализа геометрии рассматриваемого дефекта. Оказалось, что при удалении атома титана из нанопластинки происходит существенная перестройка в положении шести окружающих титан ионов кислорода, которая приводит к формированию двух пероксид-ионов. То, что пероксид-ион имеет заряд 2–, объясняет, почему перераспределение зарядов в этом дефектном материале оставляет его в диэлектрическом состоянии.

Анализ поведения нанопластинок $\text{Ti}_{0.875}\text{O}_2$, взаимодействующих с различными окружающими ее атомами (Ar, K, Ca, Mg, Y, Cl, H) и парами атомов, показывает, что при выполнении определенных условий между нанопластинкой и внешними атомами может происходить перенос электронов. Перенос электронов на нанопластинку сопровождается существенной перестройкой геометрии дефекта, при которой происходит последовательный распад пероксид-ионов, следствием которого оказывается немонотонное изменение положения уровня Ферми в системе. Так, при увеличении числа перенесенных электронов нанопластинка несколько раз переходит из проводящего (полупроводник *p*-типа) в диэлектрическое состояние, пока наконец она не становится полупроводником *n*-типа. В объемных материалах такого поведения никогда не наблюдалось.

Полученные результаты согласуются с экспериментальными данными [2], свидетельствующими о том, что уровень Ферми в нанопластинках на платиновых подложках располагается вблизи середины запрещенной зоны.

Найденные свойства вакансии титана объясняют причину формирования статического отрицательного заряда нанопластинок, который они проявляют в экспериментах в коллоидными растворами.

Показано, что ионы водорода, которые могут попадать в узлы титана в процессе гидролиза слоистого соединения, легированного литием или магнием, делают невозможным описанное выше поведение. Однако учитывая то, что энергия таких комплексов заметно превышает энергию нанопластики с атомом водорода на поверхности, в эксперименте скорее всего будут образовываться именно последние конфигурации.

Приведено объяснение, почему дефекты с подобными свойствами невозможны в объемных образцах и наблюдаются только в квазидвумерных системах. Предложены примеры других систем, в которых подобные дефекты могут наблюдаться.

Работа выполнена при поддержке грантом РФФИ № 17-02-01068.

Литература

1. Osada M. Two-dimensional dielectric nanosheets: novel nanoelectronics from nanocrystal building blocks / M. Osada, T. Sasaki. // *Adv. Mater.* – 2012. – V. 24. – P. 210–228.

2. Walle L.E. High-resolution photoemission and X-ray absorption spectroscopy of a lepidocrocite-like TiO_2 nanosheet on Pt(110) (1×2) / L.E. Walle, S. Agnoli, I.H. Svenum, A. Borg, L. Artiglia, P. Krüger, A. Sandell, G. Granozzi. // *J. Chem. Phys.* – 2011. – V. 135. – P. 054706.

УДК 538.9

СТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ФАЗЫ В МАГНОНИОБАТЕ СВИНЦА

А.Р.Лебединская

Канд. физ.-мат. наук, доцент, lebed1989@rambler.ru
ФГБОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе представлены результаты рентгеноструктурного исследования монокристаллов магнониобата свинца (PMN), проведенного при температурах (103 К, 183 К, 203 К) без приложения внешнего электрического поля. Полученные результаты позволяют говорить о существовании согласованных поворотов кислородных октаэдров в пределах наноразмерных областей в кристалле магнониобата свинца при температурах исследования.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик-релаксор, перовскит, атомные смещения, магнониобат свинца, монокристалл, низкая температура.

Релаксорные сегнетоэлектрики были открыты более пятидесяти лет назад и с тех пор научный интерес к ним не ослабевает благодаря их уникальным свойствам, широко используемых, в частности, в электронике [1,2]. Не смотря на большое количество исследований по данным объектам полного понимания происходящих микроскопических механизмов, которые обуславливают прикладные макроскопические свойства, не достигнуто.

Большинство релаксоров являются смешанными кубическими перовскитоподобными кристаллами, специфика свойств которых обусловлена наблюдаемым в них структурным разупорядочением [3].

Рентгеноструктурные исследования монокристаллов магнониобата свинца проводились при температурах: 103 К, 183 К, 203 К со стабилизацией температуры с точностью ± 0.5 К. Изменение атомных параметров оценивались в сравнении с их значениями, зафиксированными при комнатной температуре 293 К (контроль).

В таблице представлены определенные в ходе исследования параметры кубической ячейки PMN при разных температурах.

Оценка изменений атомной структуры PMN с понижением температуры по сравнению со структурой PMN при комнатной температуре была проведена на основе анализа зависимостей отношения модулей структурных амплитуд, измеренных при различных температурных режимах ($T=203\text{K}, 183\text{K}, 103\text{K}$) от $(\text{Sin}\theta)/\lambda, \text{Å}^{-1}$, где θ - угол рассеяния, а λ - длина волны рентгеновского излучения.

Параметры кубической ячейки PMN при разных температурах исследования, группа симметрии $R\bar{3}m$

Параметры ячейки	Температура			
	T=293 К	T=203 К	T=183 К	T=103 К
a, Å	4.033(2)	4.029(3)	4.028(1)	4.034(1)
b, Å	4.034(1)	4.030(2)	4.028(1)	4.035(1)
c, Å	4.034(7)	4.029(3)	4.028(1)	4.033(1)
$\alpha, ^\circ$	90.0(1)	90.17(5)	90.0(1)	90.0(1)
$\beta, ^\circ$	90.0(1)	90.04(5)	90.0(1)	90.0(1)
$\gamma, ^\circ$	90.0(1)	90.04(5)	90.0(1)	90.0(1)

Анализ результатов проведенного исследования и рассчитанные позиционные и тепловые параметры всех атомов PMN позволяет сформулировать следующую вероятную модель поведения атомов свинца, типа В (Mg/Nb) и кислорода: полученные значения атомных смещений укладываются в модель согласованных поворотов кислородных октаэдров, имеющих место в ограниченных фрагментах кристалла (до 10 нм). Из-за малости функций атомного рассеяния кислорода по сравнению с функциями атомного рассеяния более тяжелых атомов Pb, Mg, Nb наблюдать соответствующие сверхструктурные рефлексы в рентгеновской дифракции чрезвычайно сложно.

Данные выводы не противоречат ранее полученным результатам работ других исследователей [3-5].

Литература

1. Смоленский, Г.А. Диэлектрическая поляризация и потери некоторых соединений сложного состава / Г.А. Смоленский, А.И. Аграновская // ЖТФ – 1958. - Т.28. - № 7. - с.1491-1429.
2. Александров, С.Е. Сегнетоэлектрики-релаксоры как материалы для ИК фотоприемников / С.Е. Александров, Г.А. Гаврилов, А.А. Капралов, Е.П. Смирнова, Г.Ю. Сотникова, А.В. Сотников // Журнал технической физики – 2004. - том 74 - вып. 9. - с.72-76.
3. Viehland, D. Freezing of the polarization fluctuations in lead magnesium niobate relaxors / D.Viehland, S. J. Jang, E. Cross // J. Appl. Phys. – 1990. - V.68 - №6. - P.2916-2921.
4. Vakhrushev, S.B. Glassy phenomena in perovskite-like crystals / S.B. Vakhrushev, B.E. Kvjatkovskiy, A.A. Naberezhnov, N.M. Okuneva, B.P. Tolerverg // Ferroelectrics – 1989. - V. 90 - P. 173-176.
5. Bokov, A. A. Recent progress in relaxor ferroelectrics with perovskite structure / A. A. Bokov, Z.-G. YE // Journal of materials science. – 2006. – V. 41. - P. 31-52.

УДК 538.95

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ИМПЕДАНСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКАХ

М.А.Луговая¹, Е.И. Петрова², Н.А. Швецова³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Аспирант, lugovaya_maria@mail.ru

²Научный сотрудник, harigamypeople@gmail.com

³Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе выполнено исследование релаксационных процессов, происходящих в сегнетопьезокерамике под действием постоянного электрического поля. Для измерения временных зависимостей комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров сегнетопьезокерамических образцов использован модуль сбора данных сканирования по времени программы анализа пьезорезонансных спектров PRAP. Проведен

сравнительный анализ различных методов характеристики и предложена физическая интерпретация полученных результатов.

Ключевые слова: сегнетопьезокерамика, резонансные спектры, импедансная спектроскопия, релаксационные процессы.

Изучение переходных процессов и релаксационных явлений в сегнетопьезокерамиках при внешних воздействиях является одной из важных практических задач физического материаловедения [1]. Исследование полевых и температурных зависимостей упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров сегнетопьезокерамических материалов представляет существенную трудность из-за временных изменений параметров, вызванных переходными процессами (релаксация объемного заряда, доменно-ориентационные процессы). Стандартные методы нахождения констант пьезоэлектрических материалов [2], не учитывающие несинфазный отклик материала на внешние воздействия, малопригодны для исследования процессов релаксации при внешних воздействиях в сегнетокерамиках.

В настоящей работе релаксационные процессы, происходящие в пьезокерамике при воздействии постоянного электрического поля, были исследованы с использованием метода импедансной спектроскопии [3].

Для измерения временных зависимостей комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров сегнетопьезокерамических образцов был использован модуль сбора данных сканирования по времени программы анализа пьезорезонансных спектров PRAP [4].

В качестве объектов исследования были выбраны «сегнетомягкие» керамики на основе твердых растворов системы ЦТС. Измерения проводились с использованием анализатора импеданса Agilent 4294A со встроенным модулем подачи постоянного электрического напряжения.

На рисунке приведен пример импедансных спектров, измеренных на двух резонансных модах (толщинная и радиальная моды) пьезокерамического образца.

Последовательное измерение с заданным временным интервалом и обработка импедансных спектров позволяет получить временные зависимости соответствующих комплексных параметров экспериментального образца, обусловленные релаксационными процессами в сегнетопьезокерамике под действием электрического поля.

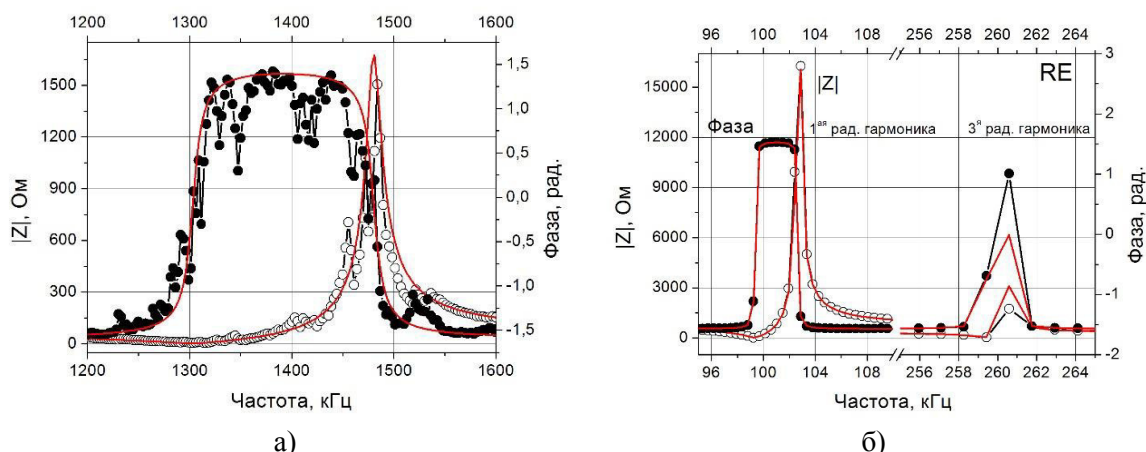


Рисунок. Экспериментальные частотные зависимости импеданса и фазы, а также аппроксимации PRAP, выполненные для толщинной моды (а) и радиальной моды (б) колебаний пьезокерамического элемента в форме тонкого диска

Результаты сравнения различных методов характеристики сегнетопьезокерамических материалов при внешних воздействиях показали, что разработанный метод импедансной спектроскопии позволяет получить более точные

данные о переходных процессах в сегнетопьезокерамике с учетом несинфазного отклика материала на внешние воздействия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Turik A.V. Electromechanical switching processes in ferroelectrics-ferroelastics: theory and experiment / A.V. Turik, L.A. Reznitchenko, A.N. Rybjanets, S.I. Dudkina, A.A. Yesis, S.A. Turik // *Ferroelectrics*. - 2004. - V. 307. - Issue 1. - P. 59-65.
2. IEEE Standard on piezoelectricity. – ANSI/IEEE Std. 1987. 176 p.
3. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program). TASI Technical Software Inc. (www.tasitechnical.com).
4. Rybjanets A.N. Characterization Techniques for Piezoelectric Materials and Devices / A.N. Rybjanets, A.A. Naumenko, N.A. Shvetsova // Nova Science Publishers Inc. - 2013. - Chapter 1. - P. 275-308.

UDC 666.655

EFFECT OF SINTERING METHODS ON THE FUNCTIONAL CHARACTERISTICS OF THE FERROELECTRIC PIEZOCERAMIC MATERIAL OF THE PZT SYSTEM

M.A. Marakhovskiy¹, A.A. Panich², B.A. Marakhovskiy³

¹ Cand. tech. of science, marmisha@mail.ru

²Dr. tech. of science, professor, rctt.rctt@mail.ru

³Postgraduate, demuer@mail.ru

FSAEI HE «South Federal University»

In this paper, we investigated the possibility of adjusting the functional parameters of a ferroelectric piezoceramic material by changing the technological parameters in the manufacturing process. Changing the structure of the ceramic frame of piezoelectric ceramics allows to increase the values of its density, piezoelectric modules, mechanical quality factor.

Keywords: piezoceramic material, technological factor, sintering method, hot pressing, spark plasma sintering.

In the piezoelectric instrument making of great practical interest are ferroelectrically hard materials designed to operate in power modes. Ferroelectronic materials are resistant to external influences and have a high temperature stability of the parameters, which allows them to be used in various devices, including those designed for extreme conditions (accelerometers, piezoelectric motors, piezotransformers) [1]. To expand the scope of application of existing piezoceramic materials of different compositions (PZT-8, APC-840, APC-841, PCR-8 [2]) the question of increasing their functional parameters is relevant. This problem can be solved not only by creating new chemical compositions, but also by improving the technology of manufacturing piezoceramics and optimization of technological factors. Correction of future electrophysical parameters of ceramics is possible at the sintering stage, since mechanical and electrophysical properties are inextricably linked with each other.

In the present work we investigated the possibility of varying the functional parameters of $\text{PbZr}_{0.44}\text{Ti}_{0.44}(\text{Mn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.06}(\text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})_{0.06}\text{O}_3$ signature the piezo by changing the modes and methods of sintering [3].

In the process of the study, various sintering methods were tested: traditional sintering in a chamber furnace, hot pressing method, hot sintering with agglomeration in a chamber furnace, and the method of spark plasma sintering (SPS).

The quality of the sintered piezoelectric ceramics was estimated by the results of X-ray phase analysis, scanning electron microscopy and density values.

The study found that the sintering of piezoceramics by hot pressing and SPS leads to an increase in the density by 5% and the piezoelectric module (d_{31}) by 60%. In addition to increasing the values of the main parameters, the hot pressing method allows to reduce the sintering temperature by 70 °C, and the SPS method reduces the sintering temperature by 250 °C and reduces the duration of the sintering process up to 50 times! All these advantages of the SPS method reduce energy consumption in the manufacture of piezoceramics and reduce its cost.

Referenses

1. Nesterov, A. A. [Text]: Proceedings of the international scientific and practical conference "Fundamental problems of piezoelectric instrument-making" / T. G. Lupeiko, A. A. Nesterov - Rostov-on-don: Rostov state University Publ., 1999.- vol. 1. - p. 254-261.
2. Physics of active dielectrics / Yu. M. Poplavko [et al.] – R/D. Ed. SFU, 2009. - 480 sec.
3. Nishida M., Ouchi H. Improvements in and relating to ceramic compositions // GB patent N 1376013. – Publ. 04.12.1974.

УДК: 537.227

РЕЛАКСАЦИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОПОРИСТОГО ДИОКСИДА КРЕМНИЯ

С.Д. Миловидова¹, О.В. Рогазинская², Б.М.Даринский³, Е.С. Ничуговская⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, milovidova@Phys.vsu.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, olamil@mail.ru

³Д-р. физ.-мат. наук, профессор, darinskii@mail.ru

⁴Магистр, nichugovskaya_e@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

В работе представлены результаты исследования влияния частоты на ϵ и $\text{tg}\delta$ нанопористого диоксида кремния. Показано уменьшение этих параметров с ростом частоты измерительного поля и их рост с увеличением влажности. Обсуждается возможность создания сегнетоэлектрического состояния воды в наноразмерном состоянии.

Ключевые слова: нанопоры, молекулы воды, сегнетоэлектричество.

В работе [1] обнаружено, что свойства нанопористых матриц с сегнетоэлектриками в большой степени зависят от влажности окружающей среды.

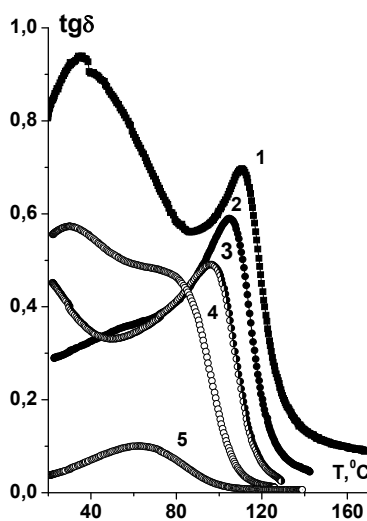


Рисунок. Зависимость $\text{tg}\delta$ от температуры образца нанопористого SiO_2 при различных частотах: 1- 0,12; 2-0,5; 3-1,0; 4-10; 5-100 кГц

Проведенные исследования температурной зависимости ϵ образцов незаполненных сегнетоэлектриками нанопористого диоксида кремния показали значительное увеличение ϵ от $10 \div 20$ единиц до 10^3 с ростом влажности от 0 до $\sim 80\%$ во всем диапазоне температур от комнатных $+150^\circ\text{C}$ [2]. Рост значений ϵ наблюдается и с уменьшением частоты измерительного поля. На рисунке представлены температурные зависимости $\text{tg}\delta$. С ростом частоты поля от 0,1 до 100 кГц диэлектрические потери уменьшаются почти на порядок.

При комнатных температурах наблюдается рост или уменьшение ϵ со временем в зависимости от влажности окружающей среды. Но, если на кварцевую подложку нанести каплю воды, то ϵ на глазах увеличивается почти в 2 раза.

Полученные результаты могут быть связаны с появлением суперпараэлектрического или сегнетоэлектрического состояния воды в нанопорах SiO_2 .

Литература

1. Nguyen H.T.. Electrophysical Properties of Matrix Composites Nanocrystalline Cellulose - Triglycine Sulfate. / S.D. Milovidova, A. С. Сидоркин, О. В. Рогазинская //Ferroelectrics .- 2017. - Vol. 512. N 1. - P. 71 - 76.

2. Миловидова С.Д. Диэлектрические свойства нанокompозита диоксид кремния-вода.// О.В. Рогазинская, Б.М. Даринский. Е.С. Ничуговская // Изв. РАН. сер. физ., 2019. - т. 83. - № 9. - с. 1201 - 1204.

УДК: 537.227

ВЛИЯНИЕ ИЗОПРОПАНОЛА НА РЕЛАКСАЦИЮ УНИПОЛЯРНОГО СОСТОЯНИЯ КРИСТАЛЛА ТГС

С.Д. Миловидова¹, О.В. Рогазинская², Б.М. Даринский³

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, milovidova@Phys.vsu.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, olamil@mail.ru

³Д-р. физ.-мат. наук, профессор, darinskii@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

В работе представлены результаты исследования влияния молекул изопропанола на диэлектрическую нелинейность и пироэлектрические свойства кристалла ТГС. Показано возникновение внутренних смещающих полей, которые приводят к стабильности пироэлектрических свойств после тепловых и полевых воздействий разной амплитуды и частоты.

Ключевые слова: диэлектрическая нелинейность, пирокэффициент, внутреннее смещающее поле.

Исследование свойств сегнетоэлектрических материалов продолжает оставаться актуальным направлением физики конденсированного состояния в связи с перспективами их применения в новейших устройствах микро-, наноэлектроники и телекоммуникаций.

Изучение свойств объемных кристаллов является одним из необходимых и важных условий для создания различных нанокompозитов на их основе.

Номинально чистые кристаллы ТГС имеют нестабильную доменную структуру, что мешает их практическому применению. Для создания устойчивого к различным воздействиям состояния, т.е. униполярности, кристаллов ТГС в них при выращивании вводят специальные примеси или облучают образцы рентгеновскими лучами [1].

Как показали наши исследования [2] создать униполярное состояние можно путем изменения водородных связей путем выращивания кристалла ТГС при отрицательных температурах.

В данной работе приводятся результаты исследования пироэлектрических свойств кристаллов ТГС, выращенных при отрицательной температуре из водного рас-

творя номинально чистых и примесью молекул изопропанола по методике, описанной нами в [3].

Пироэлектрические исследования проводились в режиме непрерывного нагрева. Униполярность оценивалась по смещению петель диэлектрического гистерезиса и путем непосредственного наблюдения доменной структуры.

На рис. представлены температурные зависимости пирокоэффициента для номинально чистого ТГС, выращенного при отрицательных температурах (а). Ростовая униполярность, которая обнаруживалась по смещению петель гистерезиса в электрическом поле частотой 50 Гц ($E_{см} \sim 50$ В/см) [2], исчезает после перевода образца через точку Кюри. Пироэлектрический коэффициент при повторном измерении практически равен (кривая 2 рис. а).

В образцах же кристаллах ТГС + ИПС значения пирокоэффициента γ значительно больше во всем температурном интервале (кривая 1 рис. б). При повторных измерениях значения γ незначительно уменьшаются (кривая 2 рис. б).

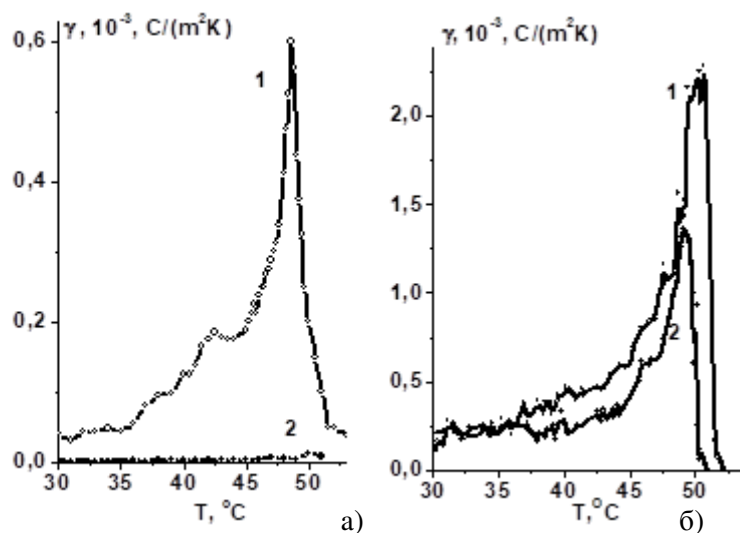


Рисунок. Зависимость пирокоэффициента от температуры чистого кристалла ТГС (а) и ТГС с изопропанолом (б): 1 – первое измерение, 2 - повторное измерение

Молекулы изопропанола имеют большие размеры по сравнению с молекулами воды и являются диполями, как и молекулы L, α – аланина [1]. Они также могут замещать часть молекул глицина, создавая в кристалле механические и электрические напряжения приводящие к появлению внутреннего смещающего поля, к стабилизации доменной структуры и как следствие пироэлектрических свойств, что и наблюдается в исследуемом кристалле ТГС с изопропанолом.

Литература

1. Lines M., Glass A. *Ferroelectrics and related materials*.// M., "Mir", 1981. - 736 p.
2. Rogazinskaya O.V. *Electrophysic Properties of TGS Crystals Grown at the Temperatures Below 0°C*./ S.D. Milovidova, A.S. Sidorkin, O.B. Yatsenko, A.N. Yuryev, and Zh.D. Stekhanovaa // *Ferroelectrics*, 2004. - V. 307. - P. 251 - 254.
3. Миловидова С.Д.,. Сегнетоэлектрические свойства легированных кристаллов ТГС, выращенных при отрицательных температурах/ Н.Г.Бабичева, О.В. Рогазинская, А.С. Сидоркин // *Физика твердого тела*, 2009. - Т. 51. - Вып.7. - С. 1433 - 1435.

**STUDIES OF THE ION SUBSTITUTION EFFECT ON THE MAGNETIC PHASE
TRANSITION TEMPERATURE OF $\text{BiFeO}_3\text{-ATiO}_3$ ($A=\text{Pb, Sr}$) SOLID SOLUTION
MULTIFERROICS**

S.P. Kubrin¹, I.P. Raevski², M.D. Miruschenko³, E.A. Bikyashev⁴, M.A. Malitskaya⁵, I.N. Zakharchenko⁶, S.I. Raevskaya⁷, V.V. Titov⁸, Jian Zhuang⁹

¹PhD, senior research associate, stasskp@gmail.com

²Dr. phys-mat.sci., professor, igorraevsky@gmail.com

³Student, miruschenko98@gmail.com

⁴PhD, associate professor, eabikyashev@yandex.ru

⁵PhD, senior research associate, mamalitskaya@sfedu.ru

⁶PhD, senior research associate, zinik46@mail.ru

⁷PhD, associate professor, siraevskaya@sfedu.ru

⁸PhD, research associate, vvtitov@sfedu.ru

Southern Federal University, 344090, Rostov-on-Don, Russia

⁹PhD, associate professor, jzhuang@xjtu.edu.cn

Xi'an Jiaotong University, 710049, Xi'an, People's Republic of China

Mossbauer and magnetization studies of $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{ATiO}_3$ ($A=\text{Pb, Sr}$) solid solution compositions prepared using solid phase reactions route have been carried out. Temperature T_N of magnetic phase transition for $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{PbTiO}_3$ is about 150 K, while for $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{SrTiO}_3$ it is only ≈ 20 K. This dramatic difference in T_N values is ascribed to additional contribution of the magnetic superexchange between Fe^{3+} ions via the empty 6p states of Bi^{3+} and Pb^{2+} ions to the overall superexchange in accord with theoretical predictions.

Keywords: multiferroics, Mossbauer effect, BiFeO_3 , magnetic superexchange.

BiFeO_3 is the most widely studied multiferroic due to high temperatures of both ferroelectric and magnetic phase transitions. Recently a possibility of magnetic superexchange between Fe^{3+} ions in BiFeO_3 via the empty 6p states of Bi^{3+} was predicted theoretically [1]. Earlier we showed the role of Pb^{2+} ions which also possess the empty 6p states, in the enhancement of the magnetic phase transition temperature T_N in perovskite $\text{Pb}_{1-x}\text{A}_x\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ ($A=\text{Ca, Ba}$) solid solutions [2, 3]. However this mechanism of magnetic superexchange seems to become noticeable only at high enough dilution of the Fe-sublattice, i.e. in solid solutions.

The $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{ATiO}_3$ ($A=\text{Pb, Sr}$) solid solution compositions were prepared using solid phase reactions route. The XRD study revealed that the samples are single phase and possess the perovskite structure. Room temperature Mossbauer spectra of both compositions consist of the quadrupole-split double lines. The main reason of quadrupole splitting in such systems is a compositional disorder in B-sublattice. All spectra contain 2 or 3 doublets with different values of quadrupole splitting. The isomer shift values of doublets correspond to the Fe^{3+} ions in oxygen octahedron. The presence of 2 or 3 doublets indicates that Fe^{3+} has 2 or 3 different environments in the lattice which may be a fingerprint of B-cations short-range ordering or clusterization [4]. To estimate the temperature of magnetic phase transition (T_N) we performed the measurement of Mossbauer spectrum line intensity I_m under subsequent temperature lowering. Near magnetic phase transition the Mossbauer spectrum transforms from doublet into sextet and I_m decreases dramatically. Mossbauer studies have shown that while for $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{PbTiO}_3$ the T_N value is about 150 K, for $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{SrTiO}_3$ it is only ≈ 20 K. This dramatic difference in T_N values seems to be due to additional contribution of the superexchange between Fe^{3+} ions via the empty 6p states of Bi^{3+} and Pb^{2+} ions to the overall superexchange in accord with predictions of De Sousa et al. for BiFeO_3 [1] and the experimental findings for $\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ -based solid solutions [2, 3].

For both compositions magnetization M studies in the 5 K- 200 K range revealed only a maximum at 20-25 K in the zero-field cooling mode. In the field-cooled mode this maximum was not observed. Such behavior is typical of spin glasses. In $\text{PbFe}^{3+}_{1/2}\text{B}^{5+}_{1/2}\text{O}_3$

($B^{5+}=\text{Nb, Ta}$) perovskite multiferroics a spin-glass state is known to coexist at low temperatures with the antiferromagnetic state [2]. The absence of the $M(T)$ anomaly at around 150 K for $0.5\text{BiFeO}_3\text{-}0.5\text{PbTiO}_3$ composition seems to be due to the strong diffusion of this anomaly. Similar "disappearance" of the $M(T)$ anomaly corresponding to antiferromagnetic phase transition was observed, e.g. for some compositions of the $\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ and $\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ solid solutions [5, 6].

This work was supported in part by RFBR project 19-52-53030 GFEN_a and by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (research projects 3.1649.2017/4.6 and 3.5346.2017/BP).

References

1. De Sousa R. Theory of spin-orbit enhanced electric-field control of magnetism in multiferroic BiFeO_3 / R. De Sousa, M. Allen, M. Cazayous, Phys. Rev. Lett. – 2013. – V. 110 – № 26. – P.267202-1 – 267202-5.

2. Raevski I.P. Experimental evidence of the crucial role of nonmagnetic Pb cations in the enhancement of the Néel temperature in perovskite $\text{Pb}_{1-x}\text{Ba}_x\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ / I.P. Raevski, S.P. Kubrin, S.I. Raevskaya, et al. // Phys. Rev. B – 2009. – V.80. – № 2. P.024108-1 -024108-6.

3. Raevski I.P. Studies of ferroelectric and magnetic phase transitions in $\text{Pb}_{1-x}\text{A}_x\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$ (A-Ca, Ba) solid solutions / I.P. Raevski, S.P. Kubrin, S.I. Raevskaya, et al. // Ferroelectrics 2010. – V. 398. – № 1. – P. 16-25.

4. Raevski I.P. Magnetic Properties of $\text{PbFe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2}\text{O}_3$: Mossbauer spectroscopy and first principles calculations / I. P. Raevski, S. P. Kubrin, S. I. Raevskaya, et al. // Phys.Rev.B. – 2012. – V. 85. – № 22. – P. 224412 –1 – 224412 –5.

5. Mitoseriu L. Magnetic properties of $\text{PbFe}_{2/3}\text{W}_{1/3}\text{O}_3\text{-PbTiO}_3$ solid solutions / L. Mitoseriu, D. Marre, A. S. Siri, P. Nanni, Appl. Phys. Lett. – 2003. – V. 83. – № 26. – P. 5509 – 5511.

6. Singh S.P. Ferroic transitions in the multiferroic $(1-x)\text{Pb}(\text{Fe}_{1/2}\text{Nb}_{1/2})\text{O}_3\text{-}x\text{PbTiO}_3$ system and its phase diagram / S.P. Singh, S.M. Yusuf, S. Yoon, S. Baik, N. Shin, D. Pandey // Acta Mater. – 2010. – V. 58. – P. 5381–5392.

УДК 537.9

ФОТОДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПЛЕНКАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА-ПОЛУПРОВОДНИКА $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$

И.М. Морсаков¹, А.В. Солнышкин², А.Иванов³, А.Н. Белов⁴

¹Соискатель, i.morsakov@gmail.com

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, a.solnyshkin@mail.ru

³Аспирант, ars@mail.ru

⁴Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, nanointech@mail.ru

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

В данной работе рассмотрены диэлектрические свойства пленок $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ с учетом воздействия излучения видимого диапазона. Показано, что постоянная подсветка приводит к увеличению диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь. Установлено наличие сдвига максимума температурной зависимости диэлектрической проницаемости в высокотемпературную область под действием света.

Ключевые слова: фотодиэлектрический эффект, сегнетоэлектрическая пленка.

Пленки сегнетоэлектрика-полупроводника титогипофосфата олова $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ являются перспективными материалами для микроэлектронных применений. Этот материал в плёночном исполнении является удобным для эксперимента с технической точки зрения, что, прежде всего, связано с наличием ярко выраженных сегнетоэлектрических и пьезоэлектрических свойств. Кроме того, он исключительно удобен как объект для исследования влияния электронной подсистемы на сегнетоэлектрические и диэлектрические характеристики плёночных структур. Объект позволяет изменять concentra-

цию неравновесных электронов в широких пределах путём освещения, так как обладает фотопроводимостью в видимой области спектра. Целью настоящей работы являлось исследование влияния неравновесной электронной подсистемы, возбуждаемой электромагнитным излучением, на диэлектрический отклик пленок $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$.

Объектом исследования являлись сегнетоэлектрические пленки $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$, полученные золь-гель методом. Исследовались пленки на алюминиевой подложке с напыленными алюминиевыми электродами. Несмотря на наличие верхнего алюминиевого электрода, образцы пленок являются фоточувствительными объектами. В интервале температур $20^\circ \div 120^\circ\text{C}$ пленки сегнетоэлектрика-полупроводника $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ обнаруживают нестационарный фотовольтаический отклик при воздействии света видимого диапазона при собственном и несобственном поглощении. Максимум фотовольтаического отклика приходится на длину волны ~ 510 нм при комнатной температуре, что соответствует максимуму стационарного фотоэлектрического тока и краю собственного поглощения материала $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$. При этом фотовольтаический отклик наблюдается в достаточно широком спектральном диапазоне.

В работе получены вольт-фарадные характеристики пленок $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ в отсутствие и при наличии постоянной подсветки. Измерения выполнены с помощью измерителя иммитанса E7-20. В качестве источников излучения использованы лампа накаливания и светодиоды, излучающие свет с различной длиной волны. На рис. приведены вольт-фарадные характеристики (ВФХ) пленок $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$.

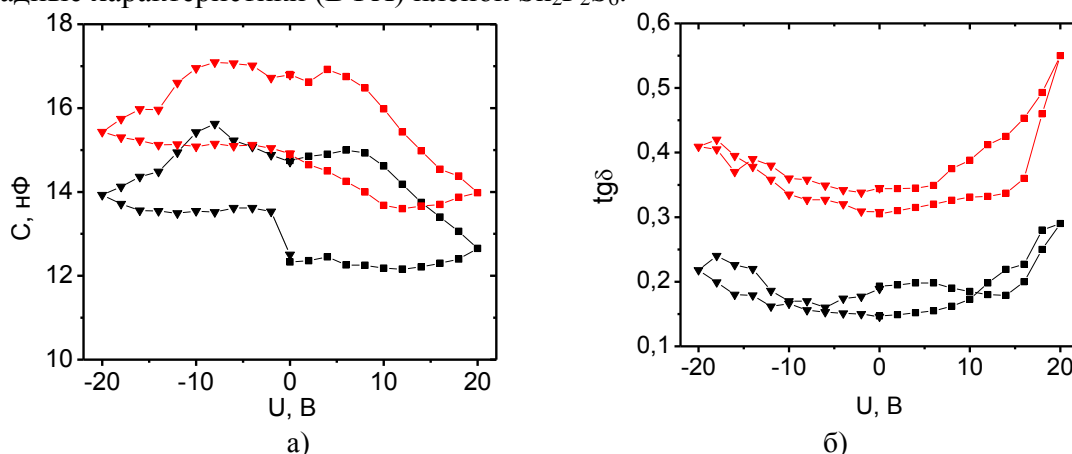


Рисунок. Зависимости электрической емкости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь от внешнего смещающего напряжения. Нижние кривые на графиках – в отсутствие освещения; б – при воздействии стационарного светового потока лампы накаливания

Как следует из приведенных ВФХ (рис. а), зависимости $C(U)$ являются гистерезисными и характерны для пленок, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами. Воздействие стационарного потока излучения приводит к росту значений емкости пленок $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$, оставляя неизменным характер зависимостей $C(U)$. Аналогичный рост характерен и для тангенса угла диэлектрических потерь при воздействии света. Увеличение емкости и диэлектрических потерь связано с увеличением концентрации свободных носителей в пленках тиогиподифосфата олова под действием света.

В работе получены температурные зависимости электрической емкости и тангенса угла диэлектрических потерь как в отсутствие постоянной подсветки, так и при воздействии стационарных световых потоков. Температурные зависимости емкости образцов обнаруживают максимум диэлектрической проницаемости исследуемых пленок при температуре $T_{\text{max } \epsilon} \approx 70^\circ\text{C}$. Данная температура близка к температуре фазового перехода объемных образцов монокристаллов $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$ ($T_c = 66^\circ\text{C}$). При подсветке постоянным излучением видимого диапазона емкость заметно возрастает. Положение максимума диэлектрической проницаемости на температурной зависимости смещается в область более высоких температур на $\sim 5^\circ\text{C}$ при воздействии света с длиной волны 520 нм,

что приблизительно соответствует краю собственного поглощения. Результаты обсуждаются в рамках влияния электронной подсистемы на изменение спонтанной поляризации пленок $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{S}_6$.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный номер проекта RFMEFI57517X0129).

УДК 537.9

СВОЙСТВА СЛОИСТЫХ ПЕРОВСКИТОПОДОБНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ТИТАНАТА БАРИЯ

А.С.Сидоркин¹, Y.Gagou², P.Saint-Gregoire³, Л.П.Нестеренко⁴,
Н.Г.Поправко⁵, А.Ю.Пахомов⁶

¹Д -р физ.-мат. наук, профессор, sidorkin@phys.vsu.ru

²Lecturer

³Professor

⁴Канд. физ.-мат. наук, доцент, lolita122@mail.ru

⁵Канд. физ.-мат. наук, нс, n-popravko@yandex.ru

⁶Канд. физ.-мат. наук, нс, alexeypakhomovvv@gmail.com

^{1,4,5,6}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»

²LPMC, Universite de Picardie Jules Verne

³ICGM, C2M, Laboratory MIPA, Department of Sciences and Arts, University of Nimes

Экспериментально исследованы диэлектрические и переполяризационные свойства слоистых структур на основе титаната бария: $\text{SrTiO}_3/\text{BaTiO}_3/\text{SrTiO}_3$. Установлено, что наблюдается значительное смещение точки фазового перехода в сторону высоких температур по сравнению с однокомпонентным BaTiO_3 . По петлям диэлектрического гистерезиса определены значения спонтанной поляризации и коэрцитивного поля.

Ключевые слова: титанат бария, тонкие пленки, сегнетоэлектрический фазовый переход.

В последнее время стали интенсивно изучаться эпитаксиальные наномасштабные гетероструктуры на основе сегнетоэлектриков вследствие их потенциального практического применения в различных устройствах микро и наноэлектроники. Это связано с тем, что получаемые многокомпонентные структуры показывают лучшие свойства по сравнению с однокомпонентными и при этом есть возможность управлять этими свойствами [1,2]. Так создание слоистых тонкопленочных структур с использованием титаната бария BaTiO_3 и другого перовскитоподобного материала приводит к значительному изменению диэлектрических, пьезоэлектрических и сегнетоэлектрических свойств в противоположность однокомпонентному материалу в объемном или тонкопленочном виде.

Целью данной работы было экспериментальное исследование диэлектрических свойств слоистых структур с чередованием титаната стронция SrTiO_3 и титаната бария BaTiO_3 . Исследуемые образцы были получены при помощи импульсного лазерного напыления компонентов и представляли собой три последовательно нанесенных эпитаксиальных слоя титаната стронция, титаната бария, титаната стронция $\text{SrTiO}_3/\text{BaTiO}_3/\text{SrTiO}_3$, которые были синтезированы на монокристаллической подложке ST-Nb с проводящим оксидным подслоем из LaSrCoO_3 в качестве нижнего электрода. Толщина сегнетоактивного слоя BaTiO_3 в данной слоистой структуре составляла 7,51 нм. Для проведения диэлектрических измерений в системе металл-диэлектрик-металл на её поверхность были нанесены Pt электроды, также используя импульсное лазерное напыление.

В указанных слоистых структурах была исследована структура, температурная зависимость диэлектрической проницаемости ϵ , температурные зависимости поляризации P_s и коэрцитивного поля E_c . Рентгеноструктурные исследования показали что

сформированные слои находятся в полной эпитаксии с подложкой, а также подтверждают тот факт, что сформированные многослойные структуры имеют кристаллическую решетку с параметром, который находится между значениями решеток BaTiO₃ и SrTiO₃. Сам параметр решетки исследуемых слоистых структур составляет 3,987 Å.

Исследования температурной зависимости диэлектрической проницаемости ϵ показывают наличие размытого максимума в температурном интервале от 310 °C до 320 °C, значение ϵ которого составило около 700 и второго дополнительного максимума в интервале от 100 °C до 150 °C со значением ϵ порядка 40, что составляет 6 % от первого максимума. Причем сегнетоэлектрический фазовый переход в исследуемых слоистых структурах происходит именно в температурном интервале 310-320 °C. Это подтверждается и температурными зависимостями P_s и E_c , показанными на рисунке, исходя из которых поляризация и коэрцитивное поле становятся равными нулю после 320 °C.

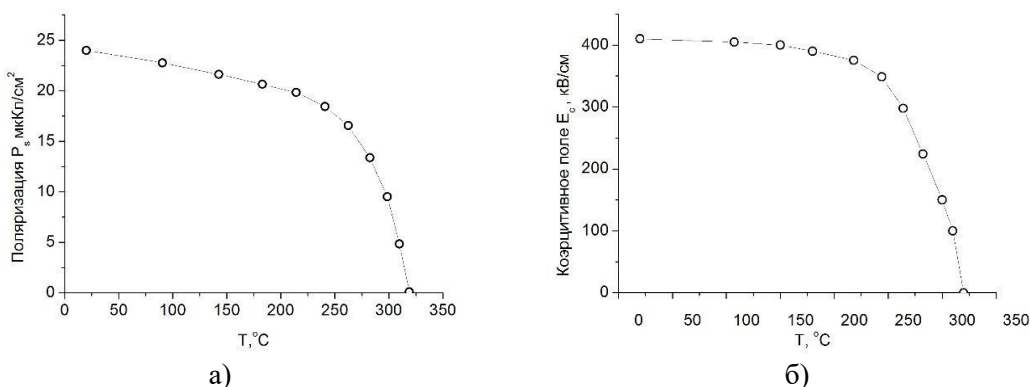


Рисунок. Температурная зависимость спонтанной поляризации (а) и коэрцитивного поля (б) слоистой тонкопленочной структуры SrTiO₃/BaTiO₃/SrTiO₃

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 17-72-20105.

Литература

1. Shimuta T. Enhancement of remanent polarization in epitaxial BaTiO₃/SrTiO₃ superlattices with “asymmetric” structure / T. Shimuta, O. Nakagawara, T. Makino and S. Arai // J. Appl. Phys. – 2002. – V. 91 – P. 2290–2294.
2. El Marssi M. Ferroelectric BaTiO₃/BaZrO₃ superlattices: X-ray diffraction, Raman spectroscopy, and polarization hysteresis loops / M. El Marssi, Y. Gagou, J. Belhadi, F. De Guerville, Y.I. Yuzyuk and I.P. Raevski // J. Appl. Phys. – 2010. - 108:084104

UDC 53.043

RELAXATION OF THE STRUCTURE OF THIN PZT FILMS DURING RAPID THERMAL ANNEALING

V.V. Petrov¹, V.V. Polyakov², Yu.N. Varzarev³, A.A. Rozhko⁴, A.S. Kamentsev⁵

¹Dr. tech. Sciences, Professor, vvp2005@inbox.ru

²Cand. tech. Sciences, Associate Professor, polvadim@yandex.ru

³Cand. tech. Sciences, lecturer, varzarevyuv@sfedu.ru

⁴Research engineer, tolstanton@yandex.ru

⁵Graduate student, dreorozhko@mail.ru

Southern Federal University, Scientific-educational center "Microsystem engineering and multisensory monitoring systems", Taganrog, Russia

This paper presents the results of the influence of rapid thermal annealing (RTA) on the crystal structure of lead zirconate titanate (PZT) films formed by the method of high-frequency reactive plas-

ma spraying. It is shown that with an increase in the temperature of the RTA from 500 to 700 °C, the number of crystallites growing in the (110) direction increases.

Keywords: lead zirconate titanate, crystal structure, rapid thermal annealing.

Thin ferroelectric PZT films of Pb (Zr, Ti)O₃ composition were deposited on silicon substrates on the “Plasma-80» installation using high-frequency reactive plasma spraying in an oxygen atmosphere with a pressure of 0.51 Torr [1, 2]. The thickness of the PZT film applied to the silicon substrate was $1.0 \pm 0.1 \mu\text{m}$. In the future, the samples were divided into several parts. One part of the samples was subjected to rapid thermal annealing (RTA) with halogen lamps in the ITO-18 installation at temperatures of 500, 600 and 700 °C and annealing times of 30 s, and a number of the samples remained without exposure to RTA.

Using X-ray phase analysis, it was found that the films that did not undergo RTA have a PZT phase with a predominant crystallite growth in the (110) and (001) directions. And in the films that underwent RTA, the crystal structure changed, namely, the maximum of the peak of the perovskite phase (001) shifted towards smaller angles 2θ , and the maximum of peak (110), conversely, shifted towards larger angles 2θ , as shown in the table. These results indicate that at higher RTA temperatures (600 and 700 °C), the transformation of the PZT crystal lattice towards the predominance of the tetragonal phase is observed.

This conclusion is also confirmed by an estimate of the crystallite size of the PZT, which was produced by the Scherer equation, as well as by the ratio of the intensities of the maxima of the $I_{(110)}$ and $I_{(001)}$ peaks, which are presented in the table. The calculation showed that there is an increase in the size of crystallites of the crystallographic orientation (110) and a decrease in the size of crystallites of orientation (001).

Energy dispersive analysis of the film structure showed that the ratio of elements in the Zr / Ti film is 0.36 / 0.64. This fact, according to the PZT phase diagram [3], also indicates the predominance of the ferroelectric tetragonal phase.

Table

The sizes of crystallites PZT

Sample number	Angle 2θ for the maximum of the PZT peak for orientations		PZT crystallite size for orientations		Peak intensity ratio
	(001)	(110)	(001)	(110)	$I_{(110)}/I_{(001)}$
PZT	22,22	31,32	51	12.8	1,2
PZT + RTA 500°C	22,22	31,32	47	20.1	1,2
PZT + RTA 600°C	22,22	31,34	47	30.6	1,3
PZT + RTA 700°C	22,18	31,36	17.6	35.2	1,6

The results were obtained using the equipment of the centers for collective usage “Microsystem Engineering and Integrated Sensory” and “Nanotechnologies” of Southern Federal University.

Thanks to Pavlenko A. V. and Stryukov D. V. for conducting x-ray phase studies.

This work was supported by the RFBR grant No. 18-29-11019.

References

1. Mukhortov V.M., Yuzyuk Yu I. Heterostructures based on nanoscale ferroelectric films: production, properties and applications/ Rostov-on-Don: Southern Scientific Center of RAS, 2008. – 224 c.
2. Kovalenko D.A., Petrov V.V., Klindukhov V.G. Investigation of the influence of technological parameters of the formation of lead zirconate titanate thin films on their structural and electro-physical properties // J. Izvestiya SFedU. Engineering sciences, №9. P.124-132.
3. Shirane G. Suzuki K., Takeda A. Phase transition in solid solution of PbZrO₃ and PbTiO₃ X-ray study//J.Phys.Soc. Japan, 1952. - V. 7. - № 1. - P. 12-18

УПРУГИЕ АНОМАЛИИ В ОБЛАСТИ РАЗМЫТОГО ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА В РЕЛАКСОРНОЙ СЕГНТОПЬЕЗОКЕРАМИКЕ ЦТСЛ

Е.И. Петрова¹, М.А. Луговая², С.А. Щербинин³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Научный сотрудник, harigamypeople@gmail.com

²Аспирант, lugovaya_maria@mail.ru

³Научный сотрудник, step_scherbinin@list.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе представлены результаты исследования аномалий электрофизических параметров прозрачной сегнетоэлектрической керамики системы ЦТСЛ (Х/65/35) вблизи размытого фазового перехода. Получены наборы комплексных диэлектрических, упругих и пьезоэлектрических параметров этих материалов в широком диапазоне частот.

Ключевые слова: фазовый переход, релаксорная сегнетопьезокерамика, упругие константы.

Благодаря своим особым свойствам сегнетоэлектрики с размытым фазовым переходом являются перспективными материалами для применения в различных областях современной техники. Среди известных сегнетоэлектриков с размытым фазовым переходом наибольший практический и теоретический интерес представляет сегнетоэлектрическая керамика системы ЦТСЛ, которая демонстрирует широкий диапазон диэлектрических и пьезоэлектрических параметров и представляет собой уникальный объект для моделирования процессов, происходящих в сегнетоэлектриках с размытым фазовым переходом [1].

Однако, несмотря на длительную историю исследований, комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры сегнетоэлектрической пьезокерамики системы ЦТЛ (Х/65/35) и параметры распространения поверхностных акустических волн в окрестности размытого фазового перехода не были исследованы и опубликованы на сегодняшний день.

В качестве объекта исследования была выбрана сегнетоэлектрическая керамика системы $(\text{Pb}_{1-x}\text{La}_x)(\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})\text{O}_3$ с содержанием лантана $x=6.5 - 8.5\%$. Экспериментальные образцы сегнетоэлектрической керамики ЦТСЛ были изготовлены методом горячего прессования. Плотность полученных образцов керамики ЦТСЛ составила 7.715 г/см^3 . Микроструктурные исследования проводились на полированных и травленых поверхностях образцов с использованием оптического микроскопа NeoPhot-21. Измерения комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров пьезоэлементов проводили на стандартных образцах с использованием импедансного анализатора Agilent 4294A и программы анализа резонансных спектров PRAP [2].

В результате исследования были получены температурные зависимости диэлектрических и акустических параметров, а также наборы комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров керамики ЦТСЛ (6.5/65/35). Обнаружены аномалии в поведении скорости и затухания поверхностных акустических волн (ПАВ) для сегнетоэлектрической керамики ЦТСЛ (7.5/65/35) в окрестности температуры T_d , которая расположена ниже точки Кюри. Эта температура соответствует дополнительным максимумам тангенса угла диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости и (см. рисунок).

В соответствии с общепринятыми представлениями о размытом фазовом переходе в сегнетоэлектрической керамике ЦТСЛ (Х/65/35) обнаруженные аномалии температурных зависимостей диэлектрических параметров и параметров распространения ПАВ в области температуры (T_d), были интерпретированы нами как результат исчез-

новения дальнего сегнетоэлектрического порядка и разрушения наведенного поляризации макродоменного состояния.

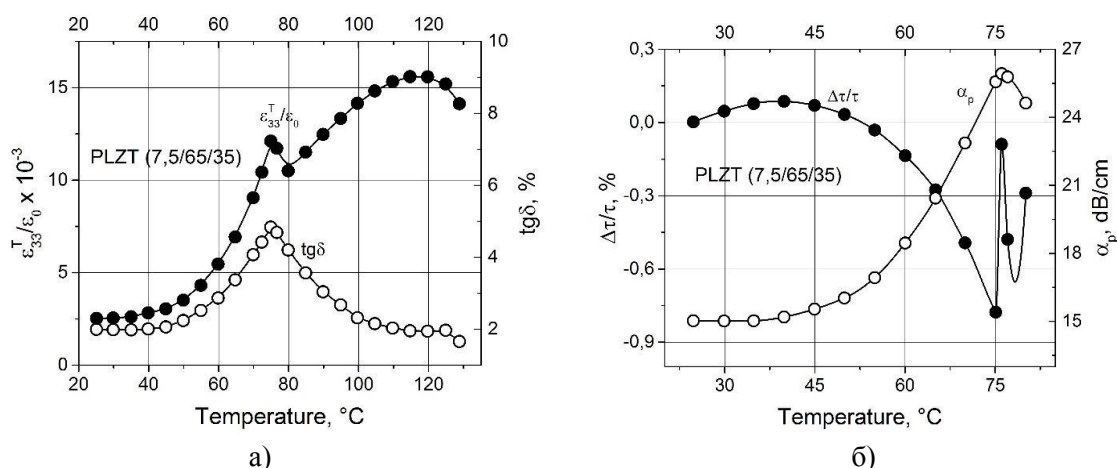


Рисунок. Температурные зависимости диэлектрической проницаемости ($\epsilon_{33}^T / \epsilon_0$), тангенса диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) (а), времени задержки ($\Delta\tau / \tau$) и затухания (α_p) ПАВ (б) для состава $(\text{Pb}_{0,925}\text{La}_{0,075})(\text{Zr}_{0,65}\text{Ti}_{0,35})\text{O}_3$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Pytel K. Dielectric properties of PLZT-X/65/35 ($2 \leq x \leq 13$) under mechanical stress, electric field and temperature loading / Pytel et al. // Condens. Mater Phys. - 2013. - V. 16. - I. 3. - P. 1-6.
2. A. Rybaniets et al., Accurate evaluation of complex material constants of porous piezoelectric ceramics. IEEE Ultrason. Symp. Proc., 1533 (2006).
3. A. Rybaniets, SAW Method for Measuring of Relaxation Process in Ferroelectric Ceramics. Proc. 2007 IEEE Ultrason. Symp. IUS., 1909 (2007).

УДК 538.95

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$

С.А. Гриднев¹, И.И. Попов²

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, s_gridnev@mail.ru

²Аспирант, popovich_vano@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

На частотах от 25 Гц до 200 кГц измерены температурные зависимости диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь в сегнетоэлектрической керамике $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$. Первый максимум диэлектрических потерь связан с сегнетоэлектрическим фазовым переходом. Второй максимум имеет релаксационную природу.

Ключевые слова: титанат бария-стронция, фазовый переход, релаксационный процесс.

На разных частотах измерены температурные зависимости диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ в образцах сегнетоэлектрического твердого раствора $\text{Ba}_{0,8}\text{Sr}_{0,2}\text{TiO}_3$. При $T \approx 70$ °C наблюдается пик ϵ , связанный с фазовым переходом. Определено значение константы Кюри-Вейсса $C_w \approx 10^5$ К, характерное для фазового перехода 1-го рода.

На зависимости $\text{tg}\delta(T)$ наблюдаются два максимума. Температурное положение первого пика $\text{tg}\delta$ практически не зависит от частоты измерительного поля, что свидетельствует о его принадлежности к фазовому переходу. Увеличение частоты измерительного поля с 25 Гц до 1 кГц приводит к уменьшению максимального значения $\text{tg}\delta$. При увеличении скорости нагрева с 1 до 7 °С/мин наблюдается рост высоты максимума $\text{tg}\delta$. Такие зависимости объясняются с помощью низкочастотного флуктуационного механизма диэлектрических потерь при фазовом переходе 1-го рода [1], который предсказывает линейную зависимость высоты пика $\text{tg}\delta$ от скорости нагрева и обратной частоты, что согласуется с результатами эксперимента.

На частоте 200 Гц второй пик $\text{tg}\delta$ достигает максимального значения при $T \approx 79$ °С. Увеличение частоты до 200 кГц приводит к смещению пика в сторону более высоких температур ($T \approx 113$ °С), что свидетельствует о его релаксационной природе. Перестройка температурной зависимости времени релаксации τ в координатах $\ln\tau(1/T)$ даёт линейную зависимость. По тангенсу угла наклона прямой рассчитано значение энергии активации релаксационного процесса $E_a \approx 1,6$ эВ, что близко по значению к энергии активации диффузии кислородных вакансий [2]. Природа релаксационных пиков обсуждается.

Литература

1. Gridnev S.A. // *Ferroelectrics*. 2002. V. 266. P. 171–209.
2. Kang B.S., Choi S.K. // *J. Appl. Phys.* 2003. V. 94. P. 1904–1911.

УДК 537.226

ВАРЬИРОВАНИЕ СОСТАВА ТОНКИХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНОК, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАСПЫЛЕНИЯ: ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

Е.Ю. Каптелов¹, С.В. Сенкевич², И.П. Пронин³, В.А. Вольпяс⁴, А.Б. Козарев⁵

¹С.н.с., к-т физ.-мат. наук, Kaptelov@mail.ioffe.ru

²Н.с., к-т физ.-мат. наук, SenkevichSV@mail.ioffe.ru

³С.н.с., д-р физ.-мат. наук, Petrovich@mail.ioffe.ru

⁴Доцент, к-т физ.-мат. наук, volpyas@yandex.ru

⁵Профессор, д-р физ.-мат. наук, mlpeltech@gmail.com

^{1,2,3}ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

^{4,5}ФГАОУ ВО Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет
«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Показано, что изменением давления рабочего газа в установке ВЧ магнетронного распыления можно изменять состав тонких пленок твердых растворов цирконата-титаната свинца (PZT) Интерпретация полученных экспериментальных результатов проведена на основе статистического моделирования процессов термализации и диффузии потоков распыленных атомов Pb, Zr и Ti.

Ключевые слова: высокочастотное магнетронное распыление, тонкие пленки цирконата-титаната свинца, статистическое моделирование, термализация атомов в плазме.

Тонкие пленки цирконата-титаната свинца $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ (PZT) являются одними из основных материалов современной оксидной микроэлектроники и находят широкое применение в различных устройствах микроэлектромеханики. Практически значимыми являются твердые растворы PZT, состав которых соответствует области морфотропной фазовой границы (МФГ), где большинство физических параметров материалов достигают максимальных значений. Для оптимизации состава пленок PZT необходимо владеть эффективными методами тонкого варьирования состава в пределах МФГ, а также

контролировать содержание избыточного свинца, локализованного либо на интерфейсах, либо в межкристаллическом пространстве сегнетоэлектрического слоя. Одним из таких методов является метод ВЧ магнетронного распыления, в котором изменение состава пленок достигается изменением давления рабочей газовой смеси [1].

В настоящей работе исследовалось влияние давления газовой смеси 80% Ar + 20% O₂ в установке ВЧ магнетронного распыления на состав тонких пленок PZT, соответствующий области МФГ. Толщина осажденных слоев составляла ~ 800 нм, температура синтеза пленок – 600 °С. Для определения состава пленок использовался сканирующий электронный микроскоп EVO-40 (Zeiss), оснащенный энергодисперсионной приставкой INCA.

Полученные данные показали, что элементное содержание атомов свинца монотонно возрастало с увеличением давления рабочего газа в диапазоне 2-8 Па (кривая 1 на рис. 1,а). При 2 Па фиксировался недостаток свинца в 7% относительно стехиометрического состава PZT, а при 8 Па наблюдался значительный избыток атомов свинца величиной в 21%. Зависимость элементного соотношения Ti/Zr с ростом давления также носила монотонный характер (рис. 2,б). Диапазон изменения составлял ≈ 2,5%, охватывая большую часть области МФГ.

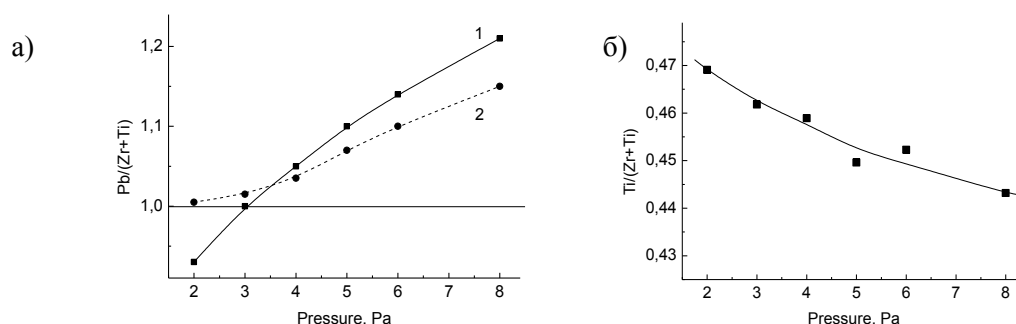


Рис. 1. Изменение элементного соотношения Pb/(Zr+Ti) (а) и Ti/(Ti+Zr) (б) при вариации давления газовой смеси в пленках PZT. Кривая 1 на рис. 1, а соответствует содержанию свинца в осажденных (аморфных) пленках, кривая 2 отражает содержание свинца в отожженных пленках в фазе перовскита

Результаты статистического моделирования процессов термализации и диффузии потоков распыленных атомов, представленных, в частности, на рис. 2, показывают, что в наблюдаемом интервале давлений рабочего газа происходит термализация тяжелых атомов свинца, в то время как для более легких атомов (Zr и Ti) этот процесс практически завершен. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей элементного соотношения атомов показывает, что их поведение хорошо коррелирует во всем диапазоне изменения давления рабочего газа.

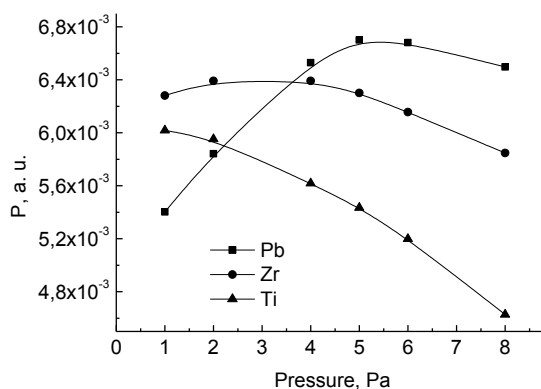


Рис. 2. Вероятности доставки распыленных атомов Pb, Zr и Ti на подложку при различных давлениях рабочего газа

Литература

1. Ионно-плазменное осаждение оксидных пленок с измененным стехиометрическим составом: эксперимент и моделирование. В.А. Вольпяс [и др.] // Письма в ЖТФ. - 2016. - Т. 42(14). - С. 87 – 93.

UDC 537.226

EVOLUTION OF DIELECTRIC PROPERTIES IN THE (1-x)NaNbO₃ - xGd_{1/3}NbO₃ SOLID SOLUTION SYSTEM

I.P. Raevski¹, S.P. Kubrin², V.A. Shuvaeva³, S.I. Raevskaya⁴, M.A. Malitskaya⁵, V.A. Iorshin⁶, I.N. Zakharchenko⁷, V.V. Titov⁸, J.-L. Dellis⁹, G. R. Li¹⁰

¹Dr. phys-mat.sci., professor, igorraevsky@gmail.com

²PhD, senior research associate, stasskp@gmail.com

³Dr. phys-mat.sci., leading research associate, v_shuvaeva@mail.ru

⁴PhD, associate professor, siraevskaia@sfedu.ru

⁵PhD, senior research associate, mamalitskaya@sfedu.ru

⁶Student, iorshin2015@yandex.ru

⁷PhD, senior research associate, zinik46@mail.ru

⁸PhD, research associate, vvtitov@sfedu.ru

⁹PhD, professor, jean-luc.dellis@u-picardie.fr

¹⁰PhD, head of laboratory, grli@sunm.shcnc.ac.cn

¹⁻⁸Southern Federal University

⁹Université de Picardie Jules Verne

¹⁰Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences

Dielectric studies of (1-x)NaNbO₃ - xGd_{1/3}NbO₃ solid solution compositions prepared using solid phase reactions route have been carried out in the temperature range 12-700 K. The permittivity-temperature dependences of the compositions studied were found to change, as x grows, from relatively sharp maxima typical of usual antiferroelectrics to the diffused but frequency-independent maxima typical of ferroelectrics and antiferroelectrics with diffused phase transition and then to the smeared and frequency-dependent maxima typical of relaxors.

Keywords: antiferroelectric, diffused phase transition, NaNbO₃, relaxor.

One of the main trends of modern materials science is the replacement of lead-containing electronic materials with their lead-free analogues. Among the most prospective representatives of the new generation of lead-free functional materials are sodium niobate NaNbO₃ -based solid solutions. Previously the main attention was paid to the ferroelectric NaNbO₃ - KNbO₃ and NaNbO₃ - LiNbO₃ solid solutions prospective for piezoelectric applications [1, 2]. Nowadays a far more promising application of NaNbO₃ and its derivatives is considered to be high energy storage capacitors, where the antiferroelectric nature of the material is utilized.[3].

Solid solutions of NaNbO₃ may be divided into two groups [4]. In solid solutions of the group I (e.g. NaNbO₃ - KNbO₃ and NaNbO₃ - LiNbO₃) high temperature ferroelectric (FE) phase appears at small (a few mol.%) content x of the second component, concentration dependence of the temperature T_m of dielectric permittivity ε maximum is rather smooth and the ε(T) maxima are sharp. In solid solutions of the group II the antiferroelectric (AFE) phase remains stable up to a comparatively high threshold x=x₀ value (x₀ is usually about 10-15 mol.% [5]) while in compositions with x>x₀ the phase, usually referred to as FE or ferrielectric becomes stable, which is accompanied by an abrupt drop in T_m values and dramatic smearing of the ε(T) maxima. Solid solutions of the group II are most prospective for high energy storage applications [3]. Though at room temperature NaNbO₃ is an AFE, a sufficiently strong electric field induces in NaNbO₃ an orthorhombic (space group Pmc₂₁) FE phase Q which remains stable after removing the field and it is destroyed only by heating up to high temperatures [3]. Recently stabilized antiferroelectricity and superior energy storage properties were reported for the compositions of the NaNbO₃ -based lead-free ceramics with A-site

vacancies obtained via a Bi_2O_3 substitution -solid solution system [5]. The scope of the present work was the study of evolution of dielectric properties in the similar solid solution system with A-site vacancies $(1-x)\text{NaNbO}_3 - x\text{Gd}_{1/3}\text{NbO}_3$.

Ceramic samples of $(1-x)\text{NaNbO}_3 - x\text{Gd}_{1/3}\text{NbO}_3$ compositions with $x=0, 0.05, 0.10, 0.15$ and 0.20 were prepared using solid phase reactions route. All the investigated compositions were single-phase and have a structure of the perovskite type. Dielectric studies carried out in the 12 K-700 K temperature range have shown that the $T_m(x)$ dependence has an abrupt drop at $x = x_0 \approx 0.1$. While T_m values of compositions with $x < x_0$ do not depend on frequency, compositions with $x > x_0$ exhibit a frequency dispersion of $\epsilon(T)$ and a frequency shift of T_m , i.e. the increase of T_m with frequency. The frequency shift of T_m for the compositions with $x > x_0$ is well described by the Vogel-Fulcher relation typical of relaxors. Diffusion of the $\epsilon(T)$ maximum increases as x grows and the $\epsilon(T)$ maxima for compositions with $x > x_0$ exhibiting relaxor-like properties appear to be very smeared.

Acknowledgment. This study is supported by the Russian Science Foundation (project 19-12-00205).

References

1. Rödel J. Transferring lead-free piezoelectric ceramics into application / K.G. Webber, R. Dittmer, W. Jo, M. Kimura, D. Damjanovic // J. Eur. Ceram. Soc. – 2015. – V.35. – № 6. – P. 1659 – 1681.
2. Wei H. An overview of lead-free piezoelectric materials and devices / H. Wei, H. Wang, Y. Xia, et al. // Mater. Chem. C. – 2018. – V. 6. – P. 12446-12467.
3. Liu Z. Antiferroelectrics for energy storage applications: a review / Z. Liu, T. Lu, J. Ye, G. Wang, X. Dong, R. Withers, Y. Liu // Adv. Mater. – 2018. – V. 3. – № 90. – P. 1800111.
4. Raevski I.P. NaNbO_3 -based relaxor / I. P. Raevski, L. A. Reznitchenko, M. A. Malitskaya, et al. // Ferroelectrics – 2004. – V. 299. – № 1. – P. 95 – 101.
5. Zhou M. Superior energy storage properties and excellent stability of novel NaNbO_3 -based lead-free ceramics with A-site vacancy obtained via a Bi_2O_3 substitution strategy / M. Zhou, R. Liang, Z. Zhou, X. Dong // J. Mater. Chem. A. – 2018. – V. 6. – P. 17896 – 17904.

УДК 538.95

АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ КЕРАМОМАТРИЧНЫХ ПЬЕЗОКОМПОЗИТОВ

Н.А. Швецова¹, Е.И. Петрова², Д.И. Макарьев³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

²Научный сотрудник, harigamypeople@gmail.com

³Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, dmakarev@rambler.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arubyanets@gmail.com

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе проведено многостороннее исследование различных типов керамоматричных пьезокомпози́тов, включающее трехмерное компьютерное моделирование, анализ пьезорезонансных спектров и ультразвуковые измерения. В результате компьютерного моделирования и экспериментальных исследований выявлены аномалии частотных зависимостей комплексных модулей упругости в области упругой дисперсии. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами компьютерного моделирования.

Ключевые слова: эхо-импульсные измерения, импедансные спектры, трехмерное моделирование, керамоматричные композиты, пьезорезонансный анализ.

Метод акустической спектроскопии используется для определения свойств или структуры веществ посредством исследования частотных зависимостей скорости распространения и затухания ультразвуковых волн. Затухание ультразвука, вызванное поглощением или рассеянием ультразвуковых волн на неоднородностях среды, а также релаксационными эффектами неизбежно приводит к частотной зависимости скорости

ультразвука или дисперсии. Использование акустической спектроскопии в традиционном исполнении для гетерогенных сред, а также неоднородных твердых тел с размерами неоднородностей структуры близких к длине волны связано с существенными трудностями. Так, например, пространственная дисперсия и рассеяние ультразвука в керамоматричных композитах (КМК) с неоднородной структурой и высоким затуханием ультразвука искажают характеристики ультразвуковых импульсов и могут сделать ультразвуковые измерения скорости и затухания неоднозначными [1]. Для пьезоактивных материалов измерение частотных зависимостей скорости и затухания ультразвуковых колебаний может быть осуществлено методами импедансной спектроскопии или анализа пьезорезонансных спектров [2].

В качестве экспериментальных образцов для моделирования распространения ультразвуковых волн и сравнения с результатами анализа импедансных спектров и ультразвуковых измерений были выбраны КМК с сильной пространственной дисперсией и высокими потерями [3]:

- КМК керамика/кристалл (матрица ЦТС с произвольно распределенными кристаллическими включениями (α -Al₂O₃, LiNbO₃));
- КМК керамика/металл (матрица ЦТС с произвольно распределенными металлическими включениями (Pt, W)).

Комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические параметры КМК определялись методом импедансной спектроскопии с использованием программы анализа пьезорезонансных спектров (PRAP) [2]. Скорость звука и затухание продольных и поперечных волн измерялись ультразвуковыми эхо-импульсным и теневым методами.

На рисунке в качестве примера показаны частотные зависимости действительных частей модулей упругости и соответствующих тангенсов упругих потерь для КМК керамика/металл.

Результаты проведенных исследований показали, что эхо-импульсные измерения зависимостей упругих свойств для КМК с высокими потерями и дисперсией являются неточными и неоднозначными. В свою очередь метод анализа резонансных спектров (PRAP) позволяет получить точные и воспроизводимые результаты, которые хорошо согласуются с результатами трехмерного моделирования, выполненного методом конечных разностей с использованием пакета Wave 3000 Pro.

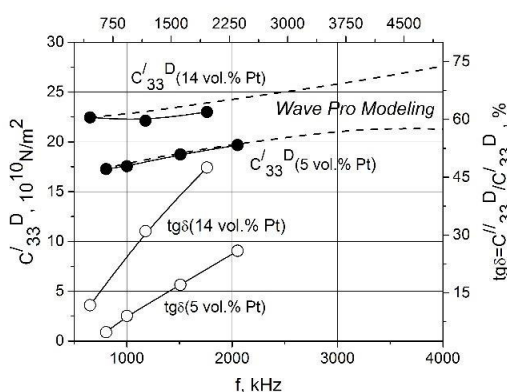


Рисунок. Экспериментальные и рассчитанные частотные зависимости действительной части упругих модулей C'_{33} и соответствующих тангенсов упругих потерь

$$\text{tg}\delta = \frac{C''_{33}}{C'_{33}} \text{ для КМК ЦТС/Pt при различном содержании Pt}$$

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Rybians A.N. New "damped by scattering" ceramic piezocomposites with extremally low Q_M values / A.N. Rybians // Ferroelectrics. - 2007. - V. 360. - Issue 1. - P. 84-89.

2. Rybians A. Impedance spectroscopy characterization of highly attenuating piezocomposites / A. Rybians, Y. Eshel, R. Tasker // Proceedings of the 9th European Conference on Non-Destructive Testing (ECNDT 2006). - 2006. - Paper 129. - P. 1-9.

3. Rybians A.N. Ceramic Piezocomposites: Modeling, Technology, and Characterization / A.N. Rybians // Nova Science Publishers Inc. - 2010. - Chapter 3. - P. 113-174.

УДК: 538.95

МЕТОД ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИЗАЦИИ СЕГНЕТО- И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

А.Н. Резниченко¹, С.А. Щербинин², И.А. Швецов³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Научный сотрудник, reznichenkoan@yahoo.com

²Научный сотрудник, step_scherbinin@list.ru

³Аспирант, wbeg@mail.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybians@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе представлены основы теории метода электромеханической характеристики сегнетопьезоэлектрических материалов. Описаны экспериментальные установки и программное обеспечение. Представлены экспериментальные результаты, полученные в результате анализа петель гистерезиса и деформации для ряда сегнетопьезоэлектрических материалов и устройств.

Ключевые слова: электромеханический отклик, петля гистерезиса, пьезоэффект, сегнетопьезоматериалы.

Новые пьезокерамические и пьезокомпозитные материалы в настоящее время широко используются в пьезоэлектрических и ультразвуковых преобразователях с высокой разрешающей способностью, чувствительностью и эффективностью [1]. Для некоторых современных материалов с неоднородной структурой и высокими потерями прямое использование стандарта IEEE для определения констант материала приводит к значительным ошибкам. Существует множество методов, использующих комплексные материальные константы, для того, чтобы учесть потери в материалах с низкой добротностью и преодолеть ограничения стандарта IEEE [2]. Итерационные методы [3, 4] дают возможность точного определения комплексных коэффициентов в линейном диапазоне на основе резонансного измерения комплексного импеданса пьезокерамики. Метод пьезорезонансного анализа (PRAP) также используется для полного набора стандартных геометрий и резонансных мод, необходимых для полной комплексной характеристики широкого спектра пьезоэлектрических материалов с высокими и умеренными потерями [5].

Для определения электромеханических характеристик сегнетопьезоматериалов нами была использована программа анализа электромеханического отклика (STEP) [6], сочетающая моделирование механического и электрического поведения сегнетоэлектрических, пьезоэлектрических, электрострикционных и антисегнетоэлектрических материалов в сильных полях с исчерпывающим интерфейсом для получения данных о зависимостях деформации (S), напряжения (T), электрического поля (E) электрического смещения или электрической поляризации (P) от времени.

Модуль пьезоэлектрического анализа STEP можно использовать для измерения и анализа высокосигнальных квазистатических пьезоэлектрических, диэлектрических и упругих свойств материалов. В случае сегнетопьезоэлектрического материала модели предполагают, что максимальное приложенное поле ниже коэрцитивного поля материала при заданной температуре измерения.

На рисунке представлены примеры петель деформации и диэлектрического гистерезиса, используемых для автоматического анализа с использованием программы STEP.

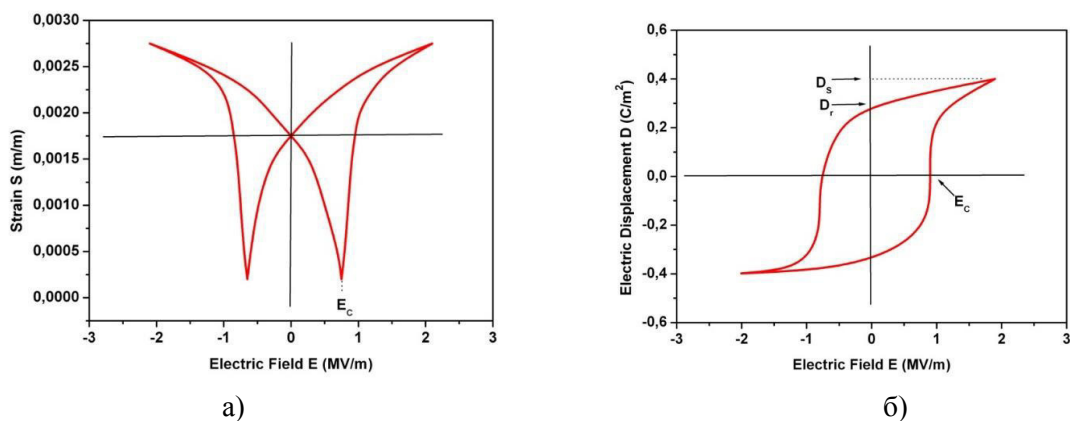


Рисунок. Типичные петли деформации и диэлектрического гистерезиса для сегнетоэлектрического материала

Анализ электромеханического отклика позволяет определить наборы основных констант, определяющих поведение сегнетопьезокерамических материалов в сильных полях с учетом гистерезиса.

В работе представлена базовая теория метода определения характеристик электромеханического отклика (STEP), а также экспериментальные результаты для широкого спектра пьезо- и сегнетоэлектрических материалов и устройств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Rybyanets A. Ceramic Piezocomposites: Modeling, Technology, and Characterization / Andrey Rybyanets, Anastasia Rybyanets // IEEE Trans. UFFC. - 2011. - V. 58. - N. 9. - P. 1757-1774.
2. IEEE Standard on Piezoelectricity. ANSI/IEEE Std. 1987, 176 p.
3. Pardo, L.; Alemany, C.; Ricote, J.; Moure, A.; Poyato, R.; Alguero, M. Proc. Intern. Conf. Material Technology and Design of Integrated Piezoelectric Devices. Courmayeur, Italy. 2004, 145.
4. Rybyanets A.N. Automatic iterative evaluation of complex material constants of highly attenuating piezocomposites / A.N. Rybyanets, R. Tasker // Ferroelectrics. - 2007. - V. 360. - P. 90-95.
5. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Programme). TASI Technical Software Inc. (www.tasitechnical.com).
6. STEP (Electromechanical Response Characterisation Program). TASI Technical Software Inc. (www.tasitechnical.com).

УДК 537.226.4

МИКРОСТРУКТУРА И ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЕРОВСКИТОВЫХ ОСТРОВКОВ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ PZT

С.В. Сенкевич¹, Д.А. Киселев², Е.Ю. Каптелов³, И.П. Пронин⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, н.с., SenkevichSV@mail.ioffe.ru

²Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., dm.kiselev@gmail.com

³Канд. физ.-мат. наук, kaptelov@mail.ioffe.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, с.н.с., Petrovich@mail.ioffe.ru

^{1,3,4}ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

²ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС», Москва, Россия

В работе исследованы особенности морфологии и пьезоэлектрического отклика отдельных перовскитовых островков в тонких пленках PZT, осажденных на платинированную кремниевую подложку. Обсуждаются причины неоднородного радиального распределения пьезоотклика по островкам и влияние размера островков.

Ключевые слова: цирконата-титаната свинца, силовая микроскопия пьезоэлектрического отклика, тонкие пленки.

Одним из базовых материалов для создания разнообразных устройств микро-электромеханики являются сегнетоэлектрические твердые растворы цирконата-титаната свинца $Pb(Zr,Ti)O_3$ (PZT) в виде тонких пленок [1]. Пленки, состав которых соответствует области морфотропной фазовой границы (МФГ), разделяющей тетрагональную и ромбоэдрическую модификации сегнетоэлектрической фазы, обладают максимальными электромеханическими параметрами. Серьезным преимуществом обладают униполярные (самополяризованные) пленки, для которых не требуется дополнительная процедура поляризации, и в которых макроскопическая поляризация достигает величин, сравнимых с величиной спонтанной поляризации [2].

В работе исследовалось влияние температуры отжига ($T_{отж}$) на фазовое состояние, состав и физические свойства самополяризованных тонких пленок PZT. Пленки толщиной 500 нм осаждались методом ВЧ магнетронного распыления на платинированные кремниевые пластины с последующим отжигом при $T_{отж} = 530-570$ °С. Состав пленок соответствовал области МФГ. Методами растровой электронной микроскопии (Zeiss EVO-40) и силовой микроскопии пьезоотклика (Ntegra Prima NT-MDT) изучалась структура сформированных пленок. Для изучения диэлектрических свойств использовался автоматизированный комплекс на базе измерителя иммитанса E7-20.

Выявлено немонотонное изменение скорости образования фазы перовскита в матрице фазы пироклора с ростом $T_{отж}$. На краях температурного диапазона кристаллизация фазы перовскита происходила во всем объеме пленок, тогда как при $T_{отж} = 550-560$ °С формировалась двухфазная структура перовскит-пироклор. Величина диэлектрической проницаемости уменьшалась более чем в два раза, а содержание избыточного свинца увеличивалось (рис. 1).

Анализ полученных данных показал, что такое поведение является следствием конкуренции механизмов образования фазы перовскита на свободной поверхности пленки и на границе пленки и подложки, что приводит к уменьшению скорости разрастания островков фазы перовскита из-за накопления избыточного оксида свинца на их границах.

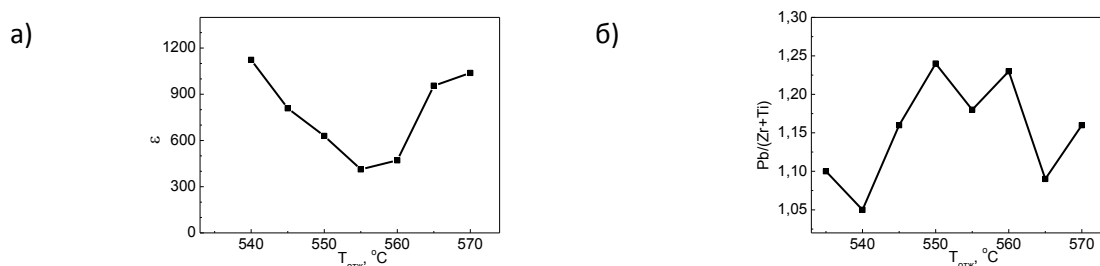


Рис.1. Зависимости диэлектрической проницаемости ϵ (частота измерения 10 кГц) (а) и элементного соотношения $Pb/(Ti+Zr)$ (б) с ростом температуры отжига $T_{отж}$

Исследования пьезоэлектрического отклика выявили ряд особенностей. Рельеф перовскитовых островков характеризовался радиальной неоднородностью и увеличением объема низкотемпературной фазы пироклора в области фазовой границы пироклор-перовскит (рис. 2,а,б). Величина пьезоотклика в островках также отличалась радиальной неоднородностью (рис. 2,в,г), степень этой неоднородности возрастала по мере уменьшения диаметра островков. Величина пьезоотклика в отдельных островках фазы перовскита существенно превышала пьезоотклик в однофазных перовскитовых пленках. В работе обсуждаются причины аномальных изменений пьезоэлектрического отклика.

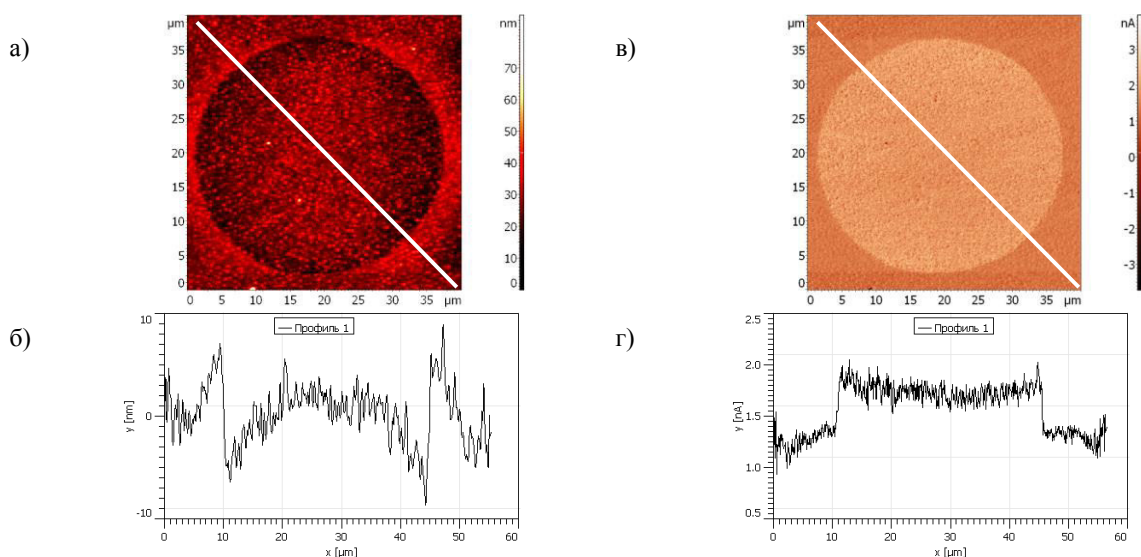


Рис. 2. Топографическое изображение перовскитового островка (а), профиль поверхности островка по линии (б), пьезоэлектрический отклик островка (в) и профиль пьезоэлектрического островка по линии (г). $T_{отж} = 555 \text{ }^\circ\text{C}$

Литература

1. Whatmore R.W. *Ferroelectrics, microsystems and nanotechnology* / R.W.Whatmore // *Ferroelectrics*. - 1999. - V. 225. - P. 179-192.
2. Kholkin A.L. Self-polarization effect in $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ thin films / A.L. Kholkin, K.G. Brooks, D.V. Taylor, S. Hiboux, N. Setter // *Integr. Ferroelectrics*. - 1998. - V. 22. - P. 525- 533.

УДК: 538.956

КВАЗИСТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ ЦТС

В.В. Иванов¹, Е.Н. Голубева², О.Н. Сергеева³, Г.М. Некрасова⁴,
И.П. Пронин⁵, Д.А. Киселев⁶

¹Канд. физ.-мат наук, профессор, vladimir.ivanov@tversu.ru

²Магистрант, el_golubeva94@mail.ru.

³Канд. физ.-мат наук, вед. инженер, o_n_sergeeva@mail.ru

⁴Канд. физ.-мат наук, доцент, g_nekrasova54@mail.ru

⁵Д-р физ.-мат. наук, с.н.с., Petrovich@mail.ioffe.ru

⁶Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., dm.kiselev@gmail.com

^{1,2,3}ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

⁴ФГБОУ ВО «Тверская государственная сельскохозяйственная академия»

⁵ФГБУН «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН»

⁶ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»»

Исследованы квазистатические процессы релаксации диэлектрической проницаемости, возникающие в результате переключения поликристаллических пленок ЦТС, кристаллизованных при различных температурах отжига. Показано, что процессы релаксации характеризуются тремя временами релаксации, зависящими от температуры кристаллизации, и, как следствие, от локализации оксида свинца в объеме пленки.

Ключевые слова: тонкие пленки ЦТС, релаксационные процессы, диэлектрическая проницаемость, самополяризация.

В связи с тем, что тонкие пленки цирконата титаната свинца (ЦТС) является наиболее значимым функциональным материалом для элементов энергонезависимой памяти, исследования их переключательных свойств и сопровождающие их релаксационных явлений являются актуальной научной задачей, тем более, что в настоящее вре-

мя нет однозначного заключения о природе этих явлений. В [1] показано, что в пленках ЦТС, полученных золь-гель методом, релаксационные процессы связаны с выключением части переключаемого объема за счет закрепления зародышей обратных доменов заряженными дефектами. Авторы [2], изучая релаксацию тока в отдельно взятом зерне, объясняют ее медленной перезарядкой глубоких уровней, локализованных на границах зерен вблизи электродов, исключая вклад доменного механизма. По мнению авторов [3] существуют три процесса релаксации тока переключения с разными временами и механизмами.

В настоящей работе, с целью уточнения вклада доменного механизма в квазистационарные процессы переключения пленок ЦТС, кристаллизованных при разных температурах, исследуется релаксация диэлектрической проницаемости в области постоянных полей, соответствующих ее максимуму на вольт-фарадных (C-V) зависимостях. Пленки ЦТС толщиной 1000 нм получены методом ВЧ магнетронного распыления на «холодную» платинированную кремниевую подложку керамической мишени состава $\text{PbZr}_{0,54}\text{Ti}_{0,46}\text{O}_3$, содержащей дополнительно 10 мол. PbO , с последующим отжигом на воздухе при 580-650 °С для кристаллизации в фазу перовскита. В качестве верхних электродов использовалась платина.

Релаксационные явления, сопровождающие процесс переключения пленой ЦТС, изучались тремя независимыми методами: динамическим методом исследования пироэффекта, методом силовой микроскопии пьезоотклика и по релаксационным зависимостям диэлектрической проницаемости в области постоянных полей, соответствующих ее максимумам на C-V характеристиках. Аппроксимация релаксационных зависимостей диэлектрической проницаемости свидетельствует о наличии трех независимых процессов с различными временами релаксации, которые происходят быстрее при переполяризации пленок ЦТС в направлении внешнего поля, совпадающем с ориентацией вектора самополяризации, рис 1,а. Процесс, сопровождающийся релаксацией со временем τ_1 (рис. 1,а), ассоциируется нами с доменным вкладом при квазистатической переполяризации пленок ЦТС в постоянных полях.

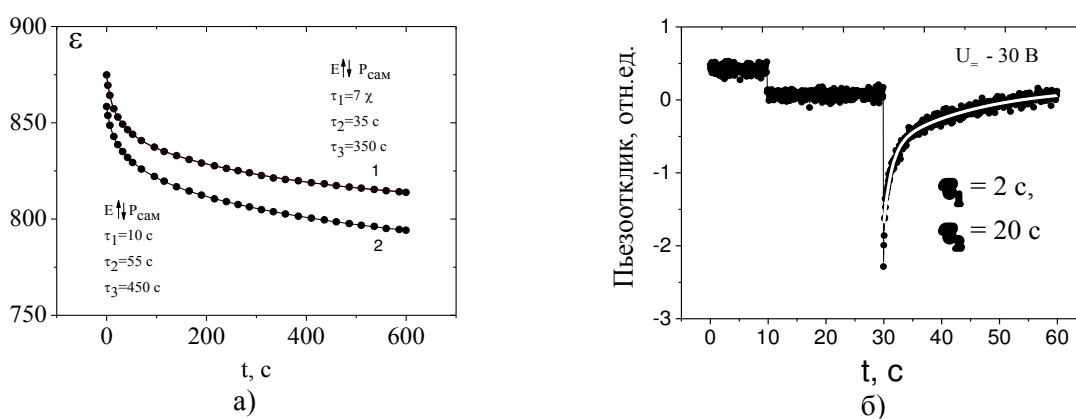


Рисунок. Релаксационные зависимости: а - диэлектрической проницаемости в пленках ЦТС ($T_{\text{отж}} = 580^\circ\text{C}$). Кривая 1 соответствует ($E \uparrow \uparrow P_{\text{сам}}$); кривая 2 – ($E \uparrow \downarrow P_{\text{сам}}$). б – пьезоотклика. Точки – экспериментальные результаты, сплошные линии – аппроксимационные зависимости

Доказательством может служить и характер релаксации пьезоотклика в постоянном поле при переключении пленки ЦТС, рис.1, б. В работе обсуждается вклад локализации оксида свинца с увеличением температуры отжига и его влияния на величины времен релаксации диэлектрической проницаемости.

Литература

1. Сидоркин, А.С. Влияние процессов усталости на токи переключения в пленках титаната свинца и цирконата-титаната свинца / А.С. Сидоркин, Л.П. Нестеренко, А.Ю. Пахомов // Физ. тв. тела. – 2012. – Т. 54. – Вып. 5. – С. 947-949.

2. Unexpected behavior of transient current in thin PZT films caused by grain-boundary conduction/ L.A. Delimova [et al.] // J. Appl. Phys. – 2017. – V.121.– 224104 (1-9).

3. Depolarization currents in thin ferroelectric films / Yu.V. Podgorny [et al.] // Ferroelectrics. – 2012. – V. 439. – P. 56-61.

УДК 538.9

СТРУКТУРА ПЛЁНОК Li-Nb-O ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА ИЛИ ИМПУЛЬСНОЙ ФОТОННОЙ ОБРАБОТКИ

Д.В. Сериков¹, В.А. Дыбов²

¹Младший научный сотрудник, dmitry.tut@mail.ru

²Младший научный сотрудник, dybovvlad@gmail.com

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе представлена принципиальная возможность получения поликристаллических пленок системы Li-Nb-O термическим отжигом и импульсной фотонной обработкой гетероструктур «аморфная пленка Li-Nb-O/SiO₂/Si».

Ключевые слова: ниобат лития, импульсная фотонная обработка, термообработка.

Из-за уникальных электрооптических, акустооптических и сегнетоэлектрических свойств тонкие пленки ниобата лития - перспектива развития оптоэлектроники [1]. Цель работы выявление закономерностей структурообразования в пленках системы Li-Nb-O в процессах импульсной фотонной обработки (ИФО) и термического отжига (ТО).

Исходные тонкие пленки Li-Nb-O толщиной 1.5 мкм наносили на неподогреваемую пластину окисленного кремния в процессе высокочастотного магнетронного распыления (ВЧМР) мишени монокристаллического ниобата лития. ИФО образцов проводили в установке УОЛП-1М излучением газоразрядных ксеноновых ламп ($\lambda=0,2-1,2$ мкм) на воздухе; длительность импульса 1,0 секунда, что соответствует плотности энергии $E_{\text{и}} = 120$ Дж·см⁻². ТО (1 час) проводили на воздухе при 600 °С. Структуру пленок изучали методами ПЭМ и РЭМ по профильным изображениям (методика «cross-section»).

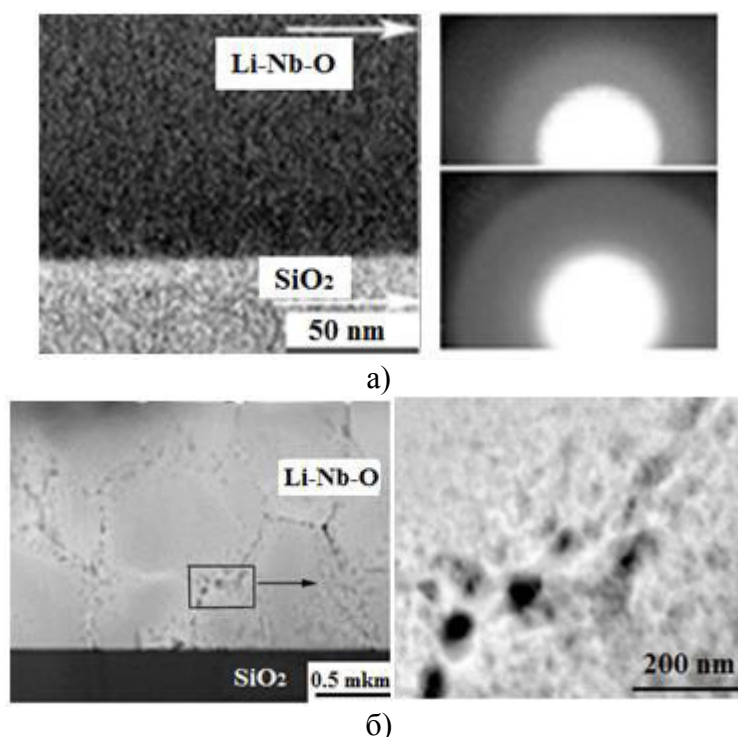


Рис. 1. ПЭМ (а), РЭМ (б) изображения и электронограммы (а) поперечного среза исходной гетероструктуры Li-Nb-O/SiO₂/Si (а) и после ТО (б)

ПЭМ, РЭМ изображения и фрагменты электронограмм поперечных срезов LiNbO₃/SiO₂/Si свидетельствуют о том, что в результате ВЧМР мишени LiNbO₃ на поверхности неподогреваемой пластины SiO₂/Si формируется аморфная пленка (рис. 1а). В процессе ТО происходит образование крупнозеренной структуры (размер кристаллитов от 0,4 до 1 мкм) с системой нанопор (от 10 до 80 нм) по межзеренным границам (рис. 1б).

В процессе ИФО формируется ультрапористая нанокристаллическая структура, размер нанопор и нанокристаллов ~50 нм (рис. 2).

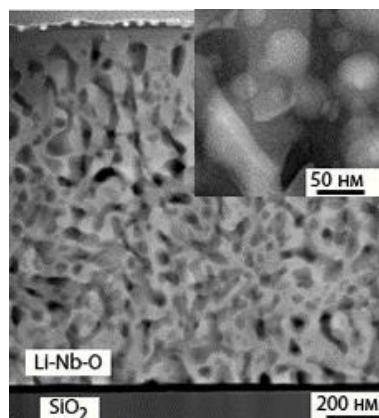


Рис. 2. РЭМ изображение поперечного среза гетероструктуры Li-Nb-O/SiO₂/Si после ИФО

Показана принципиальная возможность завершения синтеза поликристаллических пленок в процессах ТО и ФО аморфных пленок системы Li-Nb-O.

Эффект быстрой ФО проявляется в ускорении процесса кристаллизации по сравнению с ТО.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-29-11062 МК).

Литература

1. Pan X., Shuai Y., Wu C., Luo W., Sun X., Zeng H., Zhang W. Rectifying filamentary resistive switching in ion-exfoliated LiNbO₃ thin films // Appl. Phys. Lett. 2016. V. 108. P. 032904.

УДК 53.043, 53.091

МЕХАНОАКТИВАЦИЯ И ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АНТИСЕГНЕТОЭЛЕКТРИКА PbZrO₃

М.А. Сирота¹, М.А. Витченко², И.В. Мардасова³, К.Г. Абдулвахидов⁴, А.П. Будник⁵, П.С. Пляка⁶, А.Н. Назаренко⁷, А.В. Солдатов⁸, С.В. Черкасова⁹

¹Аспирант, mari.sirota@ya.ru

²К.ф.-м.н., доцент, phys.mar@yandex.ru

³К.ф.-м.н., доцент, irina.mardasowa@yandex.ru

⁴Д.ф.-м.н., доцент, phys.kam@mail.ru

⁵К.х.н., доцент, abudnik.sfedu@yandex.ru

⁶К.ф.-м.н., доцент, pavstef@mail.ru

⁷К.ф.-м.н., научный сотрудник, avnazarenko1@gmail.com

⁸Д.ф.-м.н., проф., soldatov@sfedu.ru

⁹Аспирант, cherkasova.svetlana.o@gmail.com

¹Южный федеральный университет, Ростов – на - Дону

^{2,3}Донской государственный технический университет, Ростов - на- Дону

^{4,5,6,7}Южный научный центр РАН, Ростов – на - Дону

^{8,9}Международный исследовательский институт интеллектуальных материалов ЮФУ

Цирконат свинца $PbZrO_3$ является первым соединением, у которого экспериментально были обнаружены антисегнетоэлектрические свойства. Он является одним из основных компонентов твердых растворов $PbZr_{1-x}Ti_xO_3$, обладающих широким спектром целевых свойств, формирование которых достигается изменением концентрации катионов Zr и Ti или допированием примесями.

В данной работе нами представлены экспериментальные результаты по изучению влияния механической активации синтезированного $PbZrO_3$ на его физические свойства. Механоактивация порошков $PbZrO_3$ осуществлялась с помощью наковален Бриджмена, нижняя из которых вращалась в заданном угловом интервале со скоростью 0.05 об/мин. Полное число оборотов равнялось двум. Прикладываемое давление для каждого последующего образца отличалось на 40 МПа. Максимальное давление равнялось 320 МПа.

Методами диэлектрической и оптической спектроскопии, а также другими электрофизическими методами изучены свойства и структуру активированных порошков и керамических образцов.

Рентгендифрактометрическим методом при комнатной температуре измерена концентрация дислокаций, размеры областей когерентного рассеяния и микродеформации каждого порошкового образца.

В параэлектрической фазе изучены зависимости среднеквадратичных смещений, температуры Дебая и факторов Дебая - Валлера от давления механоактивации. Обнаруженные зависимости этих параметров не являются монотонными, что обусловлено различной концентрацией структурных дефектов, диффузионными процессами, развивающимися при механоактивации порошков и, следовательно, различными стартовыми условиями образцов при спекании керамики.

УДК 538.95

УПРУГИЕ ПОТЕРИ И ДИСПЕРСИЯ В ПОРИСТОЙ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКЕ

И.А. Швецов¹, М.А. Луговая², Н.А. Швецова³, А.Н. Рыбнянец⁴

¹Аспирант, wbeg@mail.ru

²Аспирант, lugovaya_maria@mail.ru

³Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В настоящей работе выполнены комплексные исследования упругой дисперсии и потерь в пористых сегнетопьезокерамиках различных систем, включающие в себя конечно-разностное моделирование, пьезорезонансный анализ и ультразвуковые измерения. Рассмотрены микроструктурные и физические механизмы упругих, пьезоэлектрических и диэлектрических потерь и пространственной дисперсии в пористой пьезокерамике.

Ключевые слова: пьезорезонансный анализ, дисперсия, затухания, пористая сегнетопьезокерамика.

В настоящее время наблюдается тенденция к замене высокоплотных и совершенных в химическом и структурном отношении активных материалов на несовершенные в структурном отношении, низкоплотные материалы с гетерогенной структурой (пьезокерамика на основе титаната и метаниобата свинца, композиты керамика/полимер со связностью 1-3 и пористые пьезокерамики [1]).

Пористая пьезокерамика на основе различных пьезокерамических композиций была предложена в качестве замены метаниобата свинца для использования в широкополосных ультразвуковых преобразователях [2]. Организации промышленного производства пористой пьезоэлектрической керамики с воспроизводимыми свойствами и контролируемой пористостью предшествовали интенсивные технологические и науч-

но-исследовательские работы, а также появление новых усовершенствованных технологий [2].

В настоящей работе проведены многоплановые исследования упругой дисперсии и потерь в пористых сегнетопьезокерамиках различных систем, включающие в себя конечно-разностное моделирование, характеризацию с использованием импедансной спектроскопии и пьезорезонансного анализа, а также ультразвуковые эхо-импульсные измерения.

В качестве объектов для исследования были выбраны пористые сегнетопьезокерамики на основе ЦТС с относительной пористостью до 50% и средним размером пор 10-30 мкм.

Комплексные упругие, диэлектрические и пьезоэлектрические коэффициенты пористой пьезокерамики определялись методом импедансной спектроскопии с использованием программного обеспечения для пьезорезонансного анализа (PRAP) [3].

На рисунке приведены импедансный спектр для трех первых гармоник толщинной моды колебаний пьезокерамического диска, а также частотные зависимости комплексных модулей упругости для пористой сегнетопьезокерамики состава $Pb_{0,45}Ti_{0,45}Zr_{0,53}(W_{1/2}Cd_{1/2})_{0,02}O_3$ (ПКР-1) с относительной пористостью 18%.

В результате проведенного комплексного исследования, включающего конечно-разностное 3D-моделирование, импедансную спектроскопию и ультразвуковые измерения, показано, что частотные зависимости упругих модулей (дисперсия) и затухание ультразвука в пористых пьезокерамиках обусловлена рассеянием упругих волн на порах.

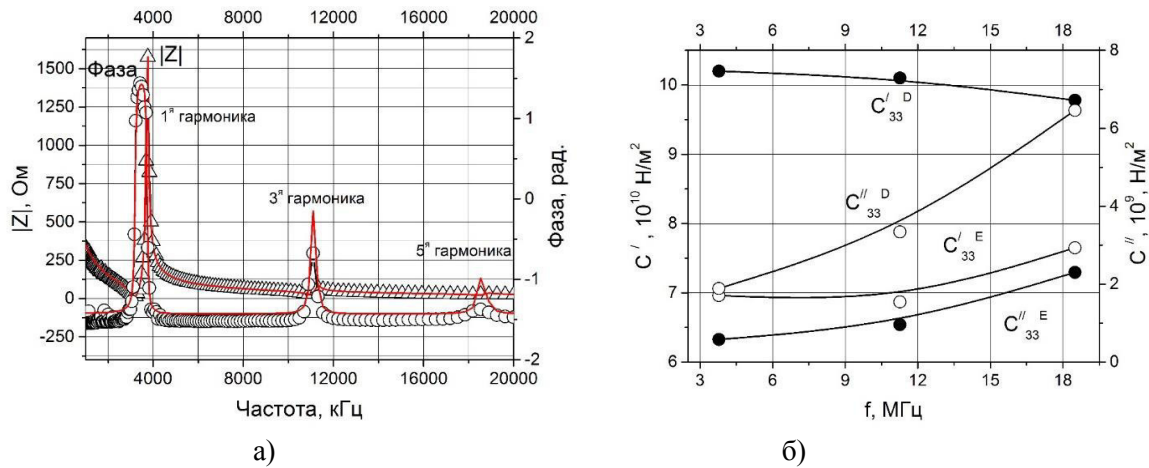


Рисунок. Импедансные спектры и аппроксимации PRAP для толщинных колебаний (а)

и зависимости комплексных модулей упругости (действительных $C_{33}^{//D}$, $C_{33}^{//E}$ и мнимых

$C_{33}^{/D}$, $C_{33}^{/E}$ частей) пористого диска ПКР-1 $\varnothing 10 \times 0,5$ мм

Установлено, что в частотном диапазоне, соответствующем условию $\lambda \gg D$ скорость и затухание ультразвуковых волн увеличиваются с частотой, как f^3 и f^4 соответственно. С ростом частоты и приближении λ к D ($4 \leq \lambda \leq 10$) характер рассеяния меняется от рэлеевского к стохастическому, затухание и дисперсия усиливаются и описываются частотными зависимостями f^2 и f соответственно.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, тема № 12.5425.2017/8.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 16-58-48009-Инд-оми).

Литература

1. Wersing, W. In: Piezoelectric Materials in Devices. N. Setter (Ed.); Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne, Switzerland. 2002, 29-66.
2. Rybyanets A.N. Porous piezoceramics: theory, technology, and properties / A.N. Rybyanets // IEEE Trans. UFFC. - 2011. - V.58. - N. 7. - P. 1492-1507.
3. PRAP (Piezoelectric Resonance Analysis Program). TASI Technical Software, Inc.; www.tasitechnical.com

УДК 537.226

ПРОЦЕССЫ РЕЛАКСАЦИИ ПОЛЯРИЗАЦИИ В МНОГОКОМПОНЕНТНОЙ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКЕ В ШИРОКОЙ ОБЛАСТИ ТЕМПЕРАТУР

А.В. Скрылёв¹, Г.М. Акбаева², А.И. Бурханов³, А.В. Сопит³

¹Младший научный сотрудник, skrylyov@sfnu.ru

²Научный сотрудник, к.ф.-м.н., gakbaeva@mail.ru

³Доцент, д.ф.-м.н., burkhanov@inbox.ru

⁴Доцент, д.ф.-м.н., sandrej74@mail.ru

¹Институт высоких технологий и пьезотехники, Южный федеральный университет

²Научно-исследовательский институт физики, Южный федеральный университет

³Волгоградский государственный технический университет

В данной работе исследованы процессы релаксации поляризации в пьезокерамическом материале на основе ЦТС в широкой области температур.

Ключевые слова: система ЦТС, сегнетомягкая пьезокерамика, дисперсия, поляризация, размытые фазовые переходы.

Известно, что в многокомпонентной пьезокерамике при определенном соотношении компонентов твердого раствора и модифицирующих примесей, фазовый переход из сегнетоэлектрической фазы в параэлектрическую происходит в несколько этапов [1,2]. При этом температурный интервал, таких структурных и поляризационных изменений, может достигать сотни градусов.

В настоящей работе исследованы процессы релаксации поляризации в широкой области температур в пьезокерамическом материале на основе ЦТС - $0.35\text{PbTiO}_3 - 0.21\text{PbZrO}_3 - \text{Pb}(\text{Ni}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3 - \text{Zn}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$.

На рисунке 1 представлены петли поляризации на частотах 0,1, 1 и 10 Гц при различных значениях амплитуды синусоидального поля E и при различных температурах. При $T = 22^\circ\text{C}$ наблюдаются лишь частные циклы петель поляризации с заметным отличием степени разворачивания; при $T = 75^\circ\text{C}$ начинает уменьшаться коэрцитивное поле с уменьшением частоты; при $T = 137^\circ\text{C}$ – проявляется вклад проводимости на 0,1 Гц – петли поляризации закругляются, а на 1 и 10 Гц также проявляется частотная зависимость коэрцитивного поля E_c , на 1 Гц оно меньше, чем на 10 Гц и как следствие значения поляризации выше.

Полученные результаты обсуждаются в рамках существующих подходов рассматривающих взаимодействие доменных границ с различного типа дефектам характерными для неупорядоченных структур.

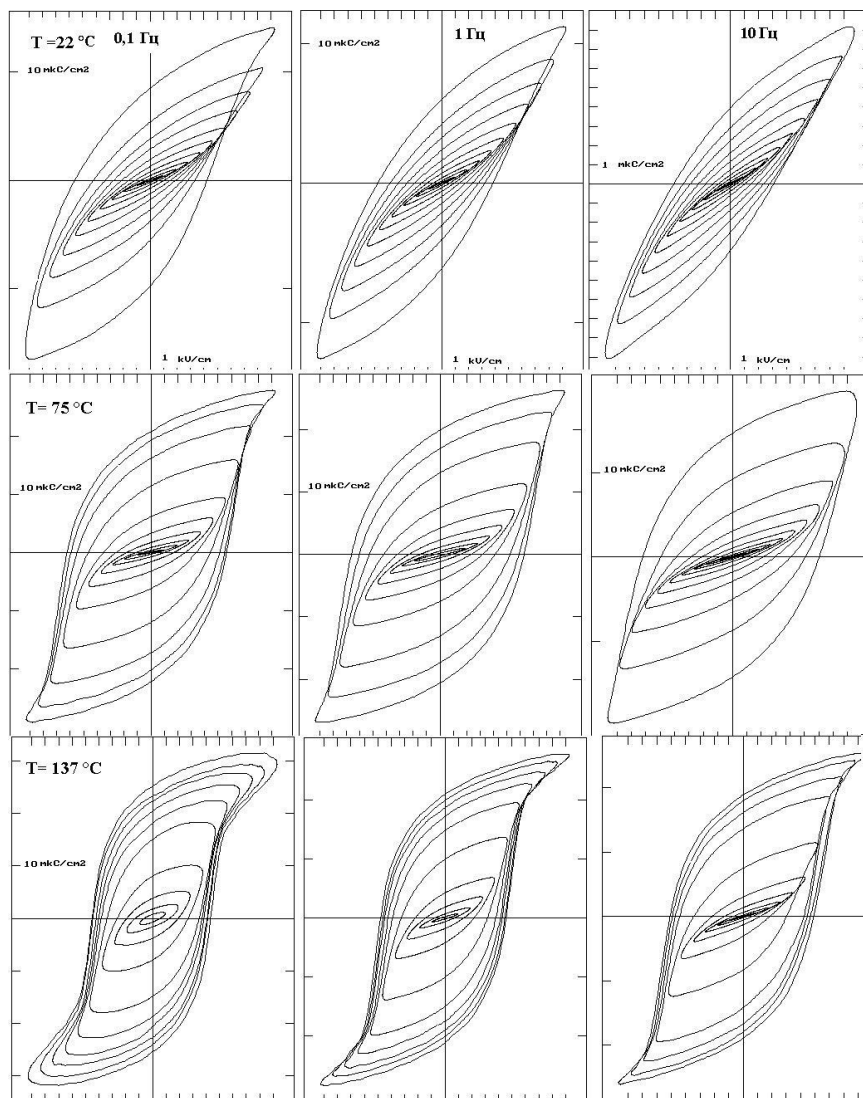


Рисунок. Петли поляризации исследуемого состава на частотах 0.1, 1 и 10 Гц и при различных температурах

Литература

1. A.V. Skrylev, A.I. Burkhanov, G.M. Akbaeva, L.A. Dykina, Electrophysical and mechanical properties of PZT-based soft ferroelectric material in wide range of temperatures // *Ferroelectrics*, V. 538, Issue 1, P. 146-153, 2019.

2. А.В. Скрылёв, А.И. Бурханов, Г.М. Акбаева, А.Е. Панич, Диэлектрические и упругие свойства в области размытого структурного фазового перехода в многокомпонентной системе на основе ЦТС // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. 2018. Т. 82. № 3. С. 372-374.

УДК 538.95

ЧАСТОТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ КОНСТАНТ БЕССВИНЦОВОЙ СЕГНЕТОПЬЕЗОКЕРАМИКИ

Н.А. Швецова¹, Д.И. Макарьев², Е.И. Петрова³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

²Научный сотрудник, dmakarev@rambler.ru

³Научный сотрудник, harigamypeople@gmail.com

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arbyanets@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе исследованы частотные зависимости комплексных пьезоэлектрических, диэлектрических и упругих параметров бесвинцовых сегнетопъезокерамик на основе твердых растворов системы $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$. Показано, что исследованные бесвинцовые сегнетопъезокерамики характеризуются низким затуханием ультразвуковых волн и отсутствием дисперсии в широком диапазоне частот и могут быть использованы в высокочастотных ультразвуковых преобразователях для медицинской техники и неразрушающего контроля.

Ключевые слова: бесвинцовая сегнетопъезокерамика, микроструктурные исследования, комплексные параметры, импедансный спектр, дисперсия.

Интерес к бесвинцовым сегнетопъезокерамикам связан с тем, что в последнее время все больше внимания уделяется экологическим проблемам. Внимание исследователей в настоящее время концентрируется на уже существующих бесвинцовых композициях [1].

Среди известных бесвинцовых составов на основе ниобатов щелочных металлов наибольший практический интерес представляют сегнетопъезокерамики на основе твердых растворов $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$ [2], демонстрирующие оригинальный набор диэлектрических, упругих и пьезоэлектрических параметров, что делает их конкурентоспособными и перспективными для ряда высокочастотных ультразвуковых применений.

В данной работе выполнено экспериментальное исследование частотных зависимостей комплексных пьезоэлектрических, диэлектрических и упругих параметров бесвинцовой сегнеторъезокерамики на основе $(\text{Na,Li})\text{NbO}_3$ в диапазоне частот до 100 МГц. В качестве объекта исследования была выбрана сегнетопъезокерамика состава $\text{Na}_{0,86625}\text{Li}_{0,12375}\text{Sr}_{0,01}\text{Nb}_{0,988}\text{Al}_{0,01}\text{O}_{2,995}$ (ПКР-35), полученная методом горячего прессования [2].

Измерения комплексных упругих, диэлектрических и пьезоэлектрических параметров пьезоэлементов выполнялись на стандартных образцах с помощью анализатора импеданса Agilent 4294A и программы анализа резонансных спектров PRAP [3]. Для исследования частотных зависимостей комплексных параметров экспериментальных образцов в диапазоне до 100 МГц использовался метод анализа резонансных спектров на основной частоте и резонансах высших порядков [3].

На рисунке показаны частотные зависимости действительной части модуля упругости $C_{33}^{/D}$, а также механической добротности $Q_M^D = C_{33}^{/D} / C_{33}^{//D}$ пьезокерамики ПКР-35, полученные в результате анализа импедансных спектров гармоник толщинной моды колебаний высших порядков.

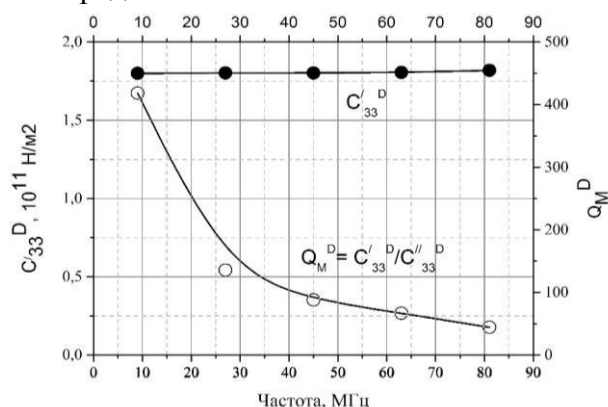


Рисунок. Частотные зависимости действительной части модуля упругости $C_{33}^{/D}$ и механической добротности $Q_M^D = C_{33}^{/D} / C_{33}^{//D}$ пьезокерамики ПКР-35

Как видно из рисунка модуль упругости $C_{33}^{/D}$ изменяется линейно и незначительно в исследованном диапазоне частот, в то время как механическая добротность

Q_M^D толщиной моды колебаний существенно снижается с ростом частоты, что объясняется ростом затухания ультразвуковых волн.

Исследование частотных зависимостей электрофизических параметров в частотном диапазоне до 100 МГц показало, что сегнетопъезокерамика ПКР-35, наряду с низкой диэлектрической проницаемостью, низкой плотностью и высокой скоростью звука, характеризуется отсутствием заметной упругой дисперсии и относительно низким, по сравнению с пьезокерамиками системы ЦТС, затуханием ультразвуковых волн в высокочастотном диапазоне, и может быть использована в высокочастотных ультразвуковых преобразователях для медицинской техники и неразрушающего контроля.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Saito Y. Lead-free piezoceramics / Yasuyoshi Saito, Hisaaki Takao, Toshihiko Tani, Tatsuhiko Nonoyama, Kazumasa Takatori, Takahiko Homma, Toshiatsu Nagaya, Masaya Nakamura // Nature. - 2004. - V. 432. - P. 84-87.
2. Reznitchenko L.A. Piezoelectricity in NaNbO_3 ceramics / L.A. Reznitchenko, A.V. Turik, E.M. Kuznetsova, V.P. Sakhnenko // J. Phys.: Condens. Matter. - 2001. - V. 13. - P. 3875-3885.
3. Rybianets A.N. Automatic iterative evaluation of complex material constants of highly attenuating piezocomposites / A.N. Rybianets, R. Tasker // Ferroelectrics. - 2007. - V. 360. - P. 90-95.

УДК 537.9

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ЭФФЕКТЕ В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПЛЕНКАХ

А.В. Солнышкин¹, И.Л. Ли², И.М. Морсаков³, А.Д. Сеньковский⁴, А.Н. Белов⁵

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, a.solnyshkin@mail.ru

²Студент, lee-irisha@mail.ru

³Соискатель, i.morsakov@yandex.ru

⁴Аспирант, ads@rambler.ru

⁵Д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник, nanointech@mail.ru

ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Национальный исследовательский университет «МИЭТ»

В данной работе рассмотрена кинетика пироэлектрического тока сегнетоэлектрических пленочных структур, сформированных на кремниевых и металлических подложках. Показано, что форма пироэлектрического отклика, регистрируемого динамическим методом, и связанные с ней релаксационные процессы различны для вышеуказанных материалов. Это связано с дополнительным пьезоэлектрическим вкладом, обусловленным тепловыми деформациями в гетероструктуре.

Ключевые слова: пироэлектрический эффект, сегнетоэлектрическая пленка, тепловые деформации.

В последнее время интенсивно проводятся исследования физических свойств полярных материалов в пленочном исполнении. Одним из базовых материалов для вышеуказанных применений являются сегнетоэлектрические пленки, изготовленные в виде гетероструктур металл-сегнетоэлектрик-металл-подложка. При анализе пироэлектрической активности таких структур недостаточное внимание уделяется механическим напряжениям, которые связаны с тепловыми деформациями подложек, электродов и других подслоев. Деформационные явления, обусловленные тепловым воздействием, наряду с изменением поляризации при прохождении тепловой волны оказывают влияние на релаксацию пироэлектрического отклика, наблюдаемого в динамиче-

ском режиме. Поэтому целью настоящей работы являлся анализ кинетики пьезоэлектрического тока, регистрируемого при воздействии модулированных тепловых потоков на сегнетоэлектрические пленочные структуры.

В качестве объектов исследования использовались поликристаллические пленки цирконата титаната свинца PZT, сформированные на кремниевых и металлических подложках. Пьезоэлектрический эффект исследован динамическим методом с использованием лазерного излучения, модулированного импульсами прямоугольной формы.

Экспериментально полученные результаты исследований приведены на рис. Форма пьезоэлектрического отклика, который регистрируется при освещении пленки PZT, сформированной на металлической подложке (рис. а), полностью воспроизводит форму теплового импульса, т.е. является прямоугольной. В случае пленки PZT на кремниевой подложке зависимости пьезоэлектрического тока от времени $I_{пиро}(t)$ имеют начальный выброс тока с последующим релаксационным спадом до нулевого значения (рис. б).

Расчет кинетики пьезоэлектрического отклика, учитывающий только скорость изменения температуры сегнетоэлектрического слоя, которая после прогрева пленки тепловым потоком в течение нескольких миллисекунд уменьшается до нуля, показал, что расчетные зависимости $I_{пиро}(t)$ при указанных частотах модуляции теплового потока соответствуют экспериментально наблюдаемым только для пленок PZT, сформированных на подложках из кремния.

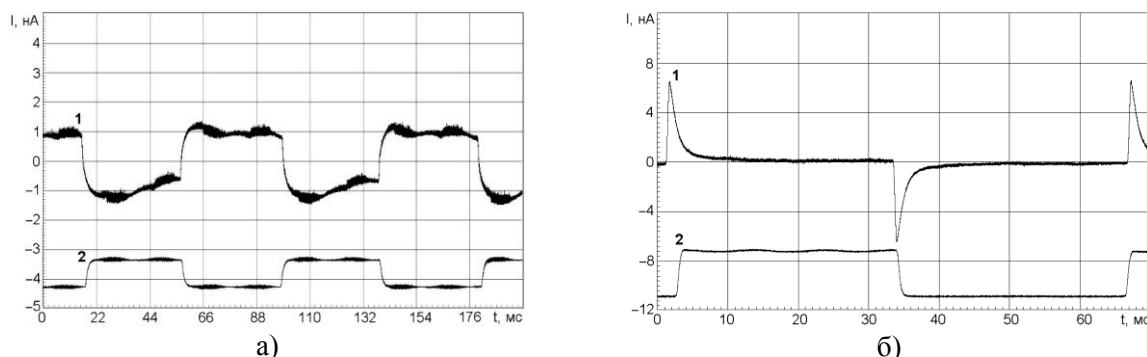


Рисунок. Осциллограммы пирооткликов (кривые 1), регистрируемых динамическим методом при воздействии модулированного теплового потока (кривые 2) на пленочные структуры: а – Al/PZT/стальная подложка, б – Pt/PZT/Pt/Si. Частота модуляции теплового потока – 18 Гц

Механизм, ответственный за появление отклика прямоугольной формы, заключается в возникновении тепловых деформаций подложки, механически связанной с сегнетоэлектрической пленкой. Значительное различие в коэффициентах теплового расширения пленки и металлической подложки вызывает дополнительную деформацию сегнетоэлектрического слоя, обуславливая появление пьезоэлектрической компоненты отклика.

Изменение поляризации сегнетоэлектрического слоя, вызванное его нагревом и деформациями, обусловлено изменением поляризации при варьировании температуры, а также вкладом пьезоэлектрической составляющей в величину поляризации. При одинаковых значениях коэффициента теплового расширения, как это имеет место для материала PZT и кремния, структура нагревается тепловым потоком, и деформация слоев имеет одинаковое значение при прохождении тепловой волны через систему пленка/подложка, т.е. дополнительное механическое воздействие на сегнетоэлектрическую пленку со стороны подложки отсутствует. Большая разница в величинах коэффициентов теплового расширения слоев, как это имеет место для PZT и металлической подложки, растягивает либо сжимает пленку в плоскости слоев, вызывая пьезоэлектрическую поляризацию, которая связана с пьезоэлектрическими коэффициентами e_{31} и e_{32} в случае сегнетоэлектрической пленки, ориентированной в направлении [111].

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (уникальный номер проекта RFMEFI57517X0129).

УДК 538.9

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В НАНОКОМПОЗИТЕ $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4 - \text{SiO}_2$

Л.С. Стекленева¹, Л.Н. Коротков², Е. Рысякевич-Пасек³

¹Аспирант, lubov_stekleneva@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, l_korotkov@mail.ru

³Д-р философии, ewa.rysiakiewicz@pwr.edu.pl

^{1,2}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

³Отделение экспериментальной физики факультета фундаментальных проблем технологии Вроцлавского университета науки и технологии

Представлены результаты исследования диэлектрической релаксации в нанокompозите $\text{Rb}_2\text{ZnCl}_4 - \text{SiO}_2$ вблизи температуры замораживания доменной структуры в частицах тетрахлорцинката рубидия. Установлено, что время релаксации диэлектрической проницаемости следует закону Фогеля – Фулчера.

Ключевые слова: сегнетоэлектрик, доменная структура, композит, пористое стекло.

Тетрахлорцинкат рубидия – известный сегнетоэлектрик с несоизмерной фазой. Переход из параэлектрической $Pnma$ в несоизмерную фазу $Pnma: -1ss$ реализуется около $T_i \approx 303$ К, а из несоизмерной в соизмерную сегнетоэлектрическую фазу ($Pn21a$) – в окрестностях $T_c \approx 195$ К. Этот переход сопровождается спонтанным появлением доменной структуры, подвижность которой ниже температуры $T^* \approx 154$ К существенно уменьшается, что обусловлено, по-видимому, фазовым переходом в доменной системе [1].

В то же время известно, что состояние этой системы зависит от ряда факторов, в том числе, формы, геометрических размеров и граничных условий на поверхности кристалла. В связи с этим можно ожидать, что доменная структура и ее свойства в нанокристаллическом сегнетоэлектрике будут заметно отличаться от таковых в объемном материале.

Целью данной работы стало изучение влияния ограниченной геометрии на динамику замораживания доменных границ в нанокристаллическом тетрахлорцинкате рубидия.

Образцы для исследований получали путем внедрения тетрахлорцинката рубидия в пористые матрицы SiO_2 со средним диаметром сквозных пор около 23 нм из насыщенного водного раствора.

В ходе эксперимента образцы помещали в криостат, где температура изменялась в пределах от 100 до 350 К. Измерения диэлектрической проницаемости ϵ' и диэлектрических потерь ϵ'' проводили на частотах $f = 5 - 500$ кГц с помощью измерителя E7-20. Полученные зависимости $\epsilon'(T)$ и $\epsilon''(T)$ изображены на рисунке ниже.

Видно, что в окрестностях температуры $T^* \approx 156$ К наблюдаются максимумы диэлектрической проницаемости и потерь. При этом оба максимума смещаются в направлении более высоких температур с повышением частоты измерительного поля, что указывает на их термоактивационный характер. Принимая во внимание, что максимум ϵ'' наблюдается при условии $\omega\tau=1$ ($\omega = 2\pi f$, а τ - время релаксации), можно определить зависимость $\tau(T)$.

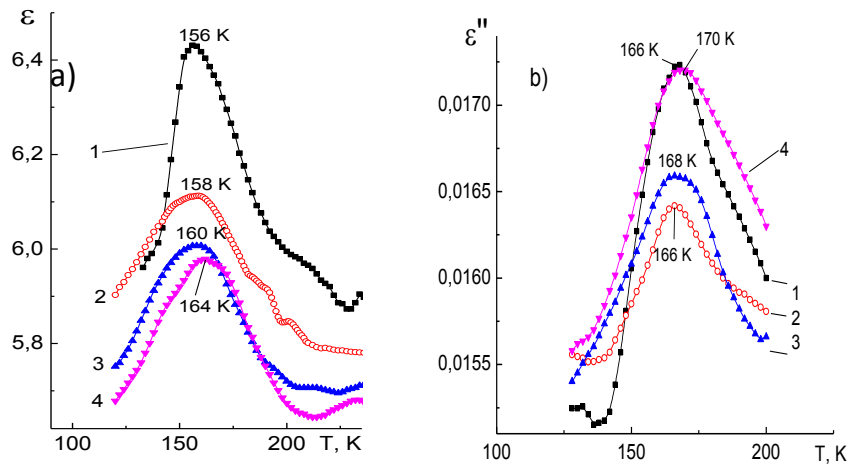


Рисунок. Температурные зависимости ϵ' (a) и ϵ'' (b) на частотах 5 (1), 10 (2), 50 (3) и 500 (4) кГц

Анализ температурной зависимости времени релаксации τ , показал, что она удовлетворительно описывается законом Фогеля – Фулчера

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp[U/k(T - T_0)], \quad (1)$$

где τ_0 – время, обратное частоте попыток преодоления потенциального барьера U , k – постоянная Больцмана, T_0 – температура Фогеля – Фулчера, интерпретируемая как температура статического замораживания электрических диполей.

Наилучшая аппроксимация экспериментальных данных достигается при значениях параметров: $\tau_0 \approx 0,3 \cdot 10^{-13}$ с, $U \approx 0,03$ эВ и $T_0 \approx 149$ К.

Полученное значение температуры статического замораживания T_0 хорошо согласуется со значением (148,3 К), полученным в [1] для объемного образца Rb_2ZnCl_4 .

Таким образом, результаты эксперимента позволяют сделать следующие выводы.

1. Во внедренных в пористую стеклянную матрицу наночастицах Rb_2ZnCl_4 ниже T_C возникает доменная структура.
2. Существенное снижение подвижности доменных границ ниже T^* , вероятно, связано с фазовым переходом в доменных стенках.
3. Динамика замораживания подвижности доменных границ может быть описана эмпирическим соотношением Фогеля – Фулчера.

Литература

1. Гриднев С.А., Горбатенко В.В., Прасолов Б.Н. О фазовом переходе в доменной стенке в Rb_2ZnCl_4 вблизи 150 К//Кристаллография. 1997. - Т. 42. - № 4. - С. 730 - 734.

УДК 537.9

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В МОНОКРИСТАЛЛАХ $Bi_2Ti_2O_7$

М.В. Таланов¹, А.А. Буш², К.Е. Каменцев³, С.А. Иванов⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, mvtalanov@gmail.com

²Д-р техн. наук, aabush@yandex.ru

³Канд. техн. наук, valkame@yandex.ru

⁴Д-р физ.-мат наук, isa@angstrom.uu.se

¹ФГФФУ ВО «Южный федеральный университет»

^{2,3}ФГБОУ ВО РГУ МИРЭА

⁴НИФХИ им. Л.Я. Карпова

В данной работе представлены результаты исследования диэлектрической проницаемости монокристаллов $Bi_2Ti_2O_7$ в диапазоне температур 4.2 – 1000 К и частот 25 – 10^6 Гц. Показано, что по своим диэлектрическим параметрам кристаллы $Bi_2Ti_2O_7$ при $T \approx 200$ К,

вблизи частотно-зависимой аномалии, близки к керамическим образцам. Однако диэлектрическая релаксация исследуемых кристаллов описываются эмпирическим соотношением Фогеля-Фулчера, а не Аррениуса, как в случае керамических образцов.

Ключевые слова: титанат висмута, монокристаллы, диэлектрическая релаксация.

Титанат висмута $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ является соединением со структурой пироклора, которое было впервые синтезировано в 1969 году и с тех пор привлекает к себе внимание исследователей благодаря своим диэлектрическим и фотокаталитическим свойствам [1,2]. Относительно высокие значения диэлектрической проницаемости ($\epsilon \sim 100$), низкие диэлектрические потери, наряду с низкими температурами синтеза, делают его перспективным материалом для использования в различных конденсаторах. На температурных кривых ϵ титаната висмута присутствует частотно-зависимая аномалия в виде ступеньки при $T \sim 200$ К, которая изначально связывалась с сегнетоэлектрическим фазовым переходом [3]. Позднее было показано, что $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ является линейным диэлектриком, сохраняющим кубическую симметрию [4]. На сегодняшний день нет единого понимания возможных механизмов, ответственных за диэлектрическую релаксацию в $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$. По мнению ряда исследователей [4] поведение диэлектрической проницаемости связано с перескоки атомов висмута между шестью симметрично эквивалентными позициями, что, также характерно и для другого висмут-содержащего пироклора $\text{Bi}_{1.5}\text{Zn}_{0.92}\text{Nb}_{1.5}\text{O}_{6.92}$ [5]. Однако в недавних работах утверждается, что релаксации пространственного заряда приводит к появлению температурно-частотной аномалии в керамике титаната висмута [6]. Отметим, что в известных работах исследование диэлектрических свойств проводилось на керамических образцах, что значительно усложняет интерпретацию экспериментальных результатов. Таким образом, целью настоящей работы является изучение диэлектрических свойств монокристаллов $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ и установление причин возникновения частотно-зависимой аномалии.

Выращивание монокристаллов проводили в условиях медленного охлаждения расплава смеси $(1-x)\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot x\text{TiO}_2$, $x \approx 0.6$ в стабилизированных иттрием оксидциркониевых тиглях. В результате охлаждения расплава смеси от 1200°C до 900°C со скоростью 7.5 град/ч были получены прозрачные монокристаллы желто-коричневого цвета изометрического габитуса размерами до 10 мм в поперечнике. На основании рентгенофазового анализа установлено, что дифрактограмма порошка кристаллов по положению и интенсивности рентгеновских рефлексов соответствует дифрактограмме фазы $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ со структурой пироклора. Диэлектрические измерения выполнены с помощью измерителя иммитанса E7-20 (ОАО «МНИПИ», Минск) на частотах $25 - 10^6$ Гц в области температур $4.2 - 1000$ К.

Частотно-зависимая аномалия диэлектрической проницаемости была обнаружена при $T \approx 200$ К, что сопоставимо с предыдущими результатами, полученными на керамических образцах [4,6]. Максимальные значения ϵ равны 116 (при $f = 500$ кГц), а $\tan \delta < 0.01$, что также очень близко к результатам в указанных работах, где $\epsilon = 115$ [4]. Однако отметим и различия: при частотах менее 10 кГц не наблюдается никаких дополнительных аномалий при $T > 200$ К, как в работе [5]. При увеличении f происходит смещение температуры максимума (T_m) на более чем 50 К. Попытки описать поведение $T_m(f)$ уравнением Аррениуса (1) приводили к физически не значимым величинам частоты попыток преодоления потенциального барьера $f_0 \sim 10^{25}$). Однако было установлено, что полученные экспериментальные результаты хорошо ($c R^2 = 0.994$, R - коэффициент детерминации) описываются эмпирическим соотношением Фогеля-Фулчера. Причины появления частотно-зависимой аномалии диэлектрической проницаемости $\text{Bi}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ будут обсуждаться в докладе.

Работа выполнена при поддержке проекта №3.1099.2017/ПЧ Минобрнауки (Буш А.А.), гранта РНФ 18-72-00030 (Таланов М.В.).

Литература

1. Knop O. Pyrochlores V. Thermoanalytic, X-ray, neutron, infrared, and dielectric studies of $A_2Ti_2O_7$ titanates / O. Knop, F. Brisse, L. Castelliz // *Can J Chem.* – 1969. - V. 47. - P. 971–990.
2. Bencina M. $Bi_2Ti_2O_7$ -based pyrochlore nanoparticles and their superior photocatalytic activity under visible light / M. Bencina, M. Valant // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 2018. - V. 101. - P. 82–90.
3. Yordanov S.P. Dielectric properties of the ferroelectric $Bi_2Ti_2O_7$ ceramics / S.P. Yordanov, I. Ivanov, Ch. P. Carapanov // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 1998. - V. 31. - P. 800–806.
4. Esquivel-Elizondo J.R. $Bi_2Ti_2O_7$: It Is Not What You Have Read / J.R. Esquivel-Elizondo, B.B. Hinojosa, J.C. Nino // *Chem. Mater.* – 2011. - V. 23. - P. 4965–4974.
5. Nino J.C. Correlation between infrared phonon modes and dielectric relaxation in Bi_2O_3 – ZnO – Nb_2O_5 cubic pyrochlore / J. C. Nino, M. T. Lanagan, C. A. Randall, S. Kamba // *Appl. Phys. Lett.* – 2002. - V. 81. - P. 4404–4406.
6. Turner C.G. Dielectric Properties and Relaxation of $Bi_2Ti_2O_7$ / C.G. Turner, J.R. Esquivel-Elizondo, J.C. Nino // *J. Amer. Ceram. Soc.* – 2014. - V. 97. - P. 1763–1768.

UDC 538.9

THE STUDY OF PHONON DYNAMICS IN RELAXOR FERROELECTRIC $PbNi_{1/3}Nb_{2/3}O_3$

A.I. Fedoseev¹, S.G. Lushnikov², V.G. Zalesskii³, R.S. Katiyar⁴, J.-H. Ko⁵

¹Senior researcher, fedoseev@mail.ioffe.ru

²Doctor of sciences, professor, sergey.lushnikov@mail.ioffe.ru

³Senior researcher, nsh@mail.ioffe.ru

⁴Doctor of sciences, professor, ram.katiyar@upr.edu

⁵Doctor of sciences, professor, hwangko@hallym.ac.kr

^{1,2,3}Ioffe Institute, St.-Petersburg, Russia

⁴Physics Department, University of Puerto Rico, San Juan, PR 00931-3343 USA

⁵School of Nano Convergence Technology, Nano Convergence Technology Center, Hallym University, Hallym, Korea

Detailed temperature studies of the dielectric response, conductivity, Brillouin and Raman spectra are presented in this work. Analysis of the obtained data revealed a number of anomalies in the phonon dynamics of the relaxor ferroelectric $PbNi_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PNN), which are not found in typical relaxor ferroelectrics, such as $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN).

Keywords: dielectric permittivity, local and bulk conductivity, optical and acoustic phonons, quasi-elastic light scattering.

$PbNi_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ – (PNN) single crystals belong to the family of complex perovskites with the general formula $AB'_xB''_{1-x}O_3$. The physical properties of this family of perovskites are the subject of intense research, but PNN crystals have been poorly studied, which can be explained by difficulties in synthesis of ceramics and growth of single crystals.

The lattice dynamics of the PNN crystal has been studied by dielectric spectroscopy [1], Brillouin and Raman light scattering [2,3] earlier. Raman light scattering experiments have confirmed the existence of polarized scattering spectra which change with temperature [3]. The behavior of low-frequency optical phonon is characterized by anomaly in the vicinity of the phase transition from cubic to a ferroelectric rhombohedral phase $T_c \approx 153$ K [4]. A wide anomalies of the frequency shift (which is proportional to the velocity) and the full width at half maximum (FWHM, which is proportional to the attenuation) of longitudinal acoustic (LA) phonon are a characteristic features of relaxor ferroelectrics [2]. But in contrast to $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN) - typical representative of relaxor ferroelectrics, the minimum in velocity and the maximum in attenuation in PNN do not correlate with the temperature of maximum in the dielectric permittivity T_m , which is equal to T_c . The temperature evolution of quasi-elastic light scattering (QELS) in PNN is nontrivial. Thus, in spite of a seeming similarity between the two compounds, PMN and PNN have different lattice dynamics. This moti-

vated our detailed studies of dielectric, Brillouin and Raman experiments in a wide temperature range 77-700 K.

The PNN single crystals were grown by solution in the melt. The dielectric response and AC- conductivity were measured by a Good Will LCR-819 impedance-meter at the frequency range 12 Hz -100 kHz and at temperatures 78 -750 K. The DC-conductivity was measured by an electrometer with sensitivity up to 1 pA. In our measurements the maximum of the real permittivity at a frequency of 1 kHz reaches $\varepsilon'_m = 5500$ at $T_m = 153$ K and width of maximum is $\Delta T = 145$ K (PMN, for comparison: $\varepsilon'_m=11400$, $T_m= 265$ K and $\Delta T = 80$ K). A local conductivity due to the characteristics of the Ni atom was obtained in the temperature range 100–200 K. At the temperature above 600 K an appreciable increase in bulk conductivity was found.

The temperature investigations of the light scattering spectra were carried out in the backscattering geometry by using an advanced Sandercock's (3+3)-tandem interferometer (TFP-2) for Brillouin measurements and the T64000 spectrophotometer for Raman study. Raman measurements showed the difference in the behavior of optic phonons of PNN and PMN crystals. The intensity of Raman spectra of PNN increases with decreasing temperature, at the same time new phonon lines appear. The "softening" of the frequency shift, the maxima of the intensity and full width at half maximum (FWHM) of the low-lying optical phonon in the region $T_c = 153$ K are revealed. Unusual temperature dependences of quasi-elastic light scattering parameters are found. The maximum intensity of QELS is observed at the room temperature, while the anomaly of the FWHM of QELS is shifted to ~ 460 K.

When we compared the Brillouin spectra of the PNN and PMN crystals, discrepancies were also found. At temperatures above T_c in the PNN crystal, where cubic symmetry is assumed, at backscattering geometry of experiment with phonon wave vector along [001]-direction according to the selection rules only longitudinal acoustic phonon (LA) should be observed, as it was for PMN. However, we found additional transverse acoustic modes (TA) in the spectra of PNN, which are forbidden in Brillouin spectra by the selection rules for cubic symmetry. It can be assumed that the symmetry of the PNN crystal at these temperatures is different from cubic symmetry. It should also be noted, that two additional peaks were found in the temperature dependence of the FWHM of the LA phonon at temperatures $T_1 \sim 560$ K and $T_2 \sim 440$ K. These anomalies correspond to weak anomalies in the temperature dependence of the frequency shift of this phonon. In the low-temperature region, in the temperature range between $T_3 \sim 212$ K and $T_4 \sim 130$ K, there is a noticeable slowdown in the change in both the frequency shift and the FWHM of the LA phonon. As a result, their peak anomalies, which were expected at T_c for PNN crystal, were in fact suppressed. The results of measurements in PNN crystals are discussed in the framework of modern concepts of the physics of relaxor ferroelectrics.

Acknowledgment. This work was supported by Russian Foundation for Basic Research (Grant N18-502-51050).

References

1. V.A. Bokov and I.E. Mylnikova, Sov. Phys. Solid State 3, 613 (1961)
2. J. Fan, et al., J. Appl. Phys., 91, 2262 (2002)
3. J. Kano, H. Taniguchi, D. Fu, M. Itoh, S. Kojima, Ferroelectrics, 367, 67 (2008)
4. K. Kusumoto, T. Sekiya, Ferroelectrics, 240, 327-334 (2000).

РОЛЬ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО РЕЛАКСОРА 0,89PMN-0,11PZT В МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ОТКЛИКЕ КОМПОЗИТА «РЕЛАКСОР-ФЕРРИТ»

С.А. Гриднев¹, М.В. Хахленков², Н.А. Толстых³

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, s_gridnev@mail.ru

²Аспирант, fominov2014@bk.ru

³Канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер БНОЦ, mad_nik@bk.ru
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Экспериментально изучено влияние постоянного электрического поля E на электромеханические свойства релаксора 0,89PMN-0.11PZT и магнитоэлектрического отклика в слоистом композите на его основе.

Ключевые слова: слоистые композиты, магнитоэлектрический эффект, сегнетоэлектрический релаксор.

Современное развитие областей науки и техники нуждается в новых подходах и ряде новых функциональных решений. Одним из широко известных и интенсивно развивающихся направлений в материаловедении является магнитоэлектрические (МЭ) композиты. Для эффективной работы МЭ композитов необходимо постоянное подмагничивающее поле, требующее энергозатратных и крупногабаритных устройств. В данной работе предлагается использовать в таких композитах не магнитное, а электрическое смещение, подаваемое на сегнетоэлектрический релаксор для увеличения МЭ отклика композита.

Образцы получены по керамической технологии и аттестованного на рентгеновском дифрактометре Bruker D2 Phaser.

На температурной зависимости диэлектрической проницаемости (Рис. 1) наблюдается явно выраженная дисперсия ε с характерным смещением температуры максимума ε в сторону более высоких температур при увеличении частоты измерительного поля, что свидетельствует о термоактивированной природе релаксации поляризации [1].

На зависимости обратной диэлектрической проницаемости от температуры имеется область, в которой не выполняется линейный закон Кюри-Вейсса. Установлено, что в этой области температур достаточно хорошо работает «квадратичный закон Кюри-Вейсса», который следует из модели флуктуаций состава Смоленского–Исупова для сегнетоэлектриков с размытым фазовым переходом.

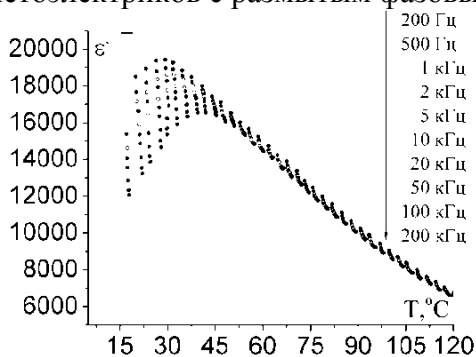


Рис.1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости в керамическом твердом растворе 0,89PMN–0,11PZT при различных частотах измерительного поля

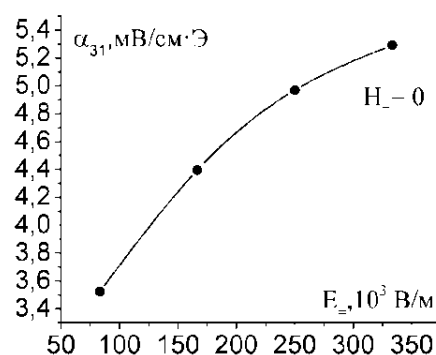


Рис.2. Зависимость поперечного магнитоэлектрического коэффициента α_{31} при различных значениях постоянного электрического поля

Поскольку исследуемый релаксор 0,89PMN-0.11PZT обладает большим индуцированным пьезоэффектом, зависящим от поля E , то он был использован в слоистом МЭ композите в качестве пьезослоя, склеенного с ферритовым слоем $Mn_{0.4}Zn_{0.6}Fe_2O_4$.

Обнаружено, что МЭ коэффициент по напряжению α_{31} увеличивается с ростом напряженности поля E в отсутствие смещающего магнитного поля (Рис. 2), что позволяет управлять магнитоэлектрическим преобразованием без постоянного подмагничивания.

Литература

1. Бовтун В.П., Крайник Н.Н., Маркова Л.А., Поплавко Ю.М., Смоленский Г.А. Дисперсия диэлектрической проницаемости в области размытого фазового перехода магнитообата свинца // ФТТ. 1984. Т. 26. № 2. С. 378-381.

УДК 538.95

УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ЯВЛЕНИЙ В ДИССИПАТИВНЫХ СРЕДАХ

И.А. Швецов¹, Д.И. Макарьев², Н.А. Швецова³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Аспирант, wbeg@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, dmakarev@rambler.ru

³Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В данной работе представлен новый метод, использующий поверхностные акустические волны (ПАВ) для оценки параметров материала и изучения релаксационных процессов в сегнетоэлектриках. Детальное экспериментальное исследование влияния постоянного электрического поля на параметры распространения ПАВ в пьезокерамиках с различной «сегнетожесткостью» позволило разработать новый метод исследования доменно-ориентационных процессов и процессов релаксации пространственного заряда в сегнетопьезоэлектриках.

Ключевые слова: поверхностные акустические волны, релаксация, сегнетоэлектрики, домены, пространственный заряд.

В настоящее время поверхностные акустические волны (ПАВ) широко применяются в акустоэлектронных устройствах и для исследования свойств материалов [1]. Влияние внешних воздействий на распространение поверхностных акустических волн (ПАВ) в пьезоэлектрических материалах было предметом активного экспериментального изучения в основном из-за возможности создания управляемых устройств обработки сигналов или компенсации температурных зависимостей ПАВ параметров. С другой стороны, ПАВ является мощным ультразвуковым средством для измерения параметров материала и изучения физических процессов в пьезоэлектрических материалах [2].

В настоящей работе мы обобщили результаты детальных экспериментальных исследований влияния постоянного электрического поля на параметры распространения ПАВ в пьезокерамиках с различной «сегнетожесткостью». В качестве объектов исследования были выбраны «сегнетомягкие» составы системы ЦТС, принадлежащие морфотропной области, с низким коэрцитивным полем и высокой лабильностью доменной структуры, ромбоэдрические и тетрагональные составы ЦТС со средней степенью «сегнетожесткости», а также «сегнетожесткие» тетрагональные составы на основе ЦТС и титаната свинца (ТС) с высоким коэрцитивным полем и сильно зажатой доменной структурой [3]. Время задержки и затухание ПАВ измерялись стандартными методами наложения высокочастотных радиоимпульсов [1, 2].

На рисунке в качестве примера приведены изменения параметров распространения ПАВ в «сегнетожесткой» керамике на основе ТС при воздействии импульсов постоянного электрического напряжения.

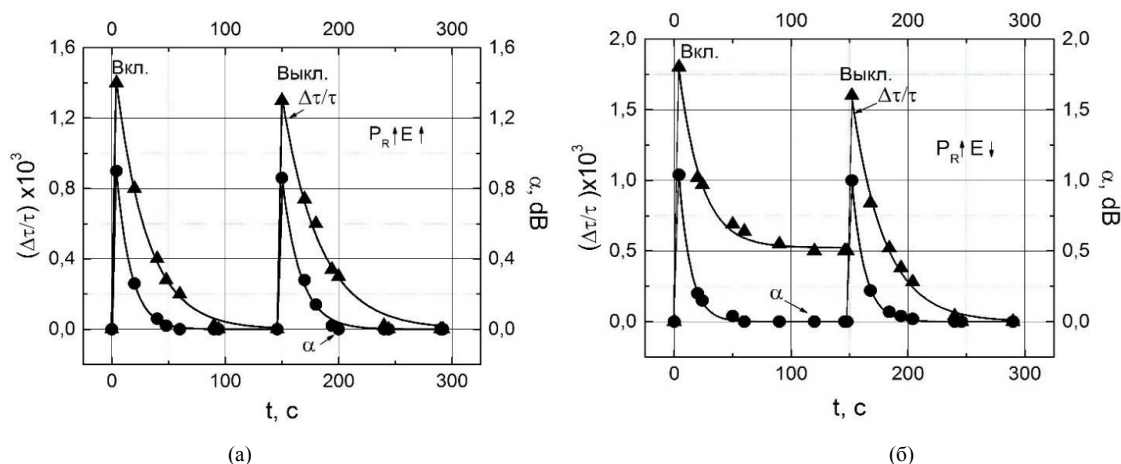


Рисунок. Изменения затухания α и времени задержки $\Delta\tau/\tau$ ПАВ при подаче отрицательного (а) и положительного (б) импульсов постоянного напряжения длительностью $t = 150$ с и амплитудой 720 В ($|E| = 12$ кВ/см) для состава на основе ТС (ПКР-55)

Качественный анализ влияния процессов ориентации доменов и релаксации пространственного заряда на распространение ПАВ под воздействием постоянного электрического поля показал, что характер изменения параметров ПАВ зависит от степени «сегнетожесткости» и регулируется следующими механизмами:

- для «сегнетожесткой» пьезокерамики - взаимодействием ПАВ с движущимися носителями пространственного заряда, экранирующими приложенное электрическое поле и предотвращающими переключение поляризации;
- для «сегнетомягкой» пьезокерамики - взаимодействием ПАВ с движущимися доменными стенками (процессы ориентации доменов).

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Rybyanets A.N. Characterization Techniques for Piezoelectric Materials and Devices / A.N. Rybyanets, A.A. Naumenko, N.A. Shvetsova // Nova Science Publishers Inc. - 2013. - Chapter 1. - P. 275-308.
2. Rybyanets A. SAW Method for Measuring of Relaxation Process in Ferroelectric Ceramics / A. Rybyanets // Proc. 2007 IEEE Ultrason. Symp. IUS. - 2007. - P. 1909-1912.
3. Рыбянец А.Н. Экстремальные электромеханические характеристики и микроструктурные особенности сегнетопьезокерамик на основе титаната свинца / А.Н. Рыбянец, М.А. Луговая, Г.М. Константинов, Н.А. Швецова, Д.И. Макарьев // Известия РАН. Серия физическая. - 2018. - Т. 82. - № 3. - С. 287-292.

УДК 537.9

ЛОКАЛЬНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ ПОЛЯРИЗАЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫМ И ИОННЫМ ПУЧКОМ В МОНОКРИСТАЛЛАХ НИОБАТА БАРИЯ-СТРОНЦИЯ

В.А. Шихова¹, В.В. Федоровых², Д.С. Чезганов³, Е.О. Власов⁴, П.С. Зеленовский⁵,
Е.Д. Грешняков⁶, М.С. Небогатиков⁷, В.Я. Шур⁸, Л.И. Ивлева⁹

¹К-т физ.-мат. наук, доцент, vera@urfu.ru

²Студент, лаборант, vyacheslav.fedorovyh@mail.ru

³К-т физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Chezganov.Dmitry@urfu.ru

⁴Студент, лаборант-исследователь, evgeny.vlasov@urfu.ru
⁵К-т физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, zelenovskiy@urfu.ru
⁶Младший научный сотрудник, evgeny.greshnyakov@urfu.ru
⁷Научный сотрудник, maxneb@urfu.ru
⁸Д-р физ.-мат. наук, профессор, vladimir.shur@urfu.ru
ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
⁹Д-р техн. наук, зав. лаб., ivleva@ran.gpi.ru
ФГБУН Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН

В данной работе проведено исследование формирования доменной структуры при облучении электронным и ионным пучком в монокристаллах ниобата бария-стронция, с чистой поверхностью и поверхностью, покрытой диэлектрическим слоем. Получены зависимости размеров и глубины доменов от дозы облучения.

Ключевые слова: релаксорные сегнетоэлектрики, ниобат бария-стронция, переключение поляризации, доменная структура, облучение электронным пучком, облучение ионным пучком.

Было исследовано локальное переключение поляризации под действием облучения электронным и ионным пучком средних энергий в монокристаллах ниобата бария-стронция ($\text{Sr}_{0.61}\text{Ba}_{0.39}\text{Nb}_2\text{O}_6$, SBN).

Монокристаллы SBN были выращены по модифицированной методике Степанова. Исследуемые пластины были вырезаны перпендикулярно полярной оси и отполированы до оптического качества. Облучаемая поверхность была как «чистой», так и покрытой диэлектрическим слоем (фоторезистом) [1].

Для облучения электронами и ионами средних энергий использовался сканирующий электронный микроскоп Auriga Crossbeam (Carl Zeiss) [1]. Применялись различные режимы облучения: (1) точечное облучение с расстоянием между точками не менее 100 мкм; (2) точечное облучение матрицей 5×5 с расстоянием между точками 7 мкм и 15 мкм; (3) полосовое облучение с периодом 7 мкм. При полосовом облучении запись производилась вдоль Y кристаллографического направления и под 45° к нему.

Доменные структуры визуализировались на поверхности кристаллов методом силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика. Для исследования доменной структуры в объеме кристаллов использовались конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния [2] и микроскопия генерации второй гармоники типа Черенкова [3].

В результате точечного облучения формировались изолированные круглые домены. Изотропный рост был обусловлен генерацией ступеней на доменной стенке в результате слияния с остаточными нанодоменами. Наблюдалась линейная зависимость переключенной площади от дозы облучения, которая была отнесена за счет экранирования деполяризующего поля электронным пучком. При записи матрицы было обнаружено насыщение зависимости переключенной площади от дозы облучения, обусловленное электростатическим взаимодействием сближающихся заряженных доменных стенок.

В результате полосового облучения формировались квазирегулярные цепи изолированных доменов (при дозах менее 100 мкКл/см²) и полосовые домены (при дозах более 100 мкКл/см²). Ширина полосовых доменов линейно увеличивалась с ростом дозы до 300 мкКл/см². Ширина полосовых доменов при записи вдоль Y направления была больше, чем доменов, записанных под 45° , что объясняется анизотропией скорости движения доменных стенок.

Для точечного и полосового облучения были измерены зависимости глубины созданных доменов от дозы облучения. Максимальная глубина доменов достигала 100 мкм.

Наилучшее качество доменных структур было достигнуто в образцах с локализацией электронов в диэлектрическом слое. Записанные домены обладали высокой ста-

бильностью. Полученные результаты могут быть использованы для развития доменной инженерии в монокристаллах релаксорных сегнетоэлектриков.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» ИЕИМ УрФУ. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-72-00008).

Литература

1. Shur V.Ya. Domain patterning by electron beam of MgO doped lithium niobate covered by resist / V. Ya. Shur, D. S. Chezganov, A. R. Akhmatkhanov, D. K. Kuznetsov // Appl. Phys. Lett. – 2015. - V. 106. – №. 23. – Art. no. 232902.

2. Zelenovskiy P.S. Micro-Raman visualization of domain structure in strontium barium niobate single crystals / P. S. Zelenovskiy, V. A. Shikhova, A. V. Ievlev, M. M. Neradovskiy, V. Ya. Shur // Ferroelectrics. – 2012. – V. 439. – №. 1. – P. 33-39.

3. Sheng Y. Three-dimensional ferroelectric domain visualization by Cerenkov-type second harmonic generation / Y. Sheng, A. Best, H.-J. Butt, W. Krolikowski, A. Arie, K. Koynov // Opt. Express. – 2010. V. 18. – №. 16. – P. 16539-16545.

УДК 537.226.3

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ МОНОКРИСТАЛЛОВ PIN-PMN-PT МЕТОДАМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ И ТЕПЛОВЫХ ШУМОВ

И.В Шнайдштейн

к.ф.-м.н., доцент, shnidshtein@physics.msu.ru

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Высокоэффективные пьезоэлектрические материалы со структурой перовскита представляют интерес как для многочисленных технических применений, так и для исследования механизмов поляризации диэлектриков. Одним из таких классов соединений являются кристаллические твердые растворы типа релаксор-сегнетоэлектрик на основе магнониобата свинца (PMN) и титаната свинца (PT). Добавляя в твердые растворы PMN-PT различные примеси можно менять границы температурной области, где проявляется их высокая пьезоэлектрическая активность. В частности, добавка индия повышает температуры фазовых переходов в этих твердых растворах, расширяя область их практического применения.

В представленном докладе речь идет о твердом растворе, содержащем 49% магнониобата свинца, 27% титаната свинца и 24% индониобата свинца (PIN). Такое соотношение компонент позволяет наблюдать фазовые переходы вблизи морфотропной фазовой границы, при которых значения пьезоэлектрических коэффициентов достигают особенно высоких значений. Однако в этой области также повышается чувствительность кристаллов к внешним воздействиям и их предыстории.

Сравниваются результаты измерений диэлектрических характеристик, полученных на экспериментальных установках, использующих метод диэлектрической спектроскопии и различные реализации метода тепловых шумов. Полученные данные отличаются значительным разнообразием, однако можно отметить заметное сходство температурных и частотных зависимостей тангенса диэлектрических потерь фиксируемых измерениями, проведенными всеми используемыми методами.

Обсуждаются возможные механизмы диэлектрической релаксации в твердых растворах PIN-PMN-PT, согласующиеся с наблюдаемыми зависимостями диэлектрических характеристик этих монокристаллов. Анализируются различные вклады в процессы диэлектрической релаксации, их связи с особенностями измерительных процедур и предыстории образцов.

IV. МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ

UDC 537.622.6

OSCILLATORY DYNAMICS OF MAGNETIC RELAXATION IN Pt/Co/Ir/Co/Pt SYNTHETIC ANTIFERROMAGNET

R.B.Morgunov¹, A.I.Bezverhni², O.V.Koplak³

¹Professor, morgunov2005@yandex.ru

²PhD student, bezverhni.alex@gmail.com

³Head of laboratory, o.koplak@gmail.com

^{1,2,3}Institute of Problems of Chemical Physics, 142432, Chernogolovka, Russia

¹Immanuel Kant Baltic Federal University, 236016, Kaliningrad, Russia

^{1,2,3}Tambov State Technical University, 392002, Tambov, Russia

Tuning of the thin layer thickness and temperature causes coincidence of the critical magnetic fields of the two or even three interstate transitions. Double coincidence results in non-monotonic single extreme magnetic relaxation, while triple point (coincidence of the three critical fields) causes oscillatory magnetic relaxation.

Keywords: synthetic antiferromagnets, domain walls, perpendicular anisotropy, magnetic relaxation, dynamical system, oscillations.

The spin valves and SAF are the simplest devices of spintronics. They consist of two ferromagnetic thin films of different thicknesses (~ 1 nm) and a non-magnetic spacer separating the films (Figure 1). Deliberately small thickness of the ferromagnetic layers (typically < 2 nm) provides the interface with a perpendicular anisotropy which dominates the bulk magnetic anisotropy. Ferromagnetic layers have either a single domain (at linear size ≤ 10 nm) or a multi domain (at linear size > 100 nm) magnetic structure. Large SAFs are required as a spin-valve platform for the industry of the magnetic sensors applicable in the medical and biology analysis. The magnetization reversals and the dynamics of magnetic relaxation affect speed and critical field of the spin valve sensors and SAF structures [1, 2].

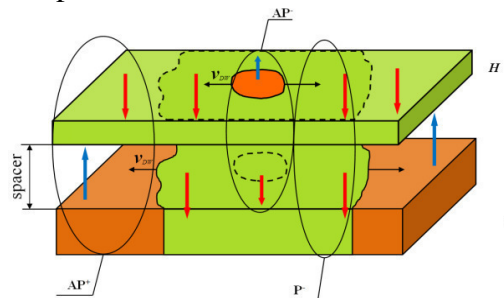


Fig.1. A sketch of the spin valve, with the denoted areas filled by AP+, AP- and P- domains

In this paper, we present a detailed study of the oscillating magnetic relaxation in the synthetic antiferromagnet (SAF) with two ferromagnetic Co layers of different thicknesses separated by an Ir spacer. The four stable magnetic states of the SAF are determined by the mutual alignment of magnetizations in the layers and are controlled by both the magnetic interlayer exchange interaction and the Zeeman energy. The specific variations in the thicknesses of the layers and/or temperature allows the existence of a ‘triple point’, which corresponds to a coincidence of the critical switching fields for two or three interstate transitions. In this case, two or even three different types of magnetization reversals occur simultaneously and competitively. The paper is dedicated to the description of the methods and exploration of the results of the experimental investigation regarding the reversal of the magnetization performed for that very case. A non-monotonic dependence of the domain wall speed on magnetic field H and an oscillating time dependence of magnetization M in a constant magnetic field were observed in a Pt/Co/Ir/Co/Pt synthetic antiferromagnet with perpendicular anisotropy

due to interplay between the magnetic nuclei produced by Dzyaloshinskii-Moria Interaction (DMI) (Figure 2).

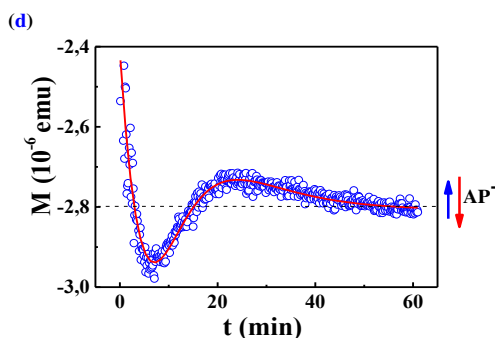


Fig. 2. Oscillating magnetic relaxation in Pt(3 nm)/Co(1.05 nm)/Ir(1.5 nm)/Co(0.7 nm)/Pt (3 nm) in magnetic field - 1370 Oe at $T = 100$ K. The solid lines are exact solutions of the dynamical system

The proximity of two or three (triple point) critical fields of SAF switching is the necessary condition for both a non-monotonic magnetic relaxation and an oscillating time variations of the magnetization. The dynamical model describing the interaction and subsequent evolution of the magnetic nuclei demonstrates that this non-trivial magnetic relaxation obeys a simple Schrödinger equation.

The work was supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 3.1992.2017 /4.6). We are grateful to Prof. S.Mangin for fruitful discussions and samples presented in our disposal.

References

1. Fache T., Tarazona H.S., Liu J., Lvova G., Applegate M.J., Rojas-Sanchez J.C., Petit-Watlot S., Landauro C.V., Quispe-Marcatoma J., Morgunov R., Barnes C.H.W., Mangin S.//Phys. Rev. B. – 2018. – V. 98. – P. 064410.
2. Talantsev A., Lu Y., Fache T. et al.// Journal of Physics: Condensed Matter. – 2018. - V. 30. - P.135804.

УДК 537.622.6

НЕМОНОТОННАЯ ПОЛЕВАЯ ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ ДОМЕННОЙ СТЕНКИ КАК СЛЕДСТВИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЗАРОДЫШЕЙ НАМАГНИЧЕННОСТИ РАЗНОГО ЗНАКА В СИНТЕТИЧЕСКИХ ФЕРРИМАГНЕТИКАХ С ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОЙ МАГНИТНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ Pt/Co/Ir/Co/Pt

А.И. Безверхний¹, А.Д. Таланцев², Р.Б. Моргунов³

¹Аспирант, bezverhni.alex@gmail.com

²Младший научный сотрудник, artgtx32@mail.ru

³Главный научный сотрудник, morgunov2005@yandex.ru

^{1,2,3}Институт проблем химической физики РАН, 142432, Черноголовка, Россия

^{1, 2,3}Тамбовский государственный технический университет, 392000, Тамбов, Россия

³Балтийский федеральный университет, 236016 Калининград, Россия

В синтетическом ферритмагнетике с перпендикулярной магнитной анизотропией Pt/Co/Ir/Co/Pt скорость расширения зародышей намагниченности разного типа зависит от их окружения другими зародышами. Скорость расширения зародышей AP^- зависит от поля немонотонно, так как с ростом поля эти зародыши окружены сначала фазой AP^+ , затем участками фаз AP^+ и P^- и в сильных полях – только фазой P^- .

Ключевые слова: спинтроника, синтетический ферритмагнетик, релаксация намагниченности, зародыши намагниченности.

Синтетические ферримагнетики (СФ) с перпендикулярной магнитной анизотропией (ПМА) это гетероструктуры состоящие из сверхтонких ферромагнитных слоёв разной толщины (~1 nm) разделенных сверхтонким слоем немагнитного металла (~1 nm). Обменное антиферромагнитное взаимодействие RKKY между ферромагнитными слоями обеспечивается перекрытием волновых функций электронов проводимости. Это взаимодействие обеспечивает четыре стабильных состояния намагниченности в СФ: два состояния с параллельной ориентацией намагниченности в слоях ферромагнетика ($P^+ - \uparrow\uparrow, P^- - \downarrow\downarrow$) и два с антипараллельной ($AP^+ - \downarrow\uparrow, AP^- - \uparrow\downarrow$). Ранее нами были обнаружены немонотонная [1] и осциллирующая релаксации намагниченности длительностью ~ 40 min [2] в $Pt/Co/Ir/Co/Pt$ в постоянном магнитном поле. При немонотонной релаксации система переходит из начального состояния AP^+ в выгодное по энергии состояние AP^- через промежуточное P^- . Для описания немонотонной релаксации намагниченности в [1] была использована модель макроспина, не учитывающая доменную структуру и взаимодействие зародышей намагниченности. Эта модель не способна количественно описать результаты измерений. Для учёта доменной структуры при описании немонотонной релаксации необходимо установить динамические характеристики зародышей намагниченности. Для чего был использован метод магнитооптической микроскопии Керра.

Цель работы заключается в установлении закономерностей динамики возникновения, аннигиляции и распространения зародышей намагниченности разного типа (AP^+, AP^-, P^-) в поле, близком к полю перехода между этими состояниями намагниченности в СФ с ПМА $Pt/Co/Ir/Co/Pt$.

При измерении скорости доменной границы зародышей AP^- , вблизи поля переключения между состояниями намагниченности AP^+, AP^-, P^- была обнаружена её немонотонная зависимость от приложенного поля (рис.).

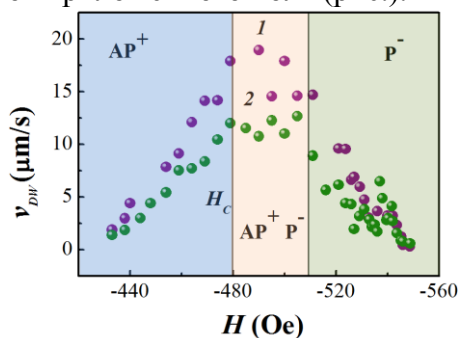


Рисунок. Зависимость скорости доменной границы AP^- от поля для двух отдельных доменов 1 и 2. Перед началом измерения образец насыщался в постоянном магнитном поле +1200 Oe.

Вертикальной линией H_C показано поле переключения между состояниями AP^+, AP^-, P^- .

Цветами обозначены интервалы полей в которых меняется окружение зародыша AP^-

Полевые зависимости 1 и 2 скорости двух отдельных зародышей AP^- являются немонотонными, что указывает на воспроизводимость результатов измерений. В диапазоне полей от -433 Oe до -480 Oe (рис. 1 область AP^+), скорость возрастает с абсолютным значением поля. Такое поведение скорости доменной границы характерно для режима ползучести и хорошо известно в литературе [3]. В интервале полей от -490 Oe до -549 Oe скорость доменной границы зародыша AP^- уменьшается с ростом абсолютного значения поля. В интервале от -490 Oe до -510 Oe (рис. область $AP^+ P^-$) зародыши AP^- окружены одновременно фазами AP^+ и P^- , а в интервале полей от -511 Oe до -549 (рис. область P^-) они окружены только фазой P^- . Смена окружения является возможной причиной немонотонной полевой зависимости скорости доменной границы AP^- (рисунок).

Работа выполнена при поддержке гранта 3.1992.2017/4.6 в рамках кокурса научных проектов, выполняемых научными коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования.

Литература

1. T. Fache, H.S. Tarazona, J. Liu, G. L'vova, M.J. Applegate, J.C. Rojas-Sanchez, S. Petit-Watelot, C.V. Landauro, J. Quispe-Marcatoma, R. Morgunov, C.H.W. Barnes and S. Mangin // Phys. Rev. B. – 2018. – Т.98. – С. 064410.
2. Р.Б. Моргунов, Г.Л. Лювова // Письма в ЖЭТФ. –2018. –Т.108. –С. 124.
3. P.J. Metaxas, J.P. Jamet, A. Mougin, M. Cormier, J. Ferre, V. Baltz, B. Rodmacq, B. Dieny and R.L. Stamps// PRL. –2007. – Т.99. –С. 217208.

UDC 537.9

FEATURES IN TRANSVERSE ELECTRICAL RESISTIVITY OF MAGNETIC ZnMn₂As₂ SEMICONDUCTOR AT THANSITION INTO SPIN-GLASS-LIKE STATE

O.N.Ivanov¹, V.S. Zakhvalonskii², T.B. Nikulicheva³, M.N. Yaprntsev⁴

¹Dr. phys. and math. sci., prof., ivanov.oleg@bsu.edu.ru

²Dr. phys. and math. sci., prof., zhavlaniskii@bsu.edu.ru

³Cand. phys. and math. sci., nikulicheva@bsu.edu.ru

⁴Cand. phys. and math. sci., yaprntsev@bsu.edu.ru

Belgorod State University

Temperature (T) and magnetic field (B) dependences of the specific electrical resistivity (ρ) of magnetic semiconducting ZnMn₂As₂ single crystal have been studied below freezing temperature $T_f = 32$ K. The $\rho(B)$ dependences recorded below T_f are hysteretic curves of a “butterfly” type. The magnetic hysteresis loops resulting in these dependences were recovered. Both the $\rho(B)$ dependences and the hysteresis loops demonstrate a ferromagnetic-like temperature behaviour.

Keywords: magnetic semiconductors, ZnMn₂As₂, spin-glass-like state, ferromagnetic ordering.

Magnetic semiconductors are materials that exhibit both semiconducting and magnetic response. These materials are promising for various technological applications and interesting from basic condensed matter physics point of view [1]. Magnetic properties of the ZnMn₂As₂ semiconductor are due to presence of magnetic Mn ions in its crystal lattice. Several phase transitions can take place in ZnMn₂As₂ as follows [2]: (i) ferromagnetic (or ferrimagnetic) transition at the Curie temperature $T_C = 310$ K, (ii) antiferromagnetic phase transition at the Neel temperature $T_N = 175$ K, (iii) transition into incommensurate phase at $T_{inc} = 118$ K, (iv) transition into spin-glass-like state occurs at $T_f = 32$ K. The transition into spin-glass-like state is most unusual and interesting to study in detail. The aim of this work is to find and analyze the patterns in the temperature and magnetic field behavior of the specific electrical resistivity of the ZnMn₂As₂ single crystal within temperature range corresponding to forming of the spin-glass-like state.

The modified Bridgeman method was applied to grow the ZnMn₂As₂ single crystal. A Mini Cryogen Free Measurements System (Cryogenic Ltd, UK) was used to measure the temperature and magnetic field dependences of the specific electrical resistivity. ZnMn₂As₂ has disordered layered structure. During the experiments, electrical current was flowed along layers containing magnetic Mn ions, whereas magnetic field applied perpendicularly to these layers.

Drastic $\rho(T)$ growth due to variable-range hopping conductivity of the Mott type was observed just below T_f . Under external magnetic field, ρ found to be remarkably decreasing that is corresponding to negative transverse magnetoresistance. The $\rho(B)$ dependences recorded below T_f are hysteretic curves of a “butterfly” type as is shown in left part of Fig. The magnetic hysteresis loops resulting in these dependences were recovered as is shown in right part of Fig. The $\Phi(\rho, B)$ function, satisfactory to the clear $\rho \sim d\Phi/dB$ condition, was found by a graphical integrating of the hysteretic $\rho(B)$ dependence. This function can be defined as $\Phi(\rho, B) = \int \rho(B) dB$.

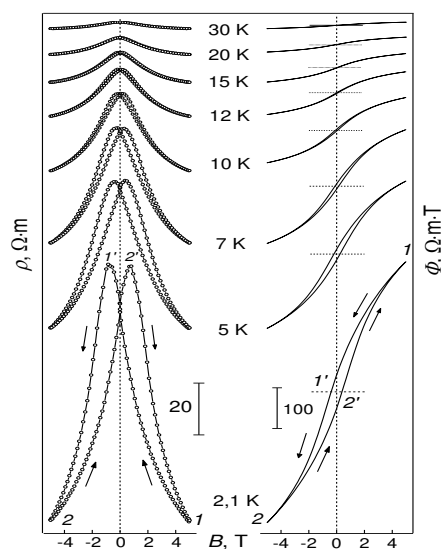


Figure. The ρ vs. B (left) and Φ vs. B (right) dependences taken at various temperatures below T_f

Both the $\rho(B)$ dependences and the hysteresis loops demonstrate a ferromagnetic-like temperature behaviour and, hence, can be originated from a ferromagnetic ordering developing in spin-glass-like state under strong enough magnetic field. So, the properties of both ferromagnet and spin glass are seemed to be at the same time combined in ZnMn_2As_2 below T_f .

References

1. J.A. Gaj and J. Kossut, Introduction to the Physics of Diluted Magnetic Semiconductors, Springer Science & Business Media; 2011.
2. Mirebau I. Chemical and magnetic order in ZnMn_2As_2 as studied by neutron diffraction / I. Mirebau, E. Suard, M. Hennion, M. T. Fernandez-Diaz, A. Daoud-Aladine, and A. Naterpov // JMMM. – 1997. - V.175, 290-298.

УДК 537.62

ДИНАМИЧЕСКИЕ МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА БЫСТРОЗАКАЛЕННЫХ ЛЕНТ $\text{Fe}_{73}\text{Co}_{12}\text{B}_{15}$ и $\text{Fe}_{81,5}\text{B}_{13,5}\text{Si}_3\text{C}_2$

Н.В.Морозова¹, В.И.Кокорин², И.Л. Морозов³, А.А.Гаврилюк⁴

¹К-т физ.-мат. наук, natek@mail.ru

²Аспирант, prohorbook@mail.ru

³К-т физ.-мат. наук, natek@mail.ru

⁴Д-р. физ.-мат. наук, zubr@api.isu.ru

ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет»

В работе представлены зависимости динамических магнитных параметров быстроохлажденных лент состава $\text{Fe}_{73}\text{Co}_{12}\text{B}_{15}$ и $\text{Fe}_{81,5}\text{B}_{13,5}\text{Si}_3\text{C}_2$ от температур и угла предварительной термомагнитной обработки, а также прикладываемых в процессе измерения упругих растягивающих напряжений.

Ключевые слова: быстроохлажденные наноструктурированные ленты, термомагнитная обработка, динамические магнитные параметры.

Быстроохлажденные сплавы на основе Fe и Co являются перспективными наноструктурированными ферромагнитными сплавами с точки зрения изучения взаимосвязи структуры наноструктурированного конденсированного состояния с магнитными характеристиками. Высокомагнотриксционные наноструктурированные сплавы помимо этого являются удобным модельным объектом для установления взаимосвязи процессов изменения доменной структуры магнитомягкого ферромагнетика с его магнитными и магнитоупругими характеристиками.

Для наблюдения изменений динамических магнитных характеристик под воздействием внешних растягивающих напряжений были выбраны две серии аморфных металлических лент составов $Fe_{73}Co_{12}B_{15}$ и $Fe_{81,5}B_{13,5}Si_3C_2$ подвергнутых термомагнитной обработке в широком интервале температур и различной ориентацией оси наведённой анизотропии. Из широкой ленты вдоль оси прокатки вырезались образцы длиной 0,05 м и шириной $(9-10) \cdot 10^{-4}$ м. Толщина лент - $(25-30) \cdot 10^{-6}$ м. Выбор лент связан с их высокими магнитными и магнитоупругими характеристиками (намагниченность $M_S = (1,3 \div 1,8) \cdot 10^6$ А/м, магнитоупругость насыщения $\lambda_S = (20 \div 35) \cdot 10^{-6}$) и высокой чувствительностью характеристик к действию растягивающих напряжений. Перед проведением измерений ленты проходили термомагнитную обработку в вакууме 10^{-3} мм. рт. ст. длительностью 30 минут в температурном интервале $300^0 - 450^0$ С при различной ориентации магнитного поля относительно оси их прокатки. Величина магнитного поля в процессе ТМО составляла $H_{обр} = 40$ кА/м. Варьирование угла приложения магнитного поля в процессе обработки ($90^0, 60^0, 50^0$ С) относительно оси прокатки имело целью наведение одноосной магнитной анизотропии, ориентированной под различными углами к длинной стороне образцов.

В работе представлены зависимости магнитных параметров (остаточной магнитной индукции, коэрцитивной силы) лент $Fe_{73}Co_{12}B_{15}$ и $Fe_{81,5}B_{13,5}Si_3C_2$, обработанных под разными углами к оси полосок от температуры термомагнитной обработки $T_{обр}$ и величины упругих растягивающих напряжений σ .

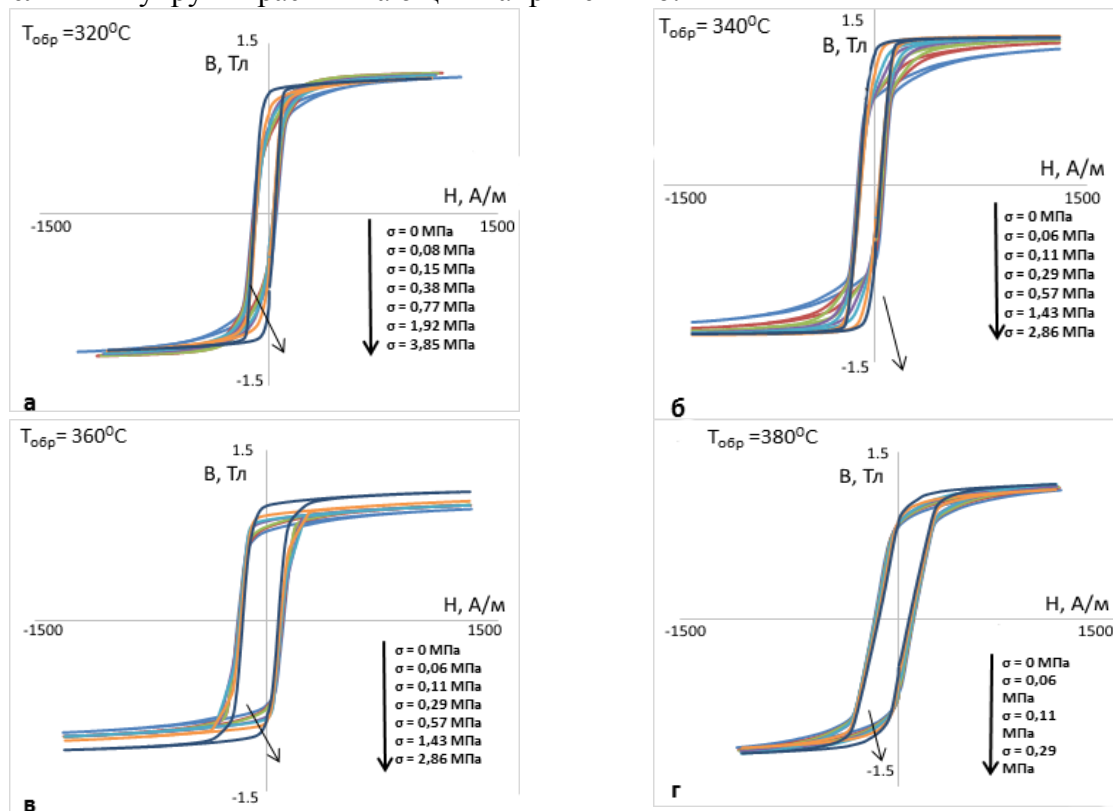


Рисунок. Магнитный гистерезис лент состава $Fe_{73}Co_{12}B_{15}$ от $T_{обр}$ и σ при угле 50^0 между осью прокатки ленты и направлением магнитного поля в ТМО

Наибольшей чувствительностью к действию σ обладают ленты состава $Fe_{73}Co_{12}B_{15}$, прошедшие ТМО при относительно низких температурах ($320^0 - 360^0$ С). При протекании процесса кристаллизации чувствительность исследованных лент к действию растягивающих напряжений уменьшается.

Выраженная одноосная анизотропия наводится в лентах состава $Fe_{81,5}B_{13,5}Si_3C_2$ при ТМО в области $T_{обр} = 430^0$ С. Величина наведённой магнитной анизотропии в лентах состава $Fe_{81,5}B_{13,5}Si_3C_2$ зависит от ориентации магнитного поля, приложенного в процессе обработки. Ориентация оси наведённой анизотропии под углом 60^0 по отношению к оси прокатки ленты

оказывается более предпочтительной, чем ее ориентация под углом 90^0 . Причиной этого может являться эффект анизотропии формы узкой полоски.

Работа выполнена в рамках Госзадания РФ №. 3.1941.2017/ПЧ

УДК 537.9

ТРАНСФОРМАЦИЯ ДОМЕННОЙ СТРУКТУРЫ, СООТВЕТСТВУЮЩАЯ РЕЛАКСАЦИОННЫМ ПРОЦЕССАМ НА ПОВЕРХНОСТИ ФЕРРОМАГНЕТИКА

Е.М. Семенова¹, М.Б. Ляхова², А.Ю. Карпенков³, А.И. Синкевич⁴, Ю.Г. Пастушенков⁵

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, semenova_e_m@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, lahova_m_b@mail.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, karpenkov_alex@mail.ru

⁴Бакалавр, artem.sinkevich2602@gmail.com

⁵Д-р физ.-мат. наук, профессор, yupast@mail.ru

^{1,2,3,4,5}ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

³ФГБОУ ВО «Московский государственный университет» им. М.В. Ломоносова

В данной работе представлены результаты исследования магнитной доменной структуры поверхности моно- и поликристаллических образцов редкоземельных интерметаллидов в условиях механических напряжений. Экспериментально показано, что следствием механических воздействий на поверхность является формирование тонкого напряженного слоя, в котором возникает неравновесное магнитное состояние. В слое формируется собственная доменная структура, которая демонстрирует релаксационное поведение, при котором в отсутствие внешних магнитных полей на поверхности с течением времени формируется равновесная структура замыкающих доменов.

Ключевые слова: доменная структура, ферромагнетик, релаксация.

Доменная структура ферромагнетика является индикатором его магнитного и структурного состояния. В случае магнетиков с магнитокристаллической анизотропией (МКА) типа «ось легкого намагничивания» параметры доменов служат основой для микромагнитного анализа и определения поверхностной плотности энергии доменных границ. В равновесном состоянии на поверхности массивного кристалла перпендикулярной оси легкого намагничивания формируется структура замыкающих доменов, представляющих собой замкнутые области однородной намагниченности, окаймленные волнистыми границами, а на призматической плоскости – полосовые 180-градусные домены [1].

Одним из этапов эксперимента по выявлению доменной структуры является подготовка поверхности, при которой осуществляется шлифовка и полировка с применением абразивных средств. По существу эта процедура является локальным механическим воздействием на поверхность массивного кристалла, вызывающим напряженное состояние тонкого приповерхностного слоя. В этом случае рекомендуется перед проведением эксперимента провести кратковременный отжиг образцов или электрохимическую полировку, для того чтобы восстановить структуру приповерхностного слоя или удалить его. В случае высокоанизотропных одноосных магнетиков подобная процедура, как правило, не требуется, так как замыкающие домены после любого механического воздействия сохраняют равновесную конфигурацию. Исключения составляют материалы, у которых имеются выраженные магнитострикционные свойства и (или) спин-переориентационные фазовые переходы вблизи комнатной температуры.

В данной работе рассматривается поведение доменной структуры, которая формируется на поверхности магнетика после механического воздействия на нее абразивными средствами. В качестве объекта исследования взят высокоанизотропный редкоземельный интерметаллид $DyFe_{11}Ti$ у которого при температуре ~ 275 К наблюдается спин-переориентационный фазовый переход от МКА «ось легкого намагничивания» к

«плоскость осей легкого намагничивания». Соединение характеризуется тетрагональной кристаллической структурой типа ThMn_{12} , высокой намагниченностью и полем анизотропии [2,3].

На рисунке в качестве примера представлено изображение призматической плоскости образца $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$, полученное методом магнитно-силовой микроскопии (МСМ) сразу после механической полировки поверхности (рисунок а) и через 20 часов (рисунок б).

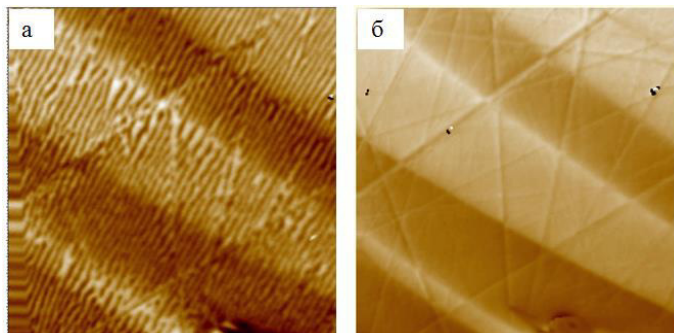


Рисунок. Изображение, полученное методом МСМ на призматической плоскости образца $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$. Размер изображения 100x100 мкм

Видно (рисунок а), что доменная структура, которая формируется на поверхности после механической полировки, ориентирована перпендикулярно основным плоскостным доменам. Процесс релаксации к равновесному состоянию (рисунок б) происходит при комнатной температуре в отсутствие внешних магнитных полей. В работе обсуждаются причины формирования доменной структуры поверхностного слоя и механизмы релаксации.

Работа выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (проект № 18-13-00135).

Литература

1. Hubert A., Schafer R. Magnetic domains: the analysis of magnetic microstructures // Springer-Verlag Berlin Heidelberg. – 1998. – 686 p.
2. Pastushenkov Yu.G. The magnetic domain structure of $\text{DyFe}_{11}\text{Ti}$ single crystals / Yu.G. Pastushenkov., J. Bartolomé, A. Larrea, K.P. Skokov, T.I. Ivanova, L. Lebedeva, A. Grushichev // J. Magn. Magn. Mater. – 2006. – 300. – e514-e517.
3. Guslienko K.Yu. Magnetic anisotropy and spin-reorientation transitions in RFe_{11}Ti (R = Nd, Tb, Dy, Er) rare-earth intermetallics / K.Yu. Guslienko, X.C. Kou, R. Grossinger // J. Magn. Magn. Mater. – 1995. – V.150. – P.383-392.

UDC 538.958

OPTICAL PROPERTIES AND ELECTRONIC STRUCTURE OF TiO_2 NANOSHEETS DOPED WITH 3d ELEMENTS

A.I. Lebedev¹, I.A. Sluchinskaya²

¹Professor, swan@scon155.phys.msu.ru

²Assistant professor, irinasluch@gmail.com

Lomonosov Moscow State University.

TiO_2 nanosheets having a thickness of one monolayer and doped with 3d-elements (Mn, Fe, Co, Ni, Cu) were prepared by chemical methods. Typical lateral dimensions of nanosheets were 0.1–1 μ . The optical studies reveal the fundamental absorption edge as well as specific features of the impurity absorption which were different for different impurities. First-principles calculations were used to calculate the electronic structure, magnetic state, and local environment of 3d impurities in doped nanosheets.

Keywords: titania nanosheets, 3d impurities, optical properties, first-principles calculations.

Bulk titanium dioxide TiO₂ (titania) have attracted considerable attention due to its unique physical and chemical properties, in particular the photocatalytic ones. TiO₂ doped with different impurities is of interest for the hydrogen generation and photocatalytic water purification systems activated by solar radiation. Moreover, Co-doped TiO₂ was the first transparent compound in which the room-temperature ferromagnetism was discovered [1]. Such ferromagnetic materials have many potential applications, for example as spin injectors in spintronic devices.

In recent years, TiO₂ nanosheets which have a thickness of one monolayer (7 Å) became a subject of intensive studies. These nanosheets can be prepared both as colloidal solutions and thin films. When doped with various 3*d* elements, they exhibit interesting magnetic and photocatalytic properties. For example, TiO₂ nanosheets doped with Co and Fe are ferromagnets at room temperature [2] and exhibit giant magneto-optical response [3,4]. The physical nature of these phenomena is not clear. These materials may be of interest to spintronics, since insulating ferromagnetic oxides are very rare materials. The photocatalytic properties of doped TiO₂ nanosheets are of interest, too [5].

The purpose of this work was to study the optical properties of TiO₂ nanosheets doped with 3*d* elements, to determine the electronic structure, magnetic state of impurity centers formed by these impurities, and to establish the relationship between the structure of these centers and their properties.

Titania nanosheets were prepared by delamination of proton-substituted K_{0.8}(Ti_{2-x}M_x)O_{4+δ} compound with the layered lepidocrocite structure in a tetrabutylammonium hydroxide solution. The concentration of dopants (*M* = Mn, Fe, Co, Ni, and Cu) was 20%.

The obtained samples were colorless or slightly colored colloidal solutions. The lateral dimensions of the nanosheets were from 0.1 to several microns as determined by scanning electron microscopy.

The optical absorption studies of colloidal solutions of doped nanosheets revealed a fundamental absorption edge at 273–280 nm, whose position weakly depended on the type of the dopant. A strong shift of the absorption edge with respect to bulk TiO₂ is due to the quantum size effect. In samples doped with Mn, Fe, and Co, the tails in the absorption spectra extended to the visible region and determined the color of colloidal solutions. The tails were individual for each impurity and in some case could be resolved into a sum of broad bands. For Ni and Cu impurities, the absorption tails were much weaker.

The electronic, magnetic, and local structures of TiO₂ nanosheets doped with V, Cr, Mn, Fe, Co, and Ni impurities were calculated from first principles using the ABINIT program in the LDA + *U* approximation using PAW pseudopotentials. In the calculations it was assumed that all impurities are in the charge state of 4+. The magnetic moments of the impurities were found to be *S* = 1/2 for V, 1 for Cr, 3/2 for Mn, 1 for Fe, 1/2 for Co, and 0 for Ni. For Co and Cu impurities, the complexes with the oxygen vacancy were also studied. For the Co impurity, the energy of the complexes containing the impurity and an oxygen vacancy at several sites was additionally calculated. The structure with a vacancy located on the surface of the nanosheet had the lowest energy.

The calculations of the electronic structure of doped TiO₂ nanosheets predicted the appearance of deep levels in the forbidden gap, which can be responsible for the observed optical properties of the nanosheets.

This work was supported by the RFBR grant No. 17-02-01068.

References

1. Matsumoto Y. Room-temperature ferromagnetism in transparent transition metal-doped titanium dioxide / Matsumoto Y., Murakami M., Shono T., Hasegawa T., Fukumura T., Kawasaki M., Ahmet P., Chikyow T., Koshihara S-Y., Koinuma H. // Science – 2001. – V. 291. – P. 854–856.
2. Osada M. Two-dimensional dielectric nanosheets: novel nanoelectronics from nanocrystal building blocks / M. Osada, T. Sasaki. // Adv. Mater. – 2012. – V. 24. – P. 210–228.

3. Osada M. Ferromagnetism in two-dimensional $Ti_{0.8}Co_{0.2}O_2$ nanosheets / Osada M., Ebina Y., Fukuda K., Ono K., Takada K., Yamaura K., Takayama-Muromachi E., Sasaki T. // *Phys. Rev. B* – 2006. – V.73. – P. 153301-1–153301-4.

4. Osada M. Gigantic magneto-optical effects induced by (Fe/Co)-cosubstitution in titania nanosheets / Osada M., Itose M., Ebina Y., Ono K., Ueda S., Kobayashi K., Sasaki T. // *Appl. Phys. Lett.* – 2008. – V. 92. – P. 253110-1–253110-3.

5. Wang S.L. Fabrication and properties of a free-standing two-dimensional titania / Wang S.L., Luo X., Zhou X., Zhu Y., Chi X., Chen W., Wu K., Liu Z., Quek S.Y., Xu G.Q. // *J. Am. Chem. Soc.* – 2017. – V.139. – P. 15414–15419.

UDC 620.182

EFFECT OF THERMOMECHANICAL TREATMENT ON MICROSTRUCTURAL AND MAGNETOSTRICTION PROPERTIES OF TERNARY Fe-Ga-NbC ALLOY

Yavar Mansouri¹, V.V. Palacheva², A. Koshmin³, I.S. Golovin⁴

¹PhD Student, m1809315@edu.misis.ru

²PhD student, lera.palacheva@mail.ru

³PhD Student, koshmin.an@misis.ru

⁴Professor, i.golovin@misis.ru

National University of Science and Technology “NUST MISIS”

The effect of thermomechanical process (rolling and heat treatment) on the microstructural and magnetostriction properties of ternary Fe-Ga-NbC alloy was investigated. As comparison with as cast sample, a decrease in magnetostriction strain in rolled samples and then an increase in magnetostriction of heat treated samples was observed. The tendency to formation of Goss texture due to heat treatment is proved.

Keywords: hot-rolled, complex-rolled, annealing, Goss texture, magnetostriction.

Ferromagnetic Fe-Ga (named as Galfenol) exhibit large magnetostriction at low magnetic fields which can be used in acoustic sensors, transducers, generators, linear motors, actuators, damping devices, torque sensors, positioning devices, speakers, microphones and etc. [1, 2]. Due to the anisotropy of magnetostrictive performance of Fe–Ga alloy, the η -fiber texture with $\langle 001 \rangle$ grain orientation parallel to the rolling direction (RD) is desired in the sheets, such as Goss texture $\{110\}\langle 001 \rangle$ and cubic texture $\{100\}\langle 001 \rangle$ [3]. It is why that texture of rolled Galfenol sheet should be align with the magnetic easy axes, $\langle 100 \rangle$ directions. Therefore, the development of strong $\langle 100 \rangle \parallel$ RD (RD is rolling direction, ND is normal direction to the sheet surface and TD is transverse direction) texture in the rolled sheets is critical in order to achieve maximum performance [4]. In addition to this, the dispersion of NbC particles resulted in promotion of the abnormal grain growth (AGG) of $\{011\}$ grains in a process that is similar to the inhibition of normal grain growth (NGG) in Fe–Si electrical steel which occurs due to precipitation of second-phase particles such as AlN and MnS [5, 6].

Two thermomechanical process were employed to shape an as-cast ingot of a ternary $(Fe_{83.4}Ga_{16.6})_{0.99}(NbC)_{0.01}$ alloy: (i) hot rolling at 900°C from 3.00 mm to 0.50 mm and (ii) complex rolling including rolling at 700°C from 3.00 mm to 0.85 mm, 400°C from 0.85 to 0.84 mm and an intermediate heat treatment at 450°C for 30 minutes and finally cold rolling from 0.54 mm to 0.5 mm. The recrystallization process for the complex rolled sample starts at about 500°C and it is completed at 600°C. The DSC results revealed that the Curie temperature of alloys is around 714°C. In order to measure the magnetostriction strain, a new set-up was designed and tests were carried out with sticking sensors on the samples. The parallel ($\lambda \parallel$) magnetostriction for as-cast, rolled and heat treated samples were measured. The magnetostriction results show 42 ppm, 27 ppm, 24 ppm, 59 ppm and 62 ppm for as cast, hot rolled, complex rolled, heat treated after hot rolling and heat treated after complex rolling, respectively. It is shown that the magnetostriction strain firstly drops after rolling, because of internal stresses which led to pinning of domain walls. Then the heat treatment after rolling leads

to stress relaxation in the rolled samples, Goss and cubic texture formation and caused the domain walls move more easily. Also heat treatment led to formation of {011} and {001} grains. The EBSD and IPF figures proved the formation of the Goss {110}<100> and cubic {001}<100> texture after the final heat treatment leading to an increase in magnetostriction strain of the samples. Two theories of grain growth phenomena (Coincident Site Lattice (CSL) and High Energy Grain Boundary (HEGB)) explain the formation process of the Goss and cubic textures.

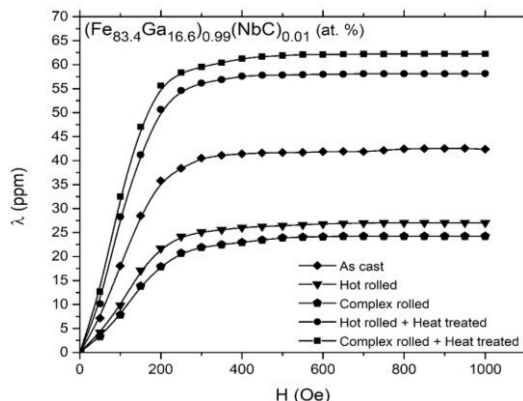


Figure. Effect of thermomechanical process on magnetostriction of $(\text{Fe}_{83.4}\text{Ga}_{16.6})_{0.99}(\text{NbC})_{0.01}$ alloy

References

1. E. Du Trémolet de Lacheisserie, Magnetostriction: theory and applications of magnetoelasticity: CRC press, 1993.
2. K. B. Hathaway and A. E. Clark, "Magnetostrictive materials," MRS Bulletin, vol. 18, pp. 34-41, 1993.
3. C. Yuan, J. Li, X. Bao, and X. Gao, "Influence of annealing process on texture evolution and magnetostriction in rolled Fe–Ga based alloys," Journal of Magnetism and Magnetic Materials, vol. 362, pp. 154-158, 2014.
4. J. Li, X. Gao, J. Zhu, X. Bao, T. Xia, and M. Zhang, "Ductility, texture and large magnetostriction of Fe–Ga-based sheets," Scripta Materialia, vol. 63, pp. 246-249, 2010.
5. S.-M. Na, J.-H. Yoo, and A. B. Flatau, "Abnormal (110) grain growth and magnetostriction in recrystallized Galfenol with dispersed niobium carbide," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 45, pp. 4132-4135, 2009.
6. A. Sakakura, "Effects of AlN on the Primary Recrystallization Textures in Cold-Rolled-(110)[001]-Oriented Single Crystals of 3% Silicon Iron," journal of Applied Physics, vol. 40, pp. 1534-1538, 1969.

УДК 537.632/.636

МАГНИТНАЯ РЕЛАКСАЦИЯ В КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНКАХ: МЕТАЛЛ – ДИЭЛЕКТРИК/УГЛЕРОД

Л.Н. Котов¹, М.П. Ласёк², В.К. Турков³, Д.М. Холопов⁴, V.S. Vlasov⁵,
Ю.Е. Калинин⁶, А.В. Ситников⁷

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, kotovln@mail.ru

²Ст. препод., mplasek@yandex.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, turkov_1956@mail.ru

⁴Канд. физ.-мат. наук, доцент, vlasovv78@mail.ru

⁵Студент, holopov.kot@yandex.ru

ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина»

⁶Д-р физ.-мат. наук, профессор, kalinin48@mail.ru

⁷Д-р физ.-мат. наук, профессор, sitnikov04@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе приведены результаты исследований структурных, магнитных резонансных и

релаксационных свойств композитных пленок: металл-диэлектрик составов $\{(Co_{0.5}Fe_{0.5})_x+(SiO_2)_{(1-x)/3}\}$ и металл-углерод составов $\{(Co_{0.4}Fe_{0.4}V_{0.2})_x+(C_2)_{(1-x)/2}\}$. Показано влияние структурной релаксации, концентраций магнитной металлической, диэлектрической, углеродной фаз композитных пленок на частоту магнитной релаксации и на характеристики ферромагнитного резонанса (ФМР).

Ключевые слова: магнитная релаксация, ФМР, композитные пленки, металл-диэлектрик / углерод, структура.

Работа посвящена исследованию структурных и магнитных релаксационных свойств композитных пленок: металл-диэлектрик составов $\{(Co_{0.5}Fe_{0.5})_x+(SiO_2)_{(1-x)/3}\}$, $0.42 < x < 0.87$ и металл-углерод составов $\{(Co_{0.4}Fe_{0.4}V_{0.2})_x+(C_2)_{(1-x)/2}\}$, $0.4 < x < 0.8$. Напыление плёнок осуществлялось методом ионной бомбардировки мишеней металлических сплавов, диэлектрика и углерода на стеклянные подложки [1]. Толщины композитных плёнок составляли: металл-диэлектрик - $0.22 \div 0.45$ мкм и металл-углерод - $0.1 \div 0.2$ мкм. Рельеф, фазовый контраст и магнитные поля на поверхности композитных плёнок определялись атомно-силовым микроскопом (АСМ) ARIS-3500 с использованием кантилевера ND-MDT. Магнитная структура пленок исследовалась с использованием кантилевера с магнитным зондом CoCr. Характеристики (полуширина линии и резонансные поля) ферромагнитного резонанса (ФМР) пленок определялись с помощью ЭПР радиоспектрометра РЭ 1306 на частоте поля 9.36 ГГц. Частоты магнитной релаксации находились из значений ширины линии ФМР $\Delta H: f_r = 1/\tau_r = \gamma' \cdot \Delta H$, где τ_r – время релаксации колебаний вектора намагниченности, $\gamma' = 2.8$ МГц/Э – гиромагнитное отношение для спина электрона [2]. На рис. 1 приведены зависимости частоты магнитной релаксации от концентрации металлической фазы композитных пленок: металл-диэлектрик (кривая 1), металл-углерод (2, 3). Как видно из рис. 1, для пленок с углеродом существует две моды (кривые 2, 3), которые характеризуются различными значениями резонансных и релаксационных частот. Это свидетельствует о том, что в пленках с углеродом существует, по крайней мере, два различных химических соединения в металлической фазе: $FeCoC$ и $CoFe$. Для металл-углеродных пленок с большими x частоты магнитной релаксации в 8-10 меньше, чем для металл-диэлектрических пленок.

Это свидетельствует о том, что углерод объединяет между собой металлические магнитные частицы и области таким образом, что в соседних частицах разница в собственных частотах магнитных колебаний уменьшается, и вектора намагниченности в соседних частицах начинают колебаться в фазе более длительное время. Начальное увеличение частоты релаксации от x связано с увеличением разброса размеров магнитных частиц с ростом x , приводящее к наличию роста разброса размагничивающих полей магнитных частиц (кривые 1, 2).

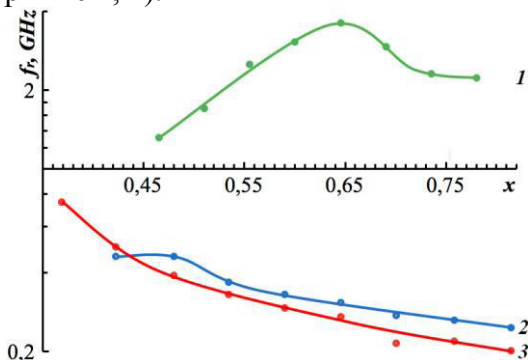


Рисунок. Зависимости частоты магнитной релаксации f_r от концентрации x композиционных металл-диэлектрических (1) и металл-углеродных (2, 3) композитных пленок

Максимумы на зависимостях $f_r(x)$ – это области концентраций x , для которых характерно слияние металлических частиц или процесс перколяции. При этих процессах начинают возникать большие по размерам магнитные металлические области, для ко-

торых характерно когерентное колебание вектора намагниченности. Для областей металл-углеродных пленок, дающих вклад во вторую магнитную моду колебаний, описываемых кривой 3, этот процесс при исследованных x не наблюдается. При увеличении концентрации x косвенная обменная связь возрастает для соседних магнитных областей составов (FeC+Co), дающих вклад во вторую моду. Вторая мода ФМР характеризуется меньшими $f_r(x)$ по сравнению с первой модой, обусловленной магнитными колебаниями в областях состава CoFe.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: № 17-02-01138а, №17-57-150001и).

Литература

1. Калинин, Ю.Е. Гранулированные наноконкомпозиты металл-диэлектрик с аморфной структурой / Ю.Е. Калинин, А.Т. Пономаренко, А.В. Ситников // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 5. С. 14–20.

2. Голдин, Б.А., Спин-фононные взаимодействия в кристаллах (ферритах) / Б.А. Голдин, Л.Н. Котов, Л.К. Зарембо, С.Н. Карпачев. Ленинград: Наука. -1991. 150 с.

3. Kotov, L.N. Magnetic and relaxation properties of thin composite films (Co₄₅Fe₄₅Zr₁₀)_x(Al₂O₃)_{1-x} / L.N. Kotov, V.K. Turkov, V.S. Vlasov, Yu.E. Kalinin, A.V. Sitnikov, F.F. Asadullin // JMMM. 2007. -V. 316. - №2. P. e20-e22.

UDC 538.9

ELECTRICAL AND MAGNETORESISTANCE PROPERTIES OF MULTILAYER FILMS BASED COMPOSITE-SEMICONDUCTOR

O.V. Zhilova¹, A.V. Sitnikov², I.V. Babkina³, S.Yu. Pankov⁴, A.P. Antsev⁵

¹Cand. Phys.-Mat. of sciences, junior researcher, zhilova105@mail.ru

²Dr. Phys.-Mat. sciences, professor, sitnikov04@mail.ru

³Cand. Phys.-Mat. of sciences, docent, ivbabkina@mail.ru

⁴Ingeneer researcher, srgpank@mail.ru

⁵Student, takker358@gmail.com

Voronezh state technical university

Thin films based on a composite with interlayers of indium oxide In₂O₃/(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆ were studied. Such a system was obtained by ion beam spraying. X-ray analysis showed that the films have a multilayer structure. The introduction of In₂O₃ interlayers into the (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆ nanocomposite leads to a decrease in the resistivity. All the samples studied have magnetoresistance both at 77 K and at room temperature, which is typical for ferromagnetic metal-dielectric nanocomposites.

Keywords: multilayered structures, indium oxide, electrical resistivity, magnetoresistance.

Nanogranular composites are widely studied both from a fundamental point of view and from the point of view of practical applications. Such nanocomposites consist of ferromagnetic nanoparticles embedded in semiconductor or dielectric matrix.

The magnetic and physicochemical properties of these nanocomposites strongly depend on the preparation method, particle size, concentration, and chemical bond between the nanoparticles and the matrix. There are significant limitations in the composition of the heterogeneous system, which through self-organization forms a nanocomposite structure. In addition, from the point of view of practical application of thin-film nanocomposites, it is advisable to make multilayer nanogranular structures. Therefore, in this work, the effect of the In₂O₃ wide-gap oxide semiconductor layer embedded in the composite matrix (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆ on the structure, electrical and magnetoresistance properties of the nanocomposite was studied.

Experimental samples of the system [In₂O₃/(Co₄₀Fe₄₀B₂₀)₃₄(SiO₂)₆₆]₉₂ were obtained by the method of ion beam sputtering.

The resulting multilayer system had 92 bilayers. Sample thicknesses (h) were measured using an MII-4 interferometer, and were in the range of 0.20 - 0.60 μm . The bilayer thickness (h_1+h_2) changed from 1.6 to 6.3 nm.

The diffractograms of the $I(2\theta)$ thin-film system of different thicknesses have the appearance of a wide halo.

The reason for such a dependence of $I(2\theta)$ is the summation of diffractions from three different amorphous phases (metallic granules $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$, $\alpha\text{-SiO}_2$ и $\alpha\text{-In}_2\text{O}_3$).

Small angle X-ray diffraction confirmed the presence of a multilayer structure.

A comparative analysis of the dependences of the resistivity on the thickness ($\rho(h)$) of the In_2O_3 , $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ and $[\text{In}_2\text{O}_3/(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}]_{92}$ films showed that, with a decrease in the film thickness, the electrical resistivity of the multilayer structure increases and tends to ρ of the bulk composite, and with increasing thickness, $\rho(h)$ decreases, but does not reach the specific electrical resistance of the In_2O_3 film. The increase in ρ can be explained by the small effective thickness of the semiconductor layer of $\sim 0.4 - 0.5$ nm, which is not enough to create a continuous conducting medium. Therefore, the main electrical transfer is carried out in the composite. When the thickness of the semiconductor layer becomes sufficient for the formation of a conducting medium, a significant difference with ρ of the In_2O_3 film is associated with the amorphous structure of the phases under consideration relative to the crystalline structure of the indium oxide film. Thus, it was found that the thickness of the In_2O_3 semiconductor layer affects the value of the electrical resistivity.

The figure shows the dependences of the magnetoresistance of the investigated thin films (MR).

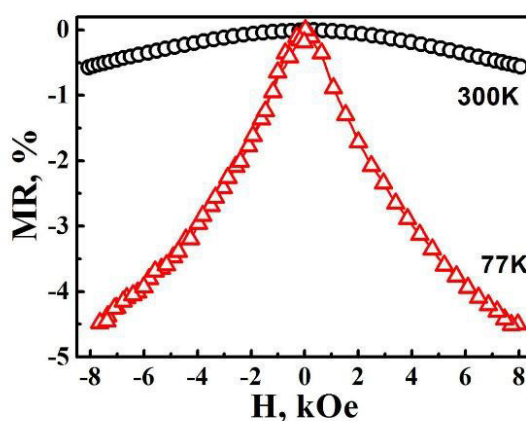


Figure. The magnetic field dependencies of magnetoresistivity for thin films ($h_{\text{bl}} = 5.52$ nm; $h_{\text{In}_2\text{O}_3} = 1.44$ nm)

A negative MR means that the resistivity decreases with increasing magnetic field strength. Lowering the temperature from 300 to 77 K leads to an increase in the maximum value of the magnetoresistance obtained at 8 kOe. Such field dependences of the magnetoresistance for thin films are characteristic of ferromagnetic metal-insulator systems. The introduction of In_2O_3 semiconductor interlayers and their subsequent increase decreases the magnetoresistance for thin films. This may be due to an increase in the distance between the $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20}$ ferromagnetic metal granules in adjacent layers of the $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ composite.

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as the project part of the state task (No 3.1867.2017/4.6).

V. РЕЛАКСАЦИЯ В НАНОСИСТЕМАХ

УДК 519.6

РЕЛАКСАЦИЯ МУЛЬТИСЛОЙНОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА И КОМПОНОВКА ЕГО СТРУКТУРЫ

М.Н. Аралов¹, В.Ф. Барабанов², С.Л. Подвальный³, С.Л. Кенин⁴

¹Канд. техн. наук, aralow@mail.ru

²Д-р техн. наук, профессор, bvf@list.ru

³Д-р техн. наук, профессор, spodvalny@yandex.ru

⁴Канд. техн. наук, sergey.kenin@atos.net

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В данной работе представлен комплексный подход к решению задачи оптимизации структуры мультислойного объекта, направленной на улучшение его тепловых характеристик. Рассмотрены вопросы математического моделирования температурного распределения мультислойных объектов, выявления и устранения рисков критического перегрева.

Ключевые слова: мультислойные объекты, карта теплового распределения, генетический алгоритм.

С развитием нанотехнологий становятся наиболее актуальными вопросы релаксации твердых мультислойных объектов. К таким объектам относятся новейшие трехмерно интегрированные СБИС (3D-IC), крайне чувствительные к температурным режимам [1,2]. На процесс установления термодинамического равновесия (релаксации) таких объектов влияют множество факторов, в т.ч. взаимное расположение составных элементов и слоев [3]. Это требует оптимизации структуры многослойного объекта, с учетом термодинамики. Степень интеграции наноуровня предполагает большое количество разнородных элементов, что усложняет как расчет термодинамических параметров, так и задачу оптимизации размещения [4].

Для построения карт распределения температуры и вычисления тепловых параметров мультислойного объекта, было адаптировано уравнение Фурье-Кирхгофа и предложено его решение методом конечных разностей (МКР) с комбинированием явной и неявной расчетных схем. Для соблюдения устойчивости при использовании явной схемы предложен алгоритм адаптивного перерасчета временного шага. Предлагается мониторинг соответствия критерию устойчивости в процессе расчета, и устранение возможных причин неустойчивости.

Представлен алгоритм выбора методов моделирования, учитывающий особенности и динамику развития релаксационного процесса мультислойного объекта. Применение данного алгоритма позволило снизить требования к вычислительной мощности системы без значительного ухудшения точности расчетов. Эксперименты показали сокращение времени моделирования на 10-15% при потере точности порядка 1.5%.

Описан алгоритм оптимизации размещения составных частей мультислойного объекта, направленный на снижение рисков возникновения локального перегрева или переохлаждения. Данный алгоритм является адаптированным и модифицированным генетическим алгоритмом оптимизации размещения. Приведен пример успешного размещения функциональных единиц СБИС на пространстве кристалла [5].

Литература

1. Барабанов, В. Ф. Математические методы моделирования тепловых полей в трехмерной сборке интегральных схем / В.Ф. Барабанов, М.Н. Аралов, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета .- 2013.- 9. №.6.3. – С.55-57.

2. Методы и алгоритмы моделирования тепловых полей в трехмерной сборке интегральных схем / В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный, А.В. Ачкасов, М.Н. Аралов// Радиотехника. 2014. - №6. – С.82-87.

3. Аралов, М. Н. Визуализация тепловых полей с использованием библиотек OpenGL и TaoFramework / М.Н. Аралов, А.В. Барабанов, Н.И. Гребенникова // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2015.- 11. №.1. – С.39-41.

4. Программная реализация многовариантного математического моделирования тепловых полей / М.Н. Аралов, А.В. Ачкасов, В.Ф. Барабанов, С.Л. Подвальный // Вестник Воронежского государственного технического университета.- 2015.- 11. №.1. – С. 32-34.

5. Аралов, М. Н. Математические и программные средства моделирования теплового поля твердого тела слоистой структуры / М.Н. Аралов, В.Ф. Барабанов // Системы управления и информационные технологии. – 2015. - №2(60).–С. 4-8.

УДК 539.269

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА СТАБИЛЬНОСТЬ НАНОРАЗМЕРНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР КОМПОЗИТ - ПОЛУПРОВОДНИК

И.В.Бабкина¹, М.А. Каширин², А.В. Ситников³, М.Н. Волочаев⁴, М.В. Чехонадских⁵

¹Кандт физ.-мат. наук, доцент, ivbabkina@mail.ru

²М.н.с., mnitro@yandex.ru

³Д-р физ.-мат. наук, профессор, sitnikov04@mail.ru

⁴Кандт физ.-мат. наук, volochaev91@mail.ru

⁵Бакалавр, mv.cheh1997@mail.ru

^{1,2,3,5}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

⁴ Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

В представленной работе изучена многослойная гетерогенная система, состоящая из 85 чередующихся слоев композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ и оксидов ZnO и In_2O_3 , полученная методом ионно-лучевого распыления. Структура образцов исследована методом рентгеновской дифракции в исходном состоянии и после термической обработки. Образцы являются стабильными вплоть до 500 °С. В процессе отжига образуются следующие фазы: Zn_2SiO_4 , InVO_3 , CoFe и In_2O_3 .

Ключевые слова: многослойные системы, рентгеновская дифракция, аморфная структура, термическая обработка.

Широкозонные оксидные полупроводники являются основными функциональными материалами, используемыми в прозрачной электронике. Поэтому изучение возможных твердотельных реакций, протекающих между полупроводниковыми, диэлектрическими и металлическими фазами при создании электронных приборов является актуальной задачей. В этом случае уникальным модельным материалом может выступать многослойная пленка с нанометровыми толщинами слоев, где возможно выявление образования различных соединений при взаимодействии различных фаз и их взаимное влияние.

Образцы для исследований были получены методом ионно-лучевого распыления трех мишеней на вращающуюся кремниевую подложку с изменением общей толщины пленки в процессе одного напыления. Толщины пленок измерялись при помощи оптического интерферометра МИИ-4. Для дальнейших исследований были выбраны пленки толщиной 307 нм; 385 нм; 434 нм; 517 нм и 428 нм. Наличие многослойной структуры пленок подтверждалось экспериментами по малоугловой рентгеновской дифракции в интервале брэгговских углов $2\Theta=1-10^\circ$ и исследованием поперечного сечения многослойной структуры методом просвечивающей электронной микроскопии. Сопоставление значений толщин периода многослойной структуры рассчитанных разными способами хорошо согласуется между собой и находится в диапазоне от 3,6 до 6 нм.

В исходном состоянии все образцы $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{ZnO}/\text{In}_2\text{O}_3]_{85}$ имеют аморфную структуру. В то время, как изученные ранее однослойные пленки оксидов ZnO и In_2O_3 являлись кристаллическими, а пленки композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ – аморфными. Рентгеноструктурный анализ двухслойных структур $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{ZnO}]_{112}$ и $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{In}_2\text{O}_3]_{92}$ также не выявил пиков

на дифрактограммах в исходном состоянии. Таким образом, введение в многослойную структуру композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}$ способствует нарушению кристалличности полупроводниковых прослоек.

Также для пленок многослойной структуры $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{ZnO}/\text{In}_2\text{O}_3]_{85}$ была выполнена термическая обработка в интервале температур 250-645 °С с шагом в 50 °С и выдержкой в течение 30 минут. После каждого отжига образец исследовали на дифрактометре, результаты измерений приведены на рисунке.

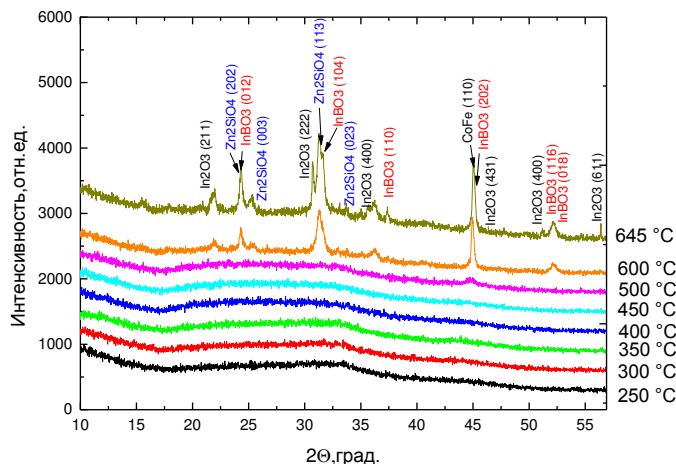


Рисунок. Дифрактограммы пленок $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{34}(\text{SiO}_2)_{66}/\text{ZnO}/\text{In}_2\text{O}_3]_{85}$ толщиной 427,6 нм после термообработки в интервале температур 250 – 645 °С

Все образцы сохраняли рентгеноаморфную структуру вплоть до 500 °С. Идентификация дифрактограмм выявила наличие следующих фаз: Zn_2SiO_4 , InBO_3 , CoFe и In_2O_3 , которые начали проявляться практически одновременно при 600 °С. Вероятно, рост кристаллитов, находящихся в ограниченной вертикальной геометрии, значительно затруднен.

Сравнивая процессы кристаллизации двухслойных и трехслойных структур, можно видеть, что в последних отсутствуют простые оксидные соединения ZnO и Fe_3O_4 , за исключением оксида индия In_2O_3 .

Для выявления стабильности слоистой структуры после каждого отжига была проведена малоугольная рентгеновская дифракция. Выше 500 °С началось резкое размытие границ, нарушение периодичности, а выше 600 °С происходило разрушение слоистой структуры.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки в рамках проектной части государственного задания (№3.1867.2017/4.6).

УДК 537.9

ТОНКИЕ НАНОГРАНУЛИРОВАННЫЕ МАГНИТНЫЕ ПЛЁНКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДНЫХ И НИТРИДНЫХ МАТРИЦ, ПОЛУЧЕННЫЕ МЕТОДОМ ПЛАНАРНОЙ МЕТАЛЛОТЕРМИИ

М.Н. Волочаев¹, В.Г. Мягков², В.С. Жигалов³, Л.Е. Быкова⁴

¹ Канд. физ.-мат. наук, volochaev@iph.krasn.ru

² Д-р физ.-мат. наук, miagkov@iph.krasn.ru

³ Д-р физ.-мат. наук, zhigalov@iph.krasn.ru

⁴ Канд. физ.-мат. наук, lebyk@iph.krasn.ru

Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск

Представлены обобщающие результаты исследований структуры и физических характеристик наногранулированных тонких пленок, содержащие наночастицы ферромагнитного металла (Fe, Co) в оксидной (In_2O_3 , ZnO , ZrO_2 , Al_2O_3 , TiO_2) матрице,

полученным методом планарной металлотермии. Также впервые показана возможность применения данного метода для получения наногранулированных магнитных пленок на основе нитридных матриц.

Ключевые слова: наногранулированные магнитные пленки, металлотермические реакции, планарная металлотермия.

Наногранулированные тонкопленочные материалы, содержащие наночастицы ферромагнетика (Fe, Co, Ni), встроенные в полупроводниковые (In_2O_3 , TiO_2 , ZnO , SnO_2) или диэлектрические (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , ZrO_2) матрицы, широко исследуются, благодаря уникальному сочетанию физических свойств, обусловленных их структурными особенностями. Магнитные и физико-химические свойства таких материалов сильно зависят от способа получения, размера частиц, концентрации и химической связи между наночастицами и матрицей и пр. [1]. Для изготовления таких тонкопленочных материалов успешно применяются как химические (золь-гель метод, микроэмульсионный метод, электрохимическое осаждение) так и физические методы изготовления (магнетронное сораспыление, импульсное лазерное осаждение, ионная имплантация и т. д.). Тем не менее поиск новых методов изготовления тонкопленочных нанокompозитных материалов также является весьма актуальной задачей.

В данной работе представлены обобщающие результаты исследований структуры и физических характеристик наногранулированных тонких пленок, полученных методом планарной металлотермией, содержащих наногранулы ферромагнитного металла (Fe, Co), распределенные в оксидной (In_2O_3 , ZnO , ZrO_2 , Al_2O_3) матрице [1, 2]. Данный способ получения наногранулированных тонкопленочных материалов основан на проведении металлотермических реакций между нанослоями оксида ферромагнитного металла (Fe_2O_3 , Co_3O_4) и металла-восстановителя (In, Zn, Zr, Al) посредством вакуумного отжига слоистых тонкопленочных реагентов. Тонкопленочные реагенты Fe_2O_3 и Co_3O_4 были получены методом реактивного магнетронного распыления мишени Fe, либо Co в атмосфере $\text{Ar} + \text{O}_2$, слои металла-восстановителя получены магнетронным распылением в атмосфере чистого аргона. Такой способ позволяет изготавливать многослойные тонкопленочные прекурсоры. После напыления прекурсоры подвергали вакуумного отжига с *in situ* измерением электросопротивления, резкое изменение которого указывало на инициирование металлотермической реакции в пленке, при которой происходило восстановление Fe (Co) из их оксидов. На восстановление металла указывало также появление намагниченности в пленках, после вакуумного отжига выше температуры инициирования. При это измерения $R(T)$ и $M(T_{\text{отж}})$ находятся в тесной корреляции.

Методы электронной микроскопии и рентгеновской дифракции показали, что реакции проходят в два этапа, с образованием низшего оксида, как промежуточного продукта реакции, а конечный продукт реакции представляет собой тонкую пленку, состоящую из наногранул ферромагнитного металла, равномерно распределенных в оксидной матрице [1, 2].

По сравнению с другими методами получения нанокompозитных пленок аналогичных составов, пленки, изготовленные методом планарной металлотермии, обладают высокой временной, термической и химической стабильностью (поскольку реакция восстановления необратима), а также отсутствием агломерации и спекания наночастиц, поскольку частицы прочно связаны с оксидной матрицей. Немаловажным преимуществом представленного метода является возможность изготавливать пленки с заданным размером наногранул, который примерно равен толщине исходного слоя оксида ферромагнитного металла.

Однако металлотермические реакции могут протекать не только между оксидом и металлом. В качестве прекурсоров могут выступать и другие соединения металлов: нитриды, фториды, фосфиды. А методы реактивного магнетронного распыления в свою очередь позволяют получать такие прекурсоры. Поэтому в данном сообщении впервые показана возможность применения данного метода для получения наногранулирован-

ных магнитных пленок на основе нитридных матриц. Были изготовлены многослойные прекурсоры FeN/Ti, которые были подвергнуты вакуумному отжигу для формирования наногранулированных Fe-TiN тонких пленок, обладающих металлическим характером проводимости и магнитными свойствами, характерными для гранулированных магнитных сред.

Работа выполнена при поддержке совета по грантам Президента Российской Федерации (СП-1262.2019.1).

Литература

1. Волочаев, М.Н. Особенности структуры, магнитных и электрических свойств тонких наногранулированных пленок Co-ZrO₂ и Co-Al₂O₃, полученных методом планарной металлотермии: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.04.07; [Место защиты: Красноярск. «Институт физики им. Л.В. Киренского ФИЦ КНЦ СО РАН»] – Красноярск, 2018. – 22 с.

2. Волочаев, М.Н. Структурные и магнитные характеристики однослойных и многослойных наногранулированных пленок Co-Al₂O₃, полученных методом твердофазного синтеза / М.Н. Волочаев, С.В. Комогорцев, В.Г. Мягков, и др. // Физика твердого тела – 2018 – том 60 – вып. 7 – С. 1409-1415.

УДК: 537.9

НЕСОБСТВЕННЫЕ ПЬЕЗОРЕЗИСТИВНЫЕ И МАГНИТОРЕЗИСТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ В ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃

Ю.В. Кабиров¹, Е.Н. Сидоренко², Н.В. Пруцакова³, Е.В. Чебанова⁴
А.С. Богатин⁵, М.В. Белокобыльский⁶

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, salv62@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, si-do-re@mail.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, shpilevay@mail.ru

⁴Канд. физ.-мат. наук, доцент, starphish@mail.ru

⁵Д-р физ.-мат. наук, профессор, asbbogatin13@mail.ru

⁶Аспирант, marks007@mail.ru

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

ФБГОУ ВО «Донской государственный технический университет»

В нашей работе с целью создания материалов, обладающих несобственной пьезорезистивностью и магниторезистивностью одновременно, синтезированы полимерные композиты на основе манганита La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ (LSMO) и полиэтилена низкой плотности (LDPE) состава (100-х)LSMO/(хLDPE) при х = 7, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 22 массовых процентов. Образцы с концентрацией х = 15 % проявляют несобственную пьезорезистивность порядка 17 % в области давлений 0 - 270 кПа. Максимальные значения отрицательной изотропной туннельной магниторезистивности композитов 88%LSMO/(12%LDPE) имеют величины порядка 2 % в магнитном поле 15 кЭ.

Ключевые слова: манганит, композит, пьезорезистивность, магниторезистивность.

Допированный манганит La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃ (LSMO) известен как проводящее ферромагнитное соединение с высокой степенью спиновой поляризации носителей заряда и температурой Кюри 360 К [1]. На его основе синтезируются двухфазные композиты, обладающие при комнатной температуре магниторезистивными свойствами, связанными с межгранульным спин-зависимым туннелированием электронов в постоянном магнитном поле [2]. Нужно отметить, что такие составы типа проводник/диэлектрик проявляют максимальные значения магниторезистивности вблизи порога перколяции [3]. В качестве второй, диэлектрической фазы могут быть использованы как неорганические материалы, так и органические. Преимущества синтеза магниторезистивных материалов с полимерной матрицей очевидны – это исключение диффузионных процессов и химических реакций, характерных для традиционного твердофазного керамического синтеза во время приготовления композитов. Сенсоры давления на основе несобствен-

ного пьезорезистивного эффекта не требуют усилителей и сложных преобразователей сигнала. В нашей работе впервые синтезированы и изучены пьезорезистивные, а также магниторезистивные свойства композитных материалов состава $(100-x)\text{LSMO}/x\text{LDPE}$ при $x = 7, 8, 9, 12, 15, 17, 18, 22$ массовых процентов, где LDPE – low-density polyethylene, полиэтилен низкой плотности. Выбор полиэтиленовой матрицы обусловлен свойствами полиэтилена низкой плотности – высокой химической стабильностью, дешевизной, по сравнению с другими органическими соединениями. Расчет пьезорезистивности PR проводился по формуле:

$$PR = ((R_0 - R_p) / R_0) \cdot 100\% ,$$

где R_0 – электрическое сопротивление образца без приложенного давления, R_p – значение электрического сопротивления под давлением P .

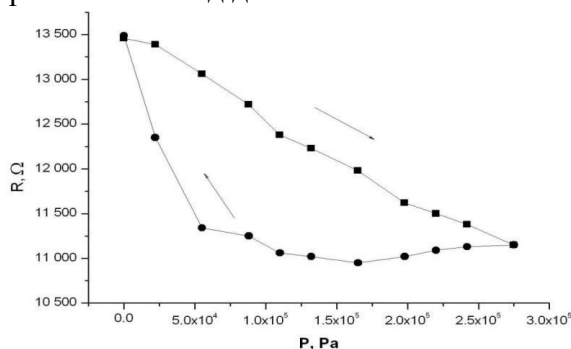


Рисунок. Зависимость электрического сопротивления образца 85%LSMO/15%LDPE от приложенного давления. Стрелками отмечен прямой и обратный ход

При одномерном сжатии исследуемого образца 85%LSMO/15%LDPE, находящегося вблизи концентрационного порога протекания, за счет деформации полиэтиленовой матрицы, в которой расположены кристаллиты манганита, уменьшается расстояние между кристаллитами. Поэтому сопротивление исследуемого образца также уменьшается.

В исследованной области давлений чувствительность образца 85%LSMO/15%LDPE достигает 8.40 мΩ/Па.

Наибольшие величины магниторезистивности показали составы 90%LSMO/10%LDPE и 88%LSMO/12%LDPE. Для них магниторезистивность от напряженности магнитного поля зависит линейно и достигает 2% при 15 кЭ.

Литература

1. Hwang H.Y. Spin-Polarized Intergrain Tunneling in $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3$ / H. Y. Hwang, S.-W. Cheong, N. P. Ong, and B. Batlogg // Phys. Rev. Lett.-1996.-V. 77 (10).-P. 2041-2044.
2. Balcells Ll. Enhanced field sensitivity close to percolation in magnetoresistive $\text{La}_{2/3}\text{Sr}_{1/3}\text{MnO}_3/\text{CeO}_2$ composites / Ll. Balcells, A. E. Carrillo, B. Martinez, and J. Fontcuberta // Appl. Phys. Lett.-1999.-V.74 (26).-P. 4014-4016.
3. Кабиров Ю.В. Магниторезистивность стеклокомпозитов $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3/\text{Sb}_2\text{O}_3$ при комнатной температуре / Ю.В. Кабиров, В.Г. Гавриляченко, А.С. Богатин, Т.И. Чупахина, Т.В. Гавриляченко // Физика твердого тела.-2015.-Т. 57.-В.1.-С. 16-18.

UDC 537.622.6

AFTER-EFFECT OF FEMTOSECOND LASER IRRADIATION IN Ta/Pt/GdFeCo/IrMn/Pt HETEROSTRUCTURES

O.V.Koplak¹, R.B.Morgunov², M. Hehn³, P. Vallobra⁴, S. Mangin⁵

¹Head of laboratory, o.koplak@gmail.com

²Professor, morgunov2005@yandex.ru

³Senior scientist, henn@univ-lorraine.fr

⁴Senior scientist, vallobra@univ-lorraine.fr

⁵Head of laboratory, Professor, stephane.mangin@univ-lorraine.fr

^{1,2}Institute of Problems of Chemical Physics, 142432, Chernogolovka, Russia

^{1,2}Tambov State Technical University, 392002, Tambov, Russia

^{3,4,5}Institute Jean Lamour, UMR 7198 CNRS, Université de Lorraine, 54011 Nancy, France

Femtosecond laser single pulses can be used for accurate local thinning of the multilayered Ta/Pt/Gd_{21.6}Fe_{67.8}Co_{10.5}/IrMn/Pt heterostructures, allowing local control of the ferromagnetic layer. Laser burned craters have perfect round shape with no large defects, cracks and melting traces, if the fluence does not exceed a threshold value 12 – 15 mJ/cm². Indentation tests showed a decrease in the elastic modulus inside the crater by 1.2 times. A change in hardness was not detected, although the shape of indentation imprints indicates a clear change in plastic properties. These changes can be explained by impressing of the surface material into the film under external stresses. Local changes of the magnetization detected by MOKE and MFM indicate edge demagnetizing field of the crater. The laser irradiation as well as mechanical indentation create internal mechanical stresses and structural defects affecting magnetization in the crater. Internal mechanical stresses diminish local saturation magnetization in the heterostructure, decreases scattering of the switching field. The structural defects cause two different switching fields in the crater. The laser treatment can be used for accurate control of magnetization, demagnetizing field and surface topology.

Keywords: magnetic heterostructure, demagnetizing field, femtosecond laser fluence, thin films, nanohardness

The GdFeCo alloys were demonstrated to be good candidates for ultrafast memory devices based on all-optical switching (AOS) of magnetization under polarized light of femtosecond laser [1]. Thin Gd_{21.6}Fe_{67.8}Co_{10.5} films are typically amorphous ferrimagnets with Curie temperature around 500 K, which can show perpendicular magnetic anisotropy (PMA), and low coercivity. Combination of the ultrafast light-induced switching of magnetization with convenience of the GdFeCo films for spin valves gives nice opportunity to develop light controlled spintronics. The GdFeCo/IrMn heterostructures are usually optimized through the variation of concentrations of chemical elements in the layers [2]. In this paper, we have developed local control of magnetization of the GdFeCo/IrMn film by single ultrashort laser pulses. Laser treatment of the thin films is cheaper and faster in comparison with e-beam lithography, commonly used for surface nanoengineering.

Irradiation of the heterostructure glass/Ta/Pt/GdFeCo/IrMn/Pt (Fig. a) by 50 fs ultrashort laser pulses causes local thinning of the film down to ~ 12 – 30 nm depth. These pits are distinguished by Atomic Force Microscopy (AFM), while their stray magnetic fields were detected by Magnetic Force Microscopy (MFM) (Fig. b).

The crater was formed due to layer- by -layer evaporation of the material. No sign of melting was found in the vicinity of the crater at subthreshold laser fluence, but exceeding of the threshold caused destruction of the layers. Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) revealed depletion of Gd, Fe and Co, responsible for magnetic properties of the subthreshold crater. The amplitude of the local MOKE signal decreased down to 1.7 times in the irradiated area, while thinning of the ferromagnetic layer was 1.1 times. No proportional change of magnetization was caused by bias effect of IrMn layer. Decreased elastic modulus was found inside the subthreshold crater in the irradiated areas.

Laser engineering of the surface of GdFeCo thin films opens the way for local control of energy balance between magnetic anisotropy, exchange coupling and Zeeman energy. This can be used for creation of individual separated sectors on the surface of the magnetic films for capture, storage and analysis of the ferromagnetic nanoparticles and magnetically labeled biomolecules and cells.

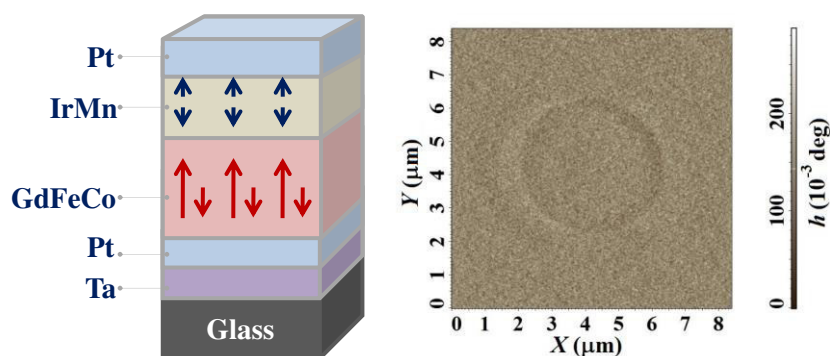


Figure. (a) Structure of the sample, (b) MFM profile of crater burned by femtosecond laser

The work was supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation (grant 3.1992.2017 /4.6). We are grateful to Prof. S.Mangin for fruitful discussions and samples presented in our disposal.

References

1. Hohlfeld J., Gerrits Th., Bilderbeek M., Rasing Th., Awano H., Ohta N. // Phys. Rev. B. – 2001. – V.65. – P.012413
2. Kato T., Nakazawa K., Komiya R., Nishizawa N., Tsunashima S., and Iwata De S.//Transactions on magnetic.- 2008.- V. 44.- P. 3380 - 3383.

УДК 537.9

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ НА ВЧ, СВЧ ПРОВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ ПЛЁНОК

Л.Н. Котов¹, М.П. Ласёк², А.М. Уляшев³, Ю.Е. Калинин⁴, А.В. Ситников⁵

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, kotovln@mail.ru

²Ст. препод., mplasek@yandex.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, uamkom@yandex.ru

ФГБОУ ВО «СГУ им. Питирима Сорокина»

⁴Д-р физ.-мат. наук, профессор, kalinin48@mail.ru

⁵Д-р физ.-мат. наук, профессор, sitnikov04@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе представлены экспериментально полученные и смоделированные ВЧ и СВЧ спектры рассеиваемой мощности в линии передач с композитными плёнками $(Co_{0.86}+Nb_{0.12}+Ta_{0.02})_x+(SiO_2)_{(1-x)/3}$. Получены зависимости полного удельного сопротивления от концентрации металлической фазы композитных пленок на частотах ВЧ и СВЧ диапазона. Показано влияние микро- наноструктуры, магнитных свойств композитных плёнок на ВЧ и СВЧ проводящие свойства композитных плёнок.

Ключевые слова: ВЧ и СВЧ спектры мощности потерь, композитные плёнки, проводимость, микро- и наноструктура, перколяция, магнитные свойства.

Проводимость композитных плёнок на ВЧ и СВЧ токе исследуется с использованием технологий отражения электромагнитных волн от плёнок в волноводах [1] и с помощью 2-зондового метода и прецизионного моста переменного тока [2]. Эти исследования позволяют определять проводимость в ВЧ и СВЧ диапазонах. Проводимость композитных плёнок в диапазоне от сотен мегагерц до десятки гигагерц и выше является недостаточно исследованной. Кроме того, в линиях передачи сигналов пока не существует такой среды передачи, при применении которой не возникали бы помехи, искажения и потери сигналов ВЧ и СВЧ тока. Поэтому определение влияния структурных и магнитных характеристик композитных плёнок на ВЧ и СВЧ проводящие свойства

электрического тока является не простой задачей, и требует применения новых методов и определённых приближений.

Исследуемые композитные пленки $(\text{Co}_{0.86}+\text{Nb}_{0.12}+\text{Ta}_{0.02})_x+(\text{SiO}_2)_{(1-x)/3}$ (где $x \sim 0.14 \div 0.78$) с толщинами от 250 до 370 нм были получены ионно-лучевым распылением в вакууме при давлении 10^{-4} Торр на ситалловых подложках [3]. Исследование рельефа и магнитного фазового контраста поверхности образцов проводилось с помощью атомно-силового микроскопа. Удельное сопротивление плёнок от концентрации металла измерялось мегаомметром Е6-17. ВЧ и СВЧ электрические потери мощности определялись с помощью установки, состоящей из анализатора спектра GSP-7830, генератора качающейся частоты с диапазоном от 12 МГц до 3 ГГц и выходной мощностью 1 мВт, двух коаксиальных кабелей с волновым сопротивлением 50 Ом и подключаемого модуля, в который вставлялись исследуемые плёнки [4]. Получены и смоделированы ВЧ и СВЧ спектры линии передачи с композитными плёнками. При моделировании плёнки с большой концентрацией металла была представлена в виде проводящих каналов, располагаемых в одной плоскости с поперечным сечением, соизмеримым с размерами неоднородностей, наблюдаемых на поверхности. Рост потерь мощности тока с увеличением частоты при концентрации металла $x=0.78$ до потерь мощности с концентрацией металла $x=0.62$ связан с влиянием скин эффекта. Вытеснение тока с поверхности канала с ростом частоты идёт интенсивнее за счёт большей магнитной проницаемости проводящих каналов, которая при концентрации металла $x=0.78$ в разы выше, чем у плёнок при $x=0.62$. По спектрам определено поведение удельного полного сопротивления композитных плёнок с ростом частоты, до и после порога перколяции (рис.1). Интервал концентрации металлов x , для которого свойственны процессы перколяции, характеризуется резким спадом полной удельной электрической проводимости на ВЧ и СВЧ частотах. Ширина интервала x и высота скачка проводимости уменьшается при увеличении частоты тока.

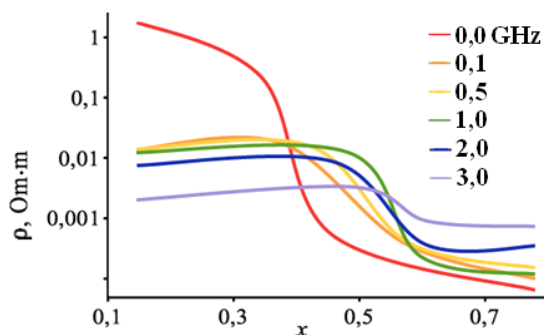


Рисунок. Зависимости полного удельного сопротивления композитных плёнок от x при разных частотах электрического тока

Проведён отжиг композитных плёнок в атмосфере при температуре 550 °С и получены изображения рельефа и магнитный фазовый контраст, до и после отжига, при котором возникает кристаллическая структура в аморфных пленках.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты: №17-02-01138а, 17-57-150001и).

Литература

1. Антонец, И.В. Механизм динамической проводимости аморфных наногранулированных пленок «металл-диэлектрик» в диапазоне сверхвысоких частот / И.В. Антонец [и др.] // Журнал радиоэлектроники. – 2014. – N 4. – P.1-45.

2. Ларькин, А.В. Проводимость на постоянном и переменном токе пленочных нанокompозитов металл – диэлектрик / А.В. Ларькин [и др.] // Вестник БГУ. Сер. 1. – 2009. – № 1. – С.26-37.

3. Калинин, Ю.Е. Гранулированные нанокompозиты металл-диэлектрик с аморфной структурой / Ю.Е. Калинин, А.Т. Пономаренко, А.В. Ситников // Физика и химия обработки материалов. 2001. № 5. С. 14–20.

4. Котов, Л.Н. Магнитная структура и ВЧ, СВЧ электрические потери в композитных плёнках / Л.Н. Котов [и др.] // Вестник ЧелГУ. – 2015. – № 22 (377). – С. 75-82.

УДК 538.935, 538.975

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ В ВАКУУМЕ НА ЭЛЕКТРОПЕРЕНОС В ТОНКИХ ПЛЕНКАХ АМОРФНОГО УГЛЕРОДА

В.А. Макагонов¹, С.Ю. Панков², А.А. Гребенников³, В.А. Фошин⁴

¹Младший научный сотрудник, vlad_makagonov@mail.ru

²Инженер-исследователь, srgpank@mail.ru

³Зав. лаб. БНОЦ ВГТУ «Физика и техника термоэлектрических явлений»
anton18885@yandex.ru

⁴Студент, vadim.foshin@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе представлены результаты исследования влияния термической обработки на электрические свойства тонких пленок аморфного углерода. Установлено, что термообработка в вакууме не хуже 10^{-4} Торр приводит к понижению удельного электросопротивления и росту термоэдс, при этом температурный коэффициент сопротивления, измеренный в диапазоне температур 77-300 К меняется с отрицательного на положительный после отжига при температурах более 350°C. В тонких пленках, подвергнутых термообработке при температурах выше 200°C обнаружено отрицательное магнитосопротивление при 77 К, связанное с проявлением эффекта слабой локализации.

Ключевые слова: аморфный углерод, тонкие пленки, удельное электросопротивление, термоэдс, термообработка, механизмы электропереноса, магнитосопротивление.

Тонкие пленки углерода толщиной ~ 40 нм были получены по методике ионно-лучевого напыления. Осаждение проводилось при давлении аргона $\sim 6 \cdot 10^{-4}$ Торр на керамические подложки из ситалла марки СТ-50, путем распыления мишени пиролитического графита. Температура подложки в процессе осаждения не превышала 50°C.

Результаты рентгеноструктурного фазового анализа показали, что осажденные пленки углерода являются аморфными. Для исследования влияния термообработки на свойства тонких пленок аморфного углерода, было проведено сравнение электрических свойств образца в исходном состоянии и после термообработки в вакууме 10^{-4} Торр при различных температурах в вакууме не хуже 10^{-4} Торр.

Термообработка тонких пленок аморфного углерода при температурах ниже 450°C приводит к понижению удельного электросопротивления и росту значений термоэдс, измеренных при комнатной температуре. Температурный коэффициент сопротивления, измеренный в диапазоне температур 77-300 К меняется с отрицательного на положительный после отжига при температуре более 350°C (рис 1а), при этом знак термоэдс сохраняется и является отрицательным, что указывает на электронный тип проводимости исследованных тонких пленок как в исходном состоянии, так и после термообработки.

Для полученных образцов после отжига при температурах выше 225 °С было обнаружено наличие отрицательного магнитосопротивления, при этом термообработка при не очень большой температуре приводит к появлению отрицательного магнитосопротивления на фоне положительного (рис 1б), характерного для аморфных полупроводников [1]. С ростом температуры термообработки величина магнитосопротивления увеличивается. Известно, что термообработка тонких пленок аморфного углерода, полученных методом ионно-лучевого распыления, приводит к увеличению содержания sp^2 – гибридного графитоподобного углерода [2], для которого характерен 2D

электроперенос в условиях слабой локализации электронов проводимости [3].

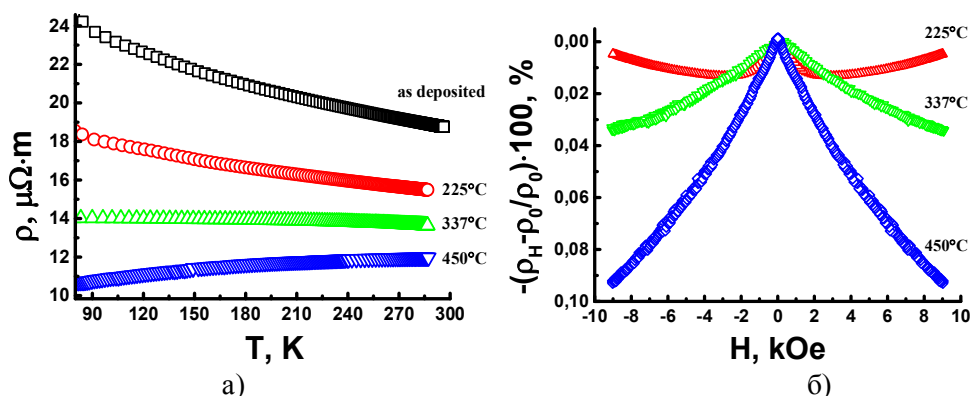


Рисунок. Зависимости удельного электросопротивления от температуры (а) и магнитосопротивления (б) тонких пленок аморфного углерода в исходном состоянии и после термообработки при различных температурах

Таким образом, термообработка тонких пленок аморфного углерода, полученных методом ионно-лучевого распыления, приводит к смене механизма электропроводности от прыжков моттовского типа с переменной длиной прыжка [2] к слабой локализации и появлению квантовых поправок к проводимости [4].

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 19-48-360010 p_a.

Литература

1. Шкловский Б.И. Электронные свойства легированных полупроводников / Б.И. Шкловский, А.Л. Эфрос. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
2. Калинин Ю.Е. Электрические свойства тонких пленок аморфного углерода, полученных методом ионно-лучевого напыления / Ю.Е. Калинин, М.А. Каширин, В.А. Макагонов, С.Ю. Панков, А.В. Ситников // Журнал технической физики. – 2017. – Т. 87. - Вып. 11. - С. 1722-1728.
3. Salemi A.S. Structure dependent negative and positive magnetoresistance of amorphous carbon films / A.S. Salemi, Sun W., Singh R., Luo Z., Zhang X. // Journal Of Applied Physics. 2017. – Т. 121. – Вып. 23. - С. 233903.
4. Гантмахер, В.Ф. Электроны в неупорядоченных средах. 2-е изд. испр. и доп. / В.Ф.Гантмахер– М.: Физматлит, 2005. –232 с.

УДК 537.9

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПЛОТНОСТИ В ХОДЕ СТРУКТУРНОЙ РЕЛАКСАЦИИ И КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АМОРФНЫХ СПЛАВОВ

А.С. Макаров¹, Ю.П. Митрофанов², Р.А. Кончаков³, Н.П. Кобелев⁴, К. Csach⁵,
J.C. Qiao⁶, В.А. Хоник⁷

¹К-т физ.-мат. наук, доцент, a.s.makarov.vrn@gmail.com

²К-т физ.-мат. наук, доцент, ymitrofanov@vspsu.ac.ru

³К-т физ.-мат. наук, доцент, konchakov@mail.ru

⁴К-т физ.-мат. наук, доцент, kobelev@issp.ac.ru

⁵Ph.D., csach@saske.sk

⁶Ph.D., qjczy@hotmail.com

⁷Д-р физ.-мат. наук, зав. кафедрой, v.a.khonik@vspsu.ac.ru

^{1,2,3,7}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный педагогический университет»

⁴ФГБУН Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, РФ

⁵Institute of Experimental Physics SAS, Košice, Slovak Republic

⁶Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China

В ходе анализа экспериментальных данных дилатометрических исследований и измерений нерелаксированного модуля сдвига установлено, что изменения плотности,

происходящие при структурной релаксации и кристаллизации аморфных сплавов тесно связаны с релаксацией модуля сдвига. Полученные результаты обсуждаются в рамках межузельной теории.

Ключевые слова: структурная релаксация, кристаллизация, дефекты, релаксационный объём, межузельная теория.

Плотность аморфных сплавов (АС) в подавляющем большинстве случаев на 0,3–2% меньше в сравнении с кристаллическим аналогом. Уплотнение АС также происходит при структурной релаксации (СР). В ходе СР оно составляет 0,1–0,5% в зависимости от химического состава и способа приготовления АС [1]. Изменение плотности отражает внутренние атомные перестройки, происходящие в некристаллической структуре АС при СР и кристаллизации. Поэтому понимание их внутренней природы является проблемой первостепенной важности для физики некристаллических материалов. В литературе имеются несколько подходов к этой проблеме. Ранние интерпретации приписывали изменения плотности в аморфном состоянии к изменению топологического ближнего порядка [2] или уменьшению свободного объёма (области пониженной локальной плотности упаковки) [3]. В дальнейшем изменения плотности начали объяснять изменением концентрации определенных структурных дефектов. К таковым можно отнести «свободный объём» (free volume) и «дефекты течения» (flow units) [4–5]. Несмотря на то, что проблеме было уделено большое внимание, полноценного понимания природы изменения плотности при СР/кристаллизации в рамках из этих подходов достигнуто не было.

В настоящей работе для интерпретации изменения плотности АС была использована межузельная теория (МТ) [6]. Процесс плавления кристаллов МТ неразрывно связывает с генерацией межузельных дефектов в расщепленной (гантельной) конфигурации. Эти дефекты остаются устойчивыми объектами как в жидком, так и в твердом аморфном состояниях. Таким образом изменения физико-химических свойств АС можно связать с вариациями концентрации дефектов типа межузельных гантелей в кристаллах.

При формировании концентрации межузельных дефектов c происходит ожидаемое относительное увеличение объёма $\Delta V/V = (\alpha_i - 1)c$, где ΔV – изменение объёма, α_i – релаксационный объём межузельного дефекта. МТ связывает концентрацию дефектов c с нерелаксированным модулем сдвига АС G при помощи соотношения $G = \mu \exp(-\alpha_g \beta c)$, где μ – модуль сдвига кристаллах, $\alpha_g \approx 1$ безразмерная константа, связанная полем упругих напряжений дефекта, β – сдвиговая восприимчивость. С учетом взаимосвязи между изменениями объёма и плотности можно прийти к соотношениям для относительного изменения плотности при изотермической (1) и изохронной СР и кристаллизации (2) АС:

$$\left[\frac{\Delta \rho(t)}{\rho} \right]_{iso} = \frac{\alpha_i - 1}{\beta} \ln \frac{G(t)}{G_0}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta \rho(T)}{\rho_n} = \frac{\alpha_i - 1}{\beta} \ln \left[\frac{\mu_n}{G_n} \frac{G(T)}{\mu(T)} \right], \quad (2)$$

где G_0 и G – модули сдвига АС до (при $t=0$) и после релаксации (в течение времени t) соответственно. Нижний индекс « n » обозначает соответствующую физическую величину при комнатной температуре. Дилатометрические измерения и измерения модуля сдвига на четырех составах АС показали, что уравнения (1) и (2) обеспечивают хорошее согласие между экспериментальными и расчетными зависимостями плотности. Аналитические соотношения, приведенные в данной работе, могут быть использованы для оценки изменений плотности, происходящих в результате термообработки АС.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ №3.1310.2017/4.6.

Литература

1. Wang W.H. The elastic properties, elastic models and elastic perspectives of metallic glasses / W.H. Wang // Prog. Mater. Sci. – 2012. - V. 57. - P. 487–656.
2. Egami T. Structural relaxation in amorphous alloys - compositional short range ordering / T. Egami // Mater. Res. Bull. – 1978. - V. 13. - P. 557–562.
3. Beukel A. On the kinetics of structural relaxation in metallic glasses / A. van den Beukel, S. Radelaar // Acta Metall. – 1983. - V. 31. - P. 419–427.
4. Xue R.J. Characterization of flow units in metallic glass through density variation / R.J. Xue, D.P. Wang, Z.G. Zhu, D.W. Ding, B. Zhang, W.H. Wang // J. Appl. Phys. – 2013. - V. 114. - P. 123514.
5. Gulzar A. Correlation between flow units and crystallization in metallic glasses / A. Gulzar, L.Z. Zhao, R.J. Xue, K. Shahzad, D.Q. Zhao, W.H. Wang // J. Non-Cryst. Sol. – 2017. - V. 461. - P. 61–66.
6. Granato A.V. Interstitialcy model for condensed matter states of face-centered-cubic metals / A.V. Granato // Phys. Rev. Lett. – 1992. - V. 68. - P. 974–977.

УДК 537.226.4

ЧАСТОТНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЦИФРОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИТОВ СИСТЕМЫ "ПЬЕЗОКЕРАМИКА-ПОЛИМЕР"

Д.И. Макарьев¹, М.А. Луговая², А.Н. Резниченко³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, dmakarev@rambler.ru

²Аспирант, lugovaya_maria@mail.ru

³Научный сотрудник, reznichenkoan@yahoo.com

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Представлены способы получения цифровых пьезоматериалов на основе смесевых композитов системы "пьезокерамика-полимер" и "пьезокерамика-полимер-металл", предназначенных для использования в качестве рабочих материалов при изготовлении пьезоэлементов по технологии послойного склеивания порошков. Показаны методы исследования данных материалов и частотные зависимости их электромеханических свойств.

Ключевые слова: аддитивные технологии, цифровые пьезоматериалы, смесевые композиты, пьезокерамика, полимеры.

Аддитивные технологии в последнее время развиваются бурными темпами и проникают в различные отрасли народного хозяйства [1]. Предварительный анализ показывает, что ряд технологий 3D печати может быть отобран и адаптирован для производства элементов и конструкций из активных материалов, в т.ч. и пьезоэлементов. Изготовление пьезоэлементов с использованием аддитивных технологий в настоящее время ограничивается отсутствием материалов, которые могли бы использоваться в качестве рабочих.

В качестве опорной нами была выбрана технология послойного склеивания порошков. Согласно данной технологии, изделие изготавливается послойно: сначала на рабочий стол наносится слой порошка, который склеивается в нужных точках при помощи клея, который, в свою очередь, наносится в нужные точки при помощи трехкоординатной системы позиционирования. Если в качестве порошка использовать частицы пьезокерамики, а в качестве клея полимер с нужными свойствами, то при помощи такой технологии возможно создать композитную структуру в виде частиц пьезокерамики в полимерной матрице.

Конкретно при изготовлении образцов такого композита был использован двухкомпонентный полимер, один из компонентов которого представлял собой порошок, другой был жидким. В качестве частиц пьезокерамики были использованы частицы по-

ристой пьезокерамики ПКР-1 с пористостью от 20 до 40%. Твердый компонент полимера смешивался с частицами пьезокерамики, после чего на полученную смесь наносился жидкий компонент. Многослойный композит не имел пьезосвойств. Это объясняется огромной разницей в диэлектрических проницаемостях пьезокерамики и полимера [2]. При изготовлении композита по данной технологии полимер обволакивает частицы керамики и практически препятствует проникновению в нее электрического поля. Композит, состоящий из одного слоя пьезокерамики, частицы которого выходили одновременно на обе, снабженные электродами поверхности пьезоэлемента, имел пьезоэффект [3]. Материал отличался тем, что обладал низкими плотностью, добротностью и частотной постоянной. В частности, его удельное акустическое сопротивление, определяемое как произведение плотности материала на скорость звука, составляет $(9\div 14)\times 10^6$ кг/м²с.

Комбинация этих свойств позволяет обеспечить широкую полосу пропускания при использовании таких материалов в качестве активных элементов в широкополосных и сверхширокополосных излучателях и приемниках ультразвука. Например, ширина полосы пропускания такого элемента с резонансной частотой 235 кГц, нагруженного на воду без согласующих слоев, составила 96%. При этом данный элемент использовался в качестве излучателя ультразвука. В качестве приемника использовался широкополосный ультразвуковой преобразователь с центральной частотой 5 МГц, не имеющий резонансов в диапазоне частот от 50 до 900 кГц. Малый вес и габариты элементов из данного материала позволяет использовать его в качестве основы для компактных ультразвуковых преобразователей, а также других компактных низкочастотных ультразвуковых устройств.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, тема № 12.5425.2017/8.9) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 16-58-48009-Инд-оми).

Литература

1. Шишковский И.В. Основы аддитивных технологий высокого разрешения / И.В. Шишковский. СПб: Питер, 2016. – 400 с.
2. Еремкин В.В. Электромеханические свойства пьезоэлектрических композитов "керамика-полимер" с типом связности 0-3 / В.В. Еремкин, А.Е. Панич, В.Г. Смотряков // Письма в ЖТФ. – 2005. Т. 31. - № 15. – С. 80-84.
3. Макарьев Д.И. О возможности создания цифровых пьезоматериалов на основе смешанных композитов "пьезокерамика-полимер" / Д.И. Макарьев, А.Н. Рыбьянец, Г.М. Маяк // Письма в ЖТФ. – 2015. – Т.41. – Вып. 7. – С. 22-27.

UDC 537.9

INFLUENCE OF THERMAL TREATMENT ON STRUCTURE AND ELECTRICAL PROPERTIES MULTILAYERED THIN FILMS BASED ON OXIDE SEMICONDUCTORS

S.Yu. Pankov¹, V.A. Makagonov², O.V. Zhilova³, A.V. Sitnikov⁴, Yu.E. Kalinin⁵

¹Ingenieur researcher, srgpank@mail.ru

²Cand. Phys.-Mat. of sciences, junior researcher, vlad_makagonov@mail.ru

³ Cand. Phys.-Mat. of sciences, junior researcher, zhilova105@mail.ru

⁴Dr. Phys.-Mat. sciences, professor, sitnikov04@mail.ru

⁵Dr. Phys.-Mat. sciences, professor, kalinin48@mail.ru

Voronezh state technical university

Multilayered (In₂O₃/SnO₂)₆₉ thin films were obtained by ion-beam sputtering. XRD and TEM analysis showed that (In₂O₃/SnO₂)₆₉ samples are multilayered and In₂O₃ and SnO₂ layers are amorphous. The results showed that the multilayered samples were thermally stable up to the heat treatment temperature T <400°C. An increase in the temperature of heat treatment above 400°C

simultaneously leads to the crystallization of the amorphous phase for all values of the bilayer thickness and the destruction of the layered structure at bilayer thicknesses $h_{bl} > 2.5$ nm.

Key words: multilayered heterostructures, oxide semiconductors, heat treatment, electrical resistivity, XRD.

At present time, multilayered heterostructures consisting of oxide semiconductors layers attract significant and growing interest for electronics devices application [1-3], gas sensors [4], etc. In most cases, such heterostructures exhibit improved or new physical properties and can combine the properties of two different materials. Multilayering is also a tool for regulating such structural parameters as the band gap width by influencing the structure of one layer on the structure of another [5,6].

In this paper, we presents results of research influence of thermal treatment on structure and electrical properties $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2)_{69}$ multilayered heterostructures prepared by ion-beam sputtering. The structure of the samples was studied by X-ray diffraction methods (XRD) on a Bruker D2 Phaser diffractometer ($\lambda_{\text{CuK}\alpha 1} = 1.54 \text{ \AA}$). Heat treatment was provided in the vacuum chamber at the pressure is 10^{-2} Torr and in the temperature range 250-600 °C within 30 minutes.

XRD analysis showed that $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2)_{69}$ samples are multilayered and In_2O_3 and SnO_2 layers are amorphous (showed on figure). The results showed that the multilayered samples were thermally stable up to the heat treatment temperature $T < 400$ °C. An increase in the temperature of heat treatment above 400°C simultaneously leads to the crystallization of the amorphous phase for all values of the bilayer thickness and the destruction of the layered structure at bilayer thicknesses $h_{bl} > 2.5$ nm.

For samples with both small and large h_{bl} , the conduction mechanism is thermally activated, in the temperature range close to room temperature. The results of the estimation of the activation energy correspond to the energy levels of oxygen vacancies in single-crystal SnO_2 .

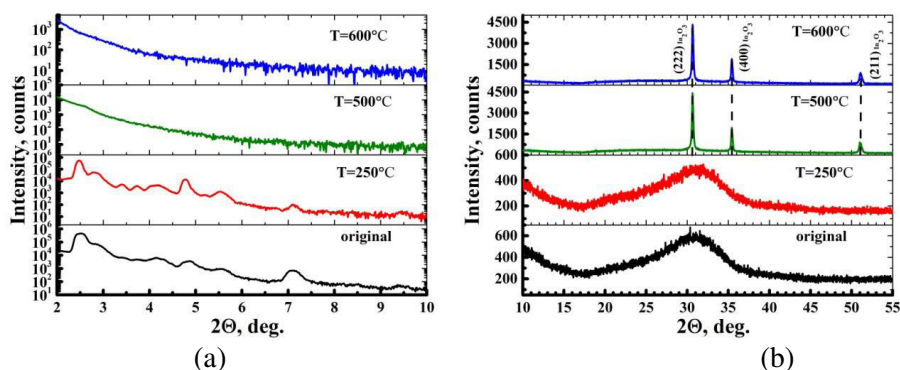


Figure. XRD patterns for $(\text{In}_2\text{O}_3/\text{SnO}_2)_{69}$ multilayered thin film sample (bilayer thickness $h_{bl} = 2,939$ nm) (original and after annealing)

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation as the project part of the state task (No 3.1867.2017/4.6).

References

1. Sanctis S. Stacked indium oxide/zinc oxide heterostructures as semiconductors in thin film transistor devices: a case study using atomic layer deposition / S. Sanctis, J. Krausmann, C. Guhl // Journal of Materials Chemistry C. - 2018. – Vol. 6. – Issue. 3. - P. 464-472.
2. Lee S.J. High-Performance Amorphous Multi layered ZnO-SnO₂ Heterostructure Thin-Film Transistors: Fabrication and Characteristics / Lee S.-J., Hwang C.-S., Pi J.-E., et.al. // Etri Journal. - 2015. – Vol. 37. – Issue. 6. - P. 1135-1142.
3. Cui G., Han D., Dong J., et. al. Effects of channel structure consisting of ZnO /Al₂O₃ multi-layers on thin-film transistors fabricated by atomic layer deposition / Cui G., Han D., Dong J., et. al. // Japanese Journal of Applied Physics. - 2017. – Vol. 56. – Issue. 4.–P. 04CG03.

4. Mitu B. Multilayered metal oxide thin film gas sensors obtained by conventional and RF plasma-assisted laser ablation / Mitu B., Marotta V., Orlando S. // Applied Surface Science. - 2006. – Vol. 252. – Issue. 13. - P. 4637-4641.

5. Bhattacharya P. Fabrication of stable wide-band-gap ZnO/MgO multilayer thin films / P. Bhattacharya, Rasmi R. Das, R. S. Katiyar // Appl. Phys. Lett. - 2003. – Vol. 83. - Issue. 10. - P. 2010-2012.

6. Kaushal A. Pulsed laser deposition of transparent ZnO/MgO multilayers / A. Kaushal, D. Kaur // Journal of Alloys and Compounds. - 2011. – Vol. 509. – Issue. 2. - P. 200-205.

UDC 537.9

INFLUENCE OF DISSIPATIVE PROPERTIES ON THE MAGNETOELECTRIC COEFFICIENT IN MULTILAYER FILMS

V.N. Nechaev¹, A.V. Shuba²

¹Doct. of phys.-math. sci, Prof., wladnic@mail.ru

²Cand. of phys.-math. sci, Assoc. prof., shandvit@rambler.ru

Military Educational and Scientific Centre of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh)

The dissipative properties of a two-layer ferromagnetic-piezoelectric system are taking into account to estimate the maximum value of the longitudinal coefficient of the magnetoelectric coupling

Keywords: longitudinal magnetoelectric effect, dissipative properties of the ferromagnet-piezoelectric system.

At the transition from a bulk sample to a film, as a result of the transition to another mathematical model — boundary problems for differential equations — the dependence of the magnetoelectric (ME) coefficient α_E on the geometric dimensions of the system is appearing. However, the restricted geometry consideration [1,2] can't change the order of effect magnitude in resonance condition in the general case. If don't consider the energy dissipation processes in the structure, the response of the system will be abnormally large ($\alpha_E \rightarrow \infty$).

Let the two-layer structure of a ferromagnetic-piezoelectric be located in the xOy plane perpendicular to the polarization \vec{P} and magnetization \vec{M} vectors. The equations of motion of the ferromagnetic (1) and piezoelectric (2) layers with l_m and l_p thicknesses have the form

$$\rho^{(1)} \frac{\partial^2 u_x^{(1)}}{\partial t^2} = G^{(1)} \frac{\partial^2 u_x^{(1)}}{\partial z^2} + \eta^{(1)} \frac{\partial^3 u_x^{(1)}}{\partial t \partial z^2}; \quad (1)$$

$$\begin{cases} \rho^{(2)} \frac{\partial^2 u_x^{(2)}}{\partial t^2} = G^{(2)} \frac{\partial^2 u_x^{(2)}}{\partial z^2} + G^{(2)} d_{zxz} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \eta^{(2)} \frac{\partial^3 u_x^{(2)}}{\partial t \partial z^2}, \\ \left(\varepsilon_{zz} - 4\pi d_{zxz}^2 G^{(2)} \right) \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - 4\pi d_{zxz} G^{(2)} \frac{\partial^2 u_x^{(2)}}{\partial z^2} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

where $\rho^{(j)}$, $G^{(j)}$, $\eta^{(j)}$, $u_x^{(j)}$ are the densities, shear modules, internal friction coefficients and components of displacement vectors $\vec{u}^{(j)} = \{u_x^{(j)}, u_z^{(j)}\}$ for ferromagnetic (1) and piezoelectric (2) layers, respectively; φ is the electric potential of piezolayer; ε_{zz} , d_{zxz} are the components of the permittivity and piezoelectric modules tensors.

Solutions of equations (1), (2) will be found in the form

$$u_x^{(j)}(z, t) = g^{(j)}(z) e^{-i\omega t}, \quad j = 1, 2; \quad (3)$$

$$\varphi(z, t) = h(z) e^{-i\omega t},$$

where ω is the frequency of external magnetic field oscillations, applied parallel to the \vec{P} , \vec{M} vectors. Substituting functions (3) into equations (1), (2), we obtain the equations for the amplitudes of the unknown functions:

$$\frac{\partial^2 g^{(j)}}{\partial z^2} + \left(\frac{\omega}{C^{(j)}} \right)^2 g^{(j)} = 0, \quad j=1,2, \quad (4)$$

where $C^{(1)} = \sqrt{(G^{(1)} - i\omega\eta^{(1)})/\rho^{(1)}}$, $C^{(2)} = \sqrt{(G^{(2)}\varepsilon_{zz}/(\varepsilon_{zz} - 4\pi d_{zz}^2 G^{(2)}) - i\omega\eta^{(2)})/\rho^{(2)}}$ are rates propagation of elastic waves in the layers. Consideration the expression for the ME coefficient

$$\alpha_E = \frac{\langle E_z \rangle}{H_0},$$

where $\langle E_z \rangle$ is the average value of the electric field strength of the structure, and, linearizing the denominator of the obtained expression for the coefficient of viscosity $\eta^{(j)}$, we get ME ratio for resonant frequencies ω_i ($i=0,1,2,3,\dots$):

$$\alpha_E^{\max} = \frac{8\pi d_{zz} \rho^{(2)} C^{(1)} (C^{(2)})^3 a}{\varepsilon_{zz} l_p \omega_i^2 \cos(\omega l_m / C^{(1)}) \cos(\omega l_p / C^{(2)})} \times \cos(\omega l_p / C^{(2)}) - 1 \times \frac{\eta^{(2)}}{\rho^{(2)} C^{(2)}} \left[\frac{\omega l_p C^{(1)} / (C^{(2)})^2}{\cos^2(\omega l_p / C^{(2)})} - \text{tg}(\omega l_m / C^{(1)}) \right] + \frac{\eta^{(1)}}{\rho^{(1)} C^{(1)}} \left[\frac{\omega l_m C^{(2)} / (C^{(1)})^2}{\cos^2(\omega l_m / C^{(1)})} - \text{tg}(\omega l_p / C^{(2)}) \right]. \quad (5)$$

The results, obtained by formula (5) for the nickel/PZT system, are shown in table.

Table

The values of the ME coefficient α_E^{\max} , V/(cm·Oe) at natural oscillations frequencies $\omega = \omega_i$, MHz, $i=0, \dots, 3$ of the composite at different thicknesses l_p of the piezoelectric layer and thickness $l_m = 1$ mm of the ferromagnetic layer

Piezolayer thickness l_p , mm	$i=0$		$i=1$		$i=2$		$i=3$	
	ω_i	α_E^{\max}	ω_i	α_E^{\max}	ω_i	α_E^{\max}	ω_i	α_E^{\max}
0.5	6.0621	4.418	12.1792	2.199	18.2384	1.468	24.3036	1.102
1.0	4.5440	125.533	9.0858	62.780	13.6319	41.844	18.1715	31.391
1.5	3.6346	18.610	7.2413	9.341	10.8919	6.210	14.5011	4.664

It should be noted that the evaluation method α_E^{\max} in the papers [1,2] is not clear, since the parameters of the dissipative materials are absent in the corresponding formulas.

References

1. Bichurin M.I., Filippov D.A., Petrov V.M., Laletsin V.M., Paddubnaya N., Srinivasan G. // Phys. Rev. B. 2003. V. 68. P.132408.
2. Bichurin M.I., Petrov V.M., Averkin S.V., and Filippov A.V. // Phys. Solid State. 2010. V. 52. 10. P. 2116.

УДК: 537.9

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ И МИКРОТВЕРДОСТЬ НАНОКОМПОЗИТНЫХ ПОКРЫТИЙ Ni-(AlZrO)

К.С.Яковлева¹, А.Н.Смирнов², Х.Адили³, О.В.Стогней⁴

¹Студент, kristina_yakovleva_555@mail.ru

²Аспирант, deadpank@mail.ru

³Аспирант, Hemzaadili0@gmail.com

⁴Д-р ф.-м. наук, профессор, sto@sci.vrn.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Исследовано влияние отжига, проводимых при 700 С в воздушной среде и в вакууме, на микротвердость и структуру нанокompозитных покрытий Ni-AlZrO и NiO-AlZrO.

Ключевые слова: нанокompозит, микротвердость, структурная релаксация, рентгеновская дифракция.

Нанокompозитные покрытия Ni-AlZrO получены ионно-лучевым распылением составных мишеней в атмосфере аргона. В исходном состоянии покрытия представляют собой нанокompозиты: однородная аморфная матрица AlZrO с кристаллическими наночастицами ОЦК Ni. Средний размер наночастиц незначительно увеличивается с ростом содержания Ni (4-6 нм). Значения микротвердости (H_k) исходных покрытий Ni-AlZrO слабо зависят от концентрации никеля (исследован интервал 5-70 ат.% Ni) и в среднем составляют 1000-1200 ед. Кнупа, что в три раза выше, чем значения H_k чистого аморфного покрытия AlZrO. Отжиг в воздушной среде при 700 С приводит к окислению никелевых наночастиц, кристаллизации аморфной фазы в диоксид циркония (ZrO_2), уменьшению H_k в композитах, находящихся за порогом перколяции, в два раза (рис.1) и некоторому росту значений H_k в доперколяционной области.

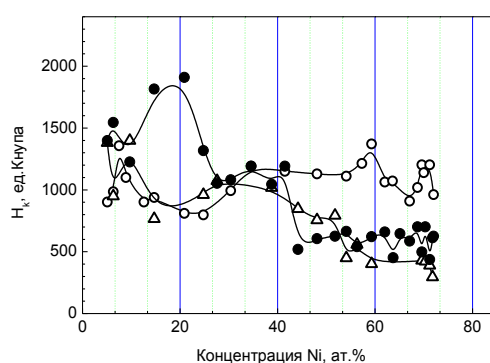


Рисунок. Микротвердость покрытий Ni-AlZrO в исходном состоянии (о) и после отжига при 700 С (•) – воздух, (Δ) – вакуум

Отжиг в вакууме при 700 °С не приводит к окислению никелевой фазы, хотя кристаллизация аморфной матрицы в диоксид происходит (ZrO_2). При этом изменения микротвердости в композитах, находящихся за порогом перколяции, абсолютно сопоставимы с изменениями, происходящими после отжига в воздушной среде.

Предполагается, что изменения микротвердости покрытий связаны с изменением среднего размера зерна никелесодержащей фазы. Действительно, после отжига в вакууме размер наногранул Ni увеличился (10-30 нм, в зависимости от количества Ni). После отжига покрытий на воздухе размер гранул NiO также вырос и составил 10-30 нм, в зависимости от состава. Снижение значений H_k за порогом перколяции (когда фаза никеля становится непрерывной) может являться проявлением эмпирического закона Холла-Петча для нанокристаллов. Рост H_k до порога перколяции связан с изменением фазового состава – появлением гранул из более твердого материала NiO по сравнению с чистым никелем.

РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЭФФЕКТЫ В $\text{Cd}_3\text{As}_2+44.7$ мол.% MnAs ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ

Л.А. Сайпулаева¹, М. М.Гаджиалиев², А.Г. Алибеков³

¹Канд. физ.-мат. наук, профессор, luizasa11@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, maggadji@rambler.ru

³Аспирант, a.abdulabek@gmail.com

ФГБУН Институт физики им. Х.И. Амирханова ДагНЦ РАН, Махачкала, Россия

Проведен анализ зависимости времен релаксации электросопротивления и термоэдс от давления в композите $\text{Cd}_3\text{As}_2+\text{MnAs}$ ($\text{MnAs} - 44.7\%$). Установлено, что в интервале 30-33 ГПа наблюдается значительное увеличение времени релаксации электросопротивления и термоэдс, связанное с возможным структурным или электронным фазовым переходом.

Ключевые слова: давление, термоэдс, электрическое сопротивление, фазовый переход.

На рис. 1 представлена зависимость электросопротивления, измеренная в области давлений от 15 ГПа до 50 ГПа. При увеличении давления от 15 до 24 ГПа сопротивление резко падает. Начиная с $P \approx 33$ ГПа, оно меняется очень медленно. Если предположить, что при атмосферном давлении электрические и магнитные свойства в основном определяются поведением нанокластеров MnAs , как и в случае композита $\text{Cd}_3\text{As}_2 + \text{MnAs}$ (52.7 мас. % MnAs), то в условиях высоких давлений значительную роль также могут играть и изменение расстояний между гранулами, и возможные проявления особенностей структурных характеристик и свойств матрицы композита. Наблюдаемое поведение электросопротивления исследуемого нами материала с изменением давления от 15 ГПа до 50 ГПа связано, в первую очередь, с изменениями характеристик электронной подсистемы Cd_3As_2 , если принять во внимание устойчивость моноклинной кристаллической фазы Cd_3As_2 вплоть до 50 ГПа [1]. Проведенный анализ зависимости времен релаксации электросопротивления от давления позволил установить, что в интервале 30-33 ГПа наблюдается значительное увеличение времени релаксации электросопротивления, связанное с возможным структурным или электронным фазовым переходом. При оценке времен релаксации электросопротивления под давлением наблюдали следующую закономерность: при фиксированных значениях постепенно увеличивающегося давления зависимость электросопротивления от времени аппроксимируется двойной экспонентой $R(t)=A_1e^{-t/\tau_1}+A_2e^{-t/\tau_2}$.

На рис.2 представлены результаты двух, следующих один за другим, на одном и том же образце, измерений термоэдс для материала $\text{Cd}_3\text{As}_2+\text{MnAs}$ ($\text{MnAs}-44.7\%$).

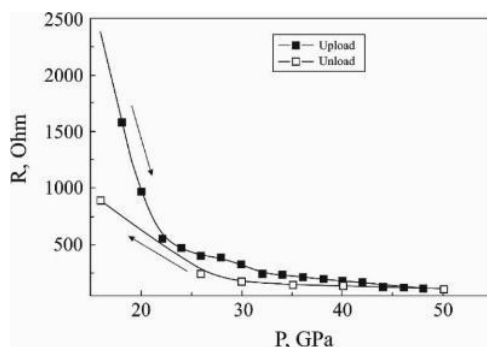


Рис. 1. Барические зависимости электросопротивления

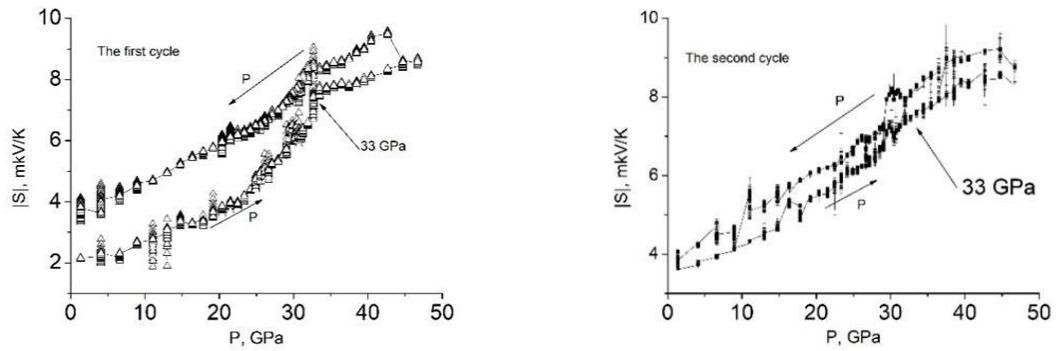


Рис. 2. Зависимости коэффициента Зеебека для композита $(\text{Cd}_3\text{As}_2)_{0.653}(\text{MnAs})_{0.44}$: а, б – соответственно 1-й 2-й циклы измерений

На всех графиках в окрестности $P \approx 33$ ГПа можно наблюдать особенности в виде точек перегиба. В области указанных давлений были обнаружены заметные релаксационные эффекты при исследовании процессов электросопротивления.

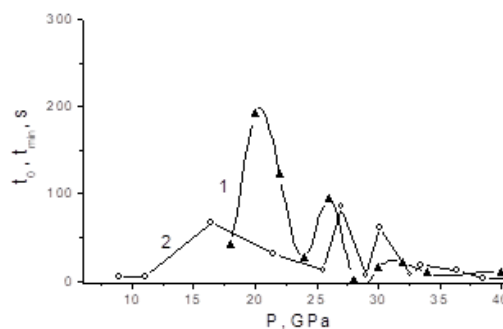


Рис. 3. Барические зависимости времени релаксации электросопротивления $t_{\min} = \min\{t_1, t_2\}$, оцененного из зависимостей электросопротивления от времени $R(t) = A_1 e^{-t/t_1} + A_2 e^{-t/t_2}$ (1), и времени релаксации термоэдс t_0 , оцененного из зависимостей термоэдс от времени $S(t) = A e^{-t/t_0}$ (2)

Литература

1. Lanco He. Pressureinduced superconductivity in the three-dimensional topological Dirac semimetal Cd_3As_2 / YatingJia, Sijia Zhang, Xiaochen Hong, ChangqingJin and Shiyan Li// npj Quantum Materials.-2016.- 1.- p. 16014.

VI. РАЗНОЕ

УДК 537.9

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ТЕРМООБРАБОТКИ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК CuO, ПРИГОТОВЛЕННЫХ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ

Д.С. Пермяков¹, С.И. Рембеза², Т.Г. Меньшикова³

¹Магистр, Dima.P.S@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, rembeza@yandex.ru

³Доц. кандидат, физ.-мат. наук, menshikova.vrn@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В данной статье рассматривается влияние времени отжига при температурах 400 и 500 °С. на электрофизические свойства пленок CuO, приготовленных золь-гель методом на основе изопропилового спирта, ацетата меди и диэтиламина. Толщина пленок составила 440 нм. Определены фазовый состав, электросопротивление, тип проводимости, оптические свойства пленок.

Ключевые слова: оксид меди, золь-гель, тонкие пленки, рентгенофазовый анализ, удельное сопротивление, отжиг, оптические свойства.

CuO – нетоксичный прямозонный полупроводниковый материал с проводимостью р-типа, высоким коэффициентом поглощения для видимого света и шириной запрещенной зоны 1,4-2,9 эВ[1]. Свойства очень сильно зависят от методики получения. Оксид меди обладает моноклинной кристаллической решеткой[3]. Пленку CuO можно получить такими методами как пиролиз[2], золь-гель[3], термический отжиг[4], методом химической ванны[5] и т.д. Этот материал может применяться в солнечной энергетике, газовых датчиках, фотокаталитических расщепителях воды[1] и других полупроводниковых приборах и аналитических устройствах.

Пленка CuO была получена золь-гель методом на основе изопропилового спирта, ацетата меди и диэтиламина. Образцы с пленкой отжигались группами в квазизамкнутом объеме при 400 и 500 °С. Сопротивление образцов контролировалось при постоянной температуре, с помощью пишущего мультиметра, при 500 °С сопротивление пленки стабилизировалось быстрее чем при 400 °С. Результаты приведены на рис.

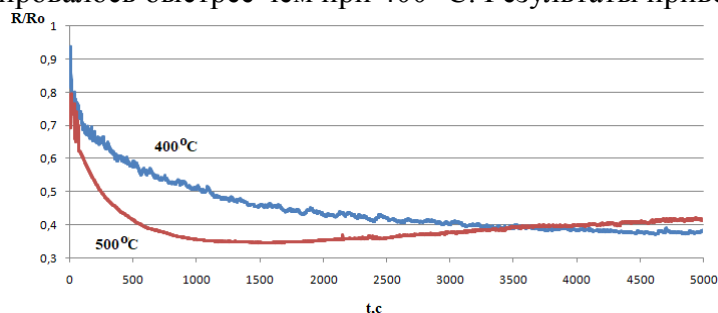


Рисунок. Относительное сопротивление пленки CuO от времени при 400 и 500 °С

Для исследования фазового состава пленок была выполнена рентгеновская дифракция. Рентгеновская дифракция подтвердила фазовый состав пленки CuO. Можно сказать, что пленка полученная при 250 °С практически не кристаллизована, так как на ней наблюдается единственный рефлекс соответствующий CuO (1,1,0) 31,7°. В результате одночасового отжига пленок при 400 и 500 °С происходит кристаллизация и проявляются рефлексы: (1,1,0) 31,7°, (-1,1,1) 35,5°, (1,1,1) 38,8°, соответствующие CuO. Толщина пленок составила 440 нм. Удельное сопротивление варьируется от 350 на неотожженных образцах до 20 Ом·см на отожженных образцах. Оптические параметры показали прозрачность около 45% и коэффициент поглощения $4 \cdot 10^5$ 1/см в диапазоне от 300 до 1100 нм и ширину запрещенной зоны 2,65 эВ. Можно сделать вывод, что отжиг

улучшает параметры пленок CuO. Совокупность оптических и электрических параметров говорит о возможности применения пленки CuO в солнечной энергетике, в качестве эффективного поглощающего слоя.

Литература

1. Y. Yang, D. Xu, Cu₂O/CuO Bilayered Composite as a High-Efficiency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction *Scientific Reports*, Oct 17 [Online] Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5066255/#b62>
2. F. Z. CHAFI and B. Fares, “2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)” Fe-doped CuO deposited by spray pyrolysis technique, DOI 10.1109/IRSEC.2015.7455109, pp. 1–5, Dec. 2015.
3. Ş. Baturay, “n-Type conductivity of CuO thin films by metal doping”, *Applied Surface Science*, DOI 10.1016/j.apsusc.2017.12.004, V 477, pp. 91-95, May. 2019.
4. L. JianBo, “Single phase CuO thin films prepared by thermal oxidation in air with water vapor” *Advanced Materials Research*, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1109.544 V 1109 pp. 544-548 Jun. 2015
5. V. Ramya; “CuO Thin Film Prepared by Chemical Bath Deposition Technique: A Review” *International Journal of NanoScience and Nano-technology* V 8, n 1, pp. 11-15 Jun 2017

УДК 538.975

ВЛИЯНИЕ ПРИМЕСИ АЛЮМИНИЯ НА ПРОЦЕССЫ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ПЛЕНОК ZnO

М.А. Бельх¹, С.И. Рембеза²

¹Магистр, belykh.maks@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, rembeza@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Работа посвящена исследованию влияния примеси алюминия на процессы кристаллизации пленок, полученных золь-гель и их электрические свойства.

Ключевые слова: электропроводность, золь-гель метод, кристаллизация, поверхностное сопротивление.

Электропроводность ZnO напрямую связана с числом свободных электронов. Электроны, образующиеся в результате ионизации междоузельного атома цинка и кислородных вакансий, влияют на электропроводность кристаллов ZnO [1]. ZnO обычно демонстрирует проводимость n-типа, где допанты вносят дополнительный вклад создавая избыток отрицательных носителей заряда. Упрощенная схема замещения иона Zn²⁺ на ион Al³⁺ показана на рис. 1а, 1б.

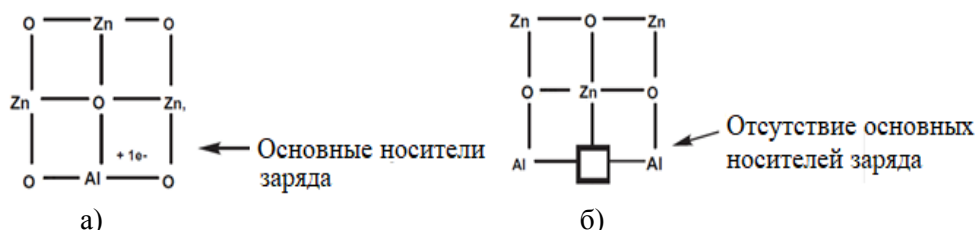


Рис. 1. Возможные места внедрения ионов Al³⁺ в решетку цинкита: а – замещение иона Zn²⁺ в узле решётки на ион Al³⁺; б – ион Al занимает соседние или проксимальные узлы решетки

Слишком высокая концентрация может привести к тому, что ионы допанта будут занимать соседние или проксимальные узлы решетки, как на рис. 1 б вызывая ионные вакансии, приводя к нейтральному дефекту, который не вносит вклад в проводимость. При высокотемпературном отжиге снижается растворимость Al в ZnO [2].

Для эксперимента были отобраны, ранее изготовленные золь-гель методом образцы пленок, прошедшие отжиг при температуре 550 °С 30 минут. Затем был проведен повторный отжиг при 550 °С с загрузкой пластин в предварительно разогретую печь и выдержке 60 минут. Поверхностное сопротивление образцов было измерено четырехзондовым методом. Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица

Поверхностное сопротивление образцов с различным временем отжига

Образец %	8U 0,5 %	5A 0,75 %	4T 1 %	Время отжига, мин
Сопротивление МОм	4,88	3,353	0,686	30
	9,06	4,86	2,688	60

По результатам обоих экспериментов построен график (рис. 2).

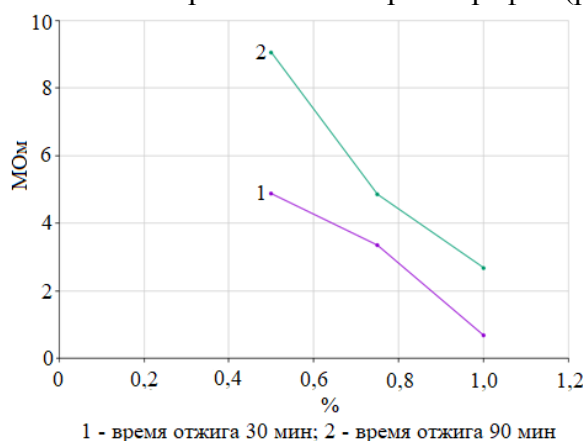


Рис. 2. График зависимости сопротивления пленок оксида цинка от концентрации лигатуры и времени отжига

Из приведенной табл. 1 и графиков рис. 2 видно, что кристаллизация с увеличением легирующей примеси алюминия растет, поэтому сопротивление образцов снижается. Увеличение времени отжига привело к увеличению сопротивления образцов.

Литература

1. Lee J. -H. Electrical and optical properties of ZnO transparent conducting films by the sol-gel method./ J. -H. Lee, K. -H. Ko, and B.-O. Park // Journal of Crystal Growth. – 2003. – V. 247. – № 1 – 2. – P.119 – 125.
2. Serier H. Al-doped ZnO powdered materials: Al solubility limit and IR absorption properties / H. Serier, M. Gaudon, and M. Mntrier // Solid State Sciences. – 2009. – V. 11. -№ 7. – P. 1192 – 1197, 2009.

УДК 538.975

ВЛИЯНИЕ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ПАРАМЕТРЫ МЕТАЛЛОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ, ИЗГОТОВЛЕННОЙ СПРЕЙ-ПИРОЛИЗОМ

В.Е. Полковников¹, С.И. Рембеза²

¹Магистр, polkovnikov.vova.net@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, rembeza@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В данной работе представлена технология изготовления металлооксидной пленки оксид меди (II) методом спрей-пиролиза. Рассмотрен на примере полученной пленки оксид меди (II) процесс изменения поверхностного сопротивления от времени отжига.

Ключевые слова: спрей-пиролиз, металлооксидные пленки, оксид меди (II), электрофизические параметры.

Полупроводниковые пленки оксида меди (II) р-типа [1] имеет выдающиеся газочувствительных, электропроводящие и оптические свойства, данный полупроводниковый материал можно получить различными методами: золь-гель, термовакуумное напыление, ВЧ-магнетронное распыление и др. Спрей-пиролиз позволяет получить CuO с небольшой шириной запрещенной зоны для этого материала 1,3 – 1,7 эВ[2].

Для создания пленки CuO р-типа проводимости был приготовлен раствор из $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ объемом 200мл, в качестве растворителя была использована дистиллированная вода. Данный раствор имел молярное содержание меди 0,1 моль/л перемешиваясь с помощью магнитной мешалки в течение 10 минут.

Полученный раствор наносился на нагретую до 300 °С подложку. Параметры нанесения были выбраны следующие: давление компрессора 1,5 бар, расстояние от источника аэрозоля (аэрографа) 80 см, расход раствора в минуту 7 мл/мин. Для поддержания температурного режима процесса через каждые 6 минут выдерживалась пауза длительностью 4 минуты.

Сразу после нанесения пленка была недостаточно кристаллизованной, о чем свидетельствует высокое поверхностное сопротивление 1,8 Мом/□ и данные рентгенофазового анализа на рис.1,2.

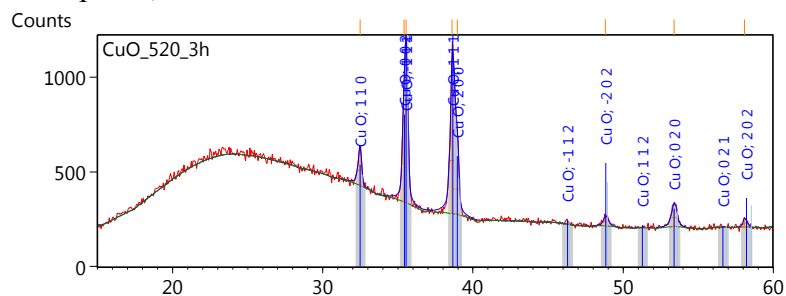


Рис.1 Рентгенофазовый анализ оксида меди (II) после отжига при 520 °С

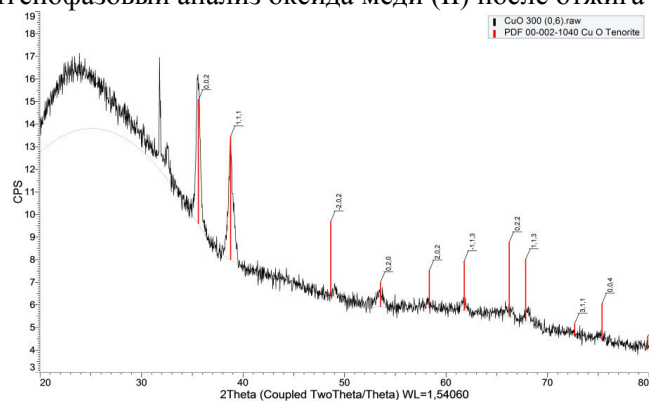


Рис.2 Рентгенофазовый анализ CuO сразу после нанесения при 300 °С

По высоте пиков отчетливо видно, что пленка оксида меди (II) после отжига при 520 °С имеет существенно более кристаллическую структуру, нежели пленка, нанесенная при 300 °С. Снижение поверхностного сопротивления и кристаллизация происходят после отжига при 520 °С. Конечное сопротивление после отжига в течение 2 часов составило 389 Ком/□, как видно из зависимости изменения сопротивления от времени изотермической отжиг не имеет смысла проводить спустя 33 минуты. На рис.3 показана зависимость снижения поверхностного сопротивления от времени отжига при 520 °С.



Рис.3 Снижения поверхностного сопротивления от времени отжига

Литература

1. Yang Y. Cu₂O/CuO Bilayered Composite as a High-Efficiency Photocathode for Photoelectrochemical Hydrogen Evolution Reaction / Y. Yang, D. Xu // *S-scientific Reports*. – 2016. - V. 6: 35158.
2. Chafi F. Z. Characterization techniques of Fe-doped CuO thin films deposited by the Spray Pyrolysis method/ F. Z. Chafi , L. Bahmad , N. Hassanain , B. Fares , L. Laanab, A. Mzerd // *Faculty of Science- BP. 1014- Av. Ibn Batouta Rabat, Morocco* – Jul 2018.

УДК 537.9

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЪЕМНЫХ ОБРАЗЦОВ PbTe

В.В. Бавыкин¹, Ю.Е. Калинин²

¹Аспирант, threeroad@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, kalinin48@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В данной работе представлена технология изготовления среднетемпературного термоэлектрического материала PbTe, изучено влияние температуры отжига на его термоэлектрические свойства.

Ключевые слова: прямое сплавление исходных компонентов, термоэлектрическая добротность.

В настоящее время, когда все больше увеличивается потребность в автономных альтернативных источниках энергии, повышение эффективности термоэлектрических материалов является первостепенной задачей. Легированные материалы на основе теллурида свинца применяются для прямого преобразования тепловой энергии в электрическую в термогенераторах, работающих при температурах от 500 до 900 К. Повышение термоэлектрической эффективности этих материалов возможно за счет усложнения состава, а также оптимизации технологических процессов изготовления брикетов: температуры синтеза, размера фракций, давления прессования, температур отжига и др. Учитывая вышесказанное, целью данной работы являлось исследование влияния термической обработки на термоэлектрические свойства объемных образцов PbTe. В качестве легирующей добавки применяли 0,023 масс.% PbI₂.

Загрузку ампулы делали в следующей последовательности: первым загружали свинец, затем легирующую добавку PbI₂, и последним — теллур. Ампулу откачивали до давления $3,5 \times 10^{-3}$ Па и запаяли. Синтез теллурида свинца проводили прямым сплавлением исходных компонентов (свинец марки С1С и теллур марки Т-сЧ), взятых в стехиометрической пропорции при температуре 1270 К.

В предварительно нагретую до 900 К печь помещали ампулу с загруженным материалом. Затем включали нагрев до 1270 К. При выходе печи на заданную температуру осуществляли синтез в течение 65 минут, осуществляя качание печи в течение 3 ми-

нуты через каждые 10 минут выдержки. Затем ампулу с расплавом извлекали и проводили быстрое охлаждение, погружая часть ампулы в воду.

Полученный слиток дробили и просеивали через сито. Верхний предел ячейки сита составлял 1 мм, нижний 0,064 мм. Прессование материала проводили в стальных пресс-формах с площадью основания $34 \times 18 \text{ мм}^2$ в две стадии: брикетирование на воздухе при давлении 3 т/см²; горячее прессование при температуре 700 К в вакууме при давлении 5 т/см² с выдержкой 10 минут.

Из брикета вырезали контрольный образец размером $10 \times 10 \times 2 \text{ мм}^3$. Теплопроводность образца исследовалась на установке Netzsch LFA 467, электрическую проводимость и коэффициент термо-ЭДС - на установке Netzsch SBA 458 в интервале температур 300 — 800 К. Затем образец подвергался термообработке в вакууме при температуре 850 К и временем выдержки 6 часов, после чего вновь передавался на испытания. На рисунке 1 приведены температурные зависимости безразмерной термоэлектрической добротности ZT соединения PbTe, легированного иодом.

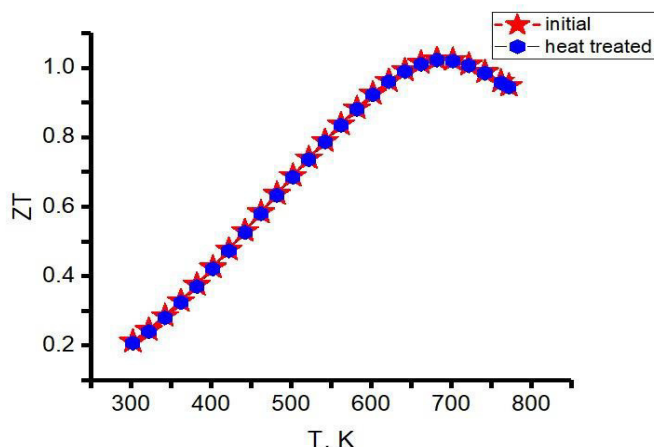


Рисунок. Температурные зависимости ZT термоэлектрического соединения PbTe, легированного иодом initial – исходный образец; heat treated – термообработанный при 850 К в течение 6 часов

Из рисунка видно, что отжиг при температуре 850 К в течение 6 часов практически не влияет на термоэлектрическую добротность материала, что свидетельствует о высокой термической устойчивости синтезированного термоэлектрического материала.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-48-360010).

УДК 004.942:681.586.2

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ ДИССИПАТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В ВОЛНОВЫХ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ ГИРОСКОПАХ

И. Л. Батаронов¹, Г. Е. Шунин², С. А. Кострюков³, В. В. Пешков⁴, С. В. Писарев⁵

¹Д-р физ.-мат. наук, профессор, vmfmm@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., vmfmm@mail.ru

³Канд. техн. наук, доцент, vmfmm@mail.ru

⁴Канд. техн. наук, доцент, vmfmm@mail.ru

⁵Аспирант, vmfmm@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Методом конечных элементов решена краевая задача на собственные значения уравнения колебаний цилиндрического резонатора с пьезоэлементами волнового твердотельного гироскопа с учётом диссипативных процессов в его конструктивных элементах. Определена перенормировка спектра собственных частот и добротность резонатора на этих частотах.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, пьезоэлементы, конечно-элементный анализ, собственные частоты, добротность.

Для разработки оптимизированных конструкций волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) с металлическими резонаторами, использующих пьезоэлементы для раскочки и съёма сигнала, необходим расчёт влияния диссипативных процессов в чувствительных элементах ВТГ на его метрологические параметры [1]. Так, например, в работе [2] методом конечных элементов были рассчитаны термоупругие потери в цилиндрических резонаторах ВТГ, изготовленных из различных материалов.

Основной целью данной работы является конечно-элементное моделирование влияния вязких потерь в конструктивных материалах ВТГ на спектр собственных частот и добротность его резонатора с учётом пьезоэлементов.

В качестве прототипа для вычислительных экспериментов была взята упрощённая конструктивная схема одного из вариантов ВТГ, выпускаемых фирмой Innalabs (Ireland) [3].

Предполагалось, что металлические детали ВТГ изготовлены из элинварных сплавов, а пьезоэлементы из PZT керамики. При расчётах использовались типичные значения физических параметров этих материалов.

Для определения спектра собственных частот (резонансных и антирезонансных) и добротности резонатора на этих частотах решалась краевая задача для уравнений электроупругости кусочно-неоднородной сплошной среды с вязкостью [4]. На поверхности донной части основания датчика ВТГ задавалось граничное условие жёсткого закрепления, а остальные поверхности считались свободными. Резонансные частоты определялись при заданном нулевом потенциале на всех металлизированных гранях пьезоэлементов, а антирезонансные частоты находились при заданном нулевом потенциале только на гранях, контактирующих с резонатором, тогда как на остальных металлизированных гранях задавались условия постоянства потенциала.

Решена также смешанная краевая задача электроупругости и получена временная зависимость амплитуды генерируемого электрического потенциала на электродах пьезоэлементов. Определено минимально необходимое время раскочки резонатора для выхода на рабочий режим.

Для решения поставленных краевых задач и расчёта локальных и интегральных характеристик использовалась интегрированная система компьютерного моделирования физико-механических процессов в ВТГ [5].

Литература

1. Развитие теории создания волновых твердотельных гироскопов с металлическим резонатором / В. А. Матвеев, М. А. Басараб, Б. С. Лунин и др. // Вестник Российского фонда фундаментальных исследований. – 2015. – № 3 (87). – С. 84-96.
2. Термоупругие потери в конструкционных материалах резонаторов волновых твердотельных гироскопов / Б. С. Лунин, А. В. Юрин, М. А. Басараб и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». – 2015. – № 2. – С. 28-39.
3. A Set of High Accuracy Low Cost Metallic Resonator CVG / V. V. Chikovani, I. M. Okon, A. S. Varabashov, P. Tewksbury // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008, Monterey, CA, May 2008, pp. 238-243.
4. Наседкин, А. В. Конечно-элементное моделирование связанных задач / А. В. Наседкин, А. А. Наседкина. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. – 178 с.
5. Система компьютерного моделирования физико-механических процессов в волновом твердотельном гироскопе / И. Л. Батаронов, Г. Е. Шунин, С. А. Кострюков и др. // Физико-математическое моделирование систем: материалы XIX междунар. семинара. Воронеж: ВГТУ, 2018. С. 162-166.

ТРАНСПОРТНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКОЙ ВОДЫ В ТЕРМИНАХ ИОН-МОЛЕКУЛЯРНОЙ МОДЕЛИ

А.А. Васин¹, А.А. Волков², А.А. Волков³

¹Аспирант, alexcampeones@yandex.ru

²Канд. физ.-мат. наук, alex@inty.pro

³Д-р физ.-мат. наук, профессор, aavol@bk.ru

Институт общей физики РАН имени А.М. Прохорова, Москва

Транспортные свойства жидкой воды - коэффициент самодиффузии D , вязкость η и теплопроводность θ рассчитываются в рамках единого подхода из анализа спектра диэлектрической дебаевской релаксации. Демонстрируется совпадение расчётных D , η и θ с экспериментальными данными в широком интервале температур.

Ключевые слова: вода, самодиффузия, вязкость, теплопроводность, диэлектрическая проницаемость, дебаевская релаксация.

Несмотря на жизненную важность воды и большой объём накопленных данных по ее физико-химическим свойствам [1], удовлетворительного понимания атомно-молекулярного устройства воды сегодня нет. Это касается и транспортных свойств — самодиффузии D , вязкости η и теплопроводности Θ . Современные представления формируются под впечатлением компьютерных моделирований [2].

В работах [3, 4] нами предложена ион-молекулярная модель воды, предоставляющая возможность аналитически анализировать связи между микро- и макропараметрами. Мы использовали тот факт, что сложные атомно-молекулярные процессы в воде передаются в диэлектрических спектрах простой релаксационной формой с единственным временем релаксации τ_D [5]. Давно актуален вопрос: какому простому микроскопическому процессу такая простая релаксационная формула отвечает? Наша модель искомый механизм предлагает. Она трактует дебаевскую релаксацию как отклик диффузионного движения частицы массой m с зарядом q под действием поля E в параболическом потенциале взаимодействия с соседями. Что важно, модель предполагает взаимопревращение составляющих воду частиц – молекул H_2O и ионов H_3O^+ и OH^- .

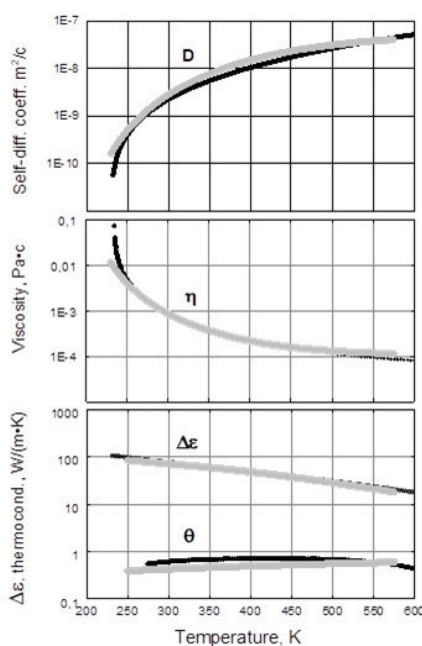


Рисунок. Температурные зависимости коэффициентов диффузии D , вязкости η , диэлектрического вклада $\Delta\epsilon$ и теплопроводности Θ жидкой воды. Черные линии – эксперимент [1], серые линии – расчёт. Использован *единый* для всех кривых подгоночный параметр

$$Ni = 2 \cdot 10^{27} \text{ м}^{-3}$$

В настоящем сообщении демонстрируется пример совместного описания электродинамических и транспортных параметров жидкой воды в рамках предлагаемой ион-молекулярной модели. Температурные зависимости коэффициентов диффузии D , вязкости η , теплопроводности Θ и диэлектрического вклада $\Delta\epsilon$ представляются в аналитическом выражении через концентрацию N_i короткоживущих ионов.

Ион-молекулярная модель противоречит общепринятым представлениям, но непротиворечива и последовательна. Её возможности в описании свойств воды по охвату параметров превосходит любые другие, нам известные [2].

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ-19-02-00446 А.

Литература

1. IAPWS Releases, Supplementary Releases, Guidelines, and Advisory Notes. <http://www.iapws.org/release.html>.
2. Vega C. and Abascal J. L. F. Simulating water with rigid non-polarizable models: a general perspective // *Phys. Chem. Chem. Phys.* – 2011. - V. 13. - №. 44. - P. 19643–20022.
3. Volkov A.A., Artemov V.G., Pronin A.V. A radically new suggestion about the electro-dynamics of water: Can the pH index and the Debye relaxation be of a common origin? // *EPL.* – 2014. - V. 106. - P. 46004-1-6.
4. Volkov A.A., Artemov V.G., Volkov A.A. jr ., Sysoev N.N. Possible mechanism of molecular motion in liquid water from dielectric spectroscopy data // *J. Mol. Liq.* – 2017. - V. 248. - P. 564–568.
5. Hippel A. The Dielectric Relaxation Spectra of Water, Ice, and Aqueous Solutions // *IEEE Trans. on Electr. Insulation.* – 1988. - V. 5. - №. 23. - P. 801–840.

UDC 621.383.415

OPTICAL AND ELECTRIC PHENOMENA IN AMORPHIC FILMS OF GeS DOPED REE

A.S. Alekperov¹, O.M.Gasanov², Kh.A. Adgezalova³, Dzh.I.Huseynov⁴

¹D-r fiz.-mat. Sciences, Associate Professor, aydin60@inbox.ru;

²Candidate phys.-mat. Sciences, Associate Professor, 1959oktay@mail.ru;

³ Candidate phys.-mat. Sciences, Associate Professor, xatirafizik@mail.ru;

⁴D-r fiz.-mat. Sciences, Associate Professor, cih_58@mail.ru ,

Azerbaijan State Pedagogical University

Thin-film amorphous films are widely and successfully used in information recording and display systems, solar energy, sensor technology, etc. One of the promising areas for further expanding the capabilities of this new class of semiconductors is the creation on their basis of “nano-crystalline media”, which are compositions of a large number of “crystals” of nano-meter dimensions that form in the amorphous matrix at the initial stages of the crystallization process developing in it. The resulting nano-crystals are inherently atomic clusters that form not in the crystal lattice, but in an amorphous medium.

Keywords: amorphous films, atomic clusters, germanium monosulfide.

The purpose of this work was to study the effect of Nd atoms on the optical and electrical properties of amorphous germanium monosulfide films obtained by thermal spraying. The absorption spectrum was studied in the region of the absorption threshold, as well as the temperature dependence of the electrical conductivity of amorphous GeS and $\text{Ge}_{1-x}\text{Nd}_x\text{S}$ films ($x = 0.005; 0.01$). It has been established that during thermal spraying a homogeneous solid solution of Nd in GeS is not formed. Addition of Nd causes a tendency to clustering Nd-rich regions in the GeS matrix.

All measurements were performed on samples with a diameter of 10 mm. Ohmic contacts were created by soldering silver acid. Optical measurements were carried out on a set-up

assembled base of the aperture monochromator MDR-2. X-ray phase analysis was performed on a D8 ADVANCE diffractometer.

Thermo-optical phenomena are observed in $\text{Ge}_{1-x}\text{Nd}_x\text{S}$ thin films, their role is enhanced with increasing Nd concentration. As the Nd content increases, the conductivity of the films increases, which leads to their Joule heating in an electric field, which causes thermal switching. However, based on the obtained data, it can be argued that the addition of Nd leads to the appearance of new states associated with clusters in the band gap. The same states are responsible for the “shoulder” observed in optical absorption.

Along with the effect on the optical properties, the Nd impurity has a great influence on the electrical properties of thermally deposited $\text{Ge}_{1-x}\text{Nd}_x\text{S}$ films. It was found that the effect of Nd atoms on the physical properties of thin films is greatly enhanced by thermal annealing.

Measurements were carried out both when heated to a temperature close to the softening temperature T_d , and during cooling. For amorphous films, the only values of activation energy for this technology of 0.75 eV films were given.

Thus, experiments conducted by us with thin amorphous films, thermal evaporation confirm:

1. Impurity atoms of rare earth elements (in this case, Nd) contribute to the formation of clusters in the amorphous matrix of germanium monosulfide.

2. Formed nanocrystals in an amorphous matrix lead to the appearance of new states in the band gap.

3. With an increase in the Nd content, the anisotropy of thin films decreases.

4. With an increase in the concentration of impurity atoms Nd, the conductivity of the films increases, which leads to heating, and ultimately to thermal switching thin film.

5. The amorphous GeS matrix provides “comfortable” conditions for the formation of practically non-stressed clusters, where these amorphous films are widely used in systems for recording and displaying information.

Referenses

1. Milvidsky M.T., Chaldyshev V.V. Nanoscale atomic clusters in semiconductors - a new approach to the formation of material properties. // FTP. 1998. V.32. B.5. P.513-522.

2. Madatov R.S., Alekperov A.S., Magerramova J.A. The effect of some REEs (Nd, Sm, Gd) on the physicochemical properties of a GeS crystal. // Crystallography. 2015. T.60B.6.S.921-923.

3. Alekperov A.S., Mamedov I.M., Gasanov O.M. The effect of Nd atoms on the electro-physical properties of a layered single crystal GeS. // Radio Engineering. Ukrainian interdepartmental scientific and technical collection. Kharkov. 2014. B.178. P.59-63.

4. Alekperov A.S. Production of $\text{Ge}_{1-x}\text{Ln}_x\text{S}$ Monocrystals and Their Electrophysical and Photoelectrical Properties // Journal of Advances in Physics. 2015. V.10.№3.P. 2798-2801.

5. Madatov R.S., Alekperov A.S., Hasanov O.M. The effect of switching and memory in layered GeS crystals. // Applied Physics. 2015. №4. P.11-16.

UDC 537.9

ELECTRICAL RESISTIVITY AND SEEBECK COEFFICIENT OF THE COMPOSITES CONSISTING OF “ $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ (MATRIX) – SnSe (FILLER)”

M.N. Yaprntsev¹, A.E. Vasil'ev², O.N.Ivanov³, M.V. Zhezhu⁴

¹Cand. phys. and math. sci., yaprintsev@bsu.edu.ru

²Post graduate student, 748070@bsu.edu.ru

³Dr. phys. and math. sci., prof., ivanov.oleg@bsu.edu.ru

⁴Post graduate student, 1214239@bsu.edu.ru

Belgorod State University

Composites consisting of “ $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ (matrix) – SnSe (filler)” with various weight content of filler (0, 10 and 20 wt. %) were prepared by spark plasma sintering method. With increasing the filler content, ρ was decreasing, whereas S is decreasing. In spite of such ρ and S degrading, thermal conductivity of the composites developed can be assumed to be low enough to compensate this degrading, resulting in improving in the thermoelectric efficiency.

Keywords: thermoelectric composite, spark plasma sintering, electrical resistivity, Seebeck coefficient.

Actual problem of material science is developing new semiconductor materials with enhanced thermoelectric efficiency, which is characterizing by the thermoelectric figure-of-merit, ZT . Lower thermal conductivity and specific electrical resistivity and higher Seebeck coefficient should be at the same time combined for effective thermoelectric material to reach higher ZT value. These thermoelectric properties are intimately but adversely inter-dependent: optimizing one often degrades the others. Tin chalcogenides due to their layered structures have rather low lattice thermal conductivity and acceptable electronic properties, which makes it possible to consider them as ones of the most promising candidates among potential high-performance thermoelectrics. But, owing to poor mechanical and high anisotropy in physical properties, practical application of these compounds is sufficiently limited. However, tin chalcogenides can be applied as fillers with low thermal conductivity to prepare the composites based on conventional thermoelectrics (bismuth telluride and bismuth telluride based solid solutions with electron and hole conductivity). The aim of this work is (i) to prepare the composites consisting of “ $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ (matrix) – SnSe (filler)” with various weight ratios between the matrix and filler, and (ii) to trace the composition effect on the specific electrical resistivity and Seebeck coefficient.

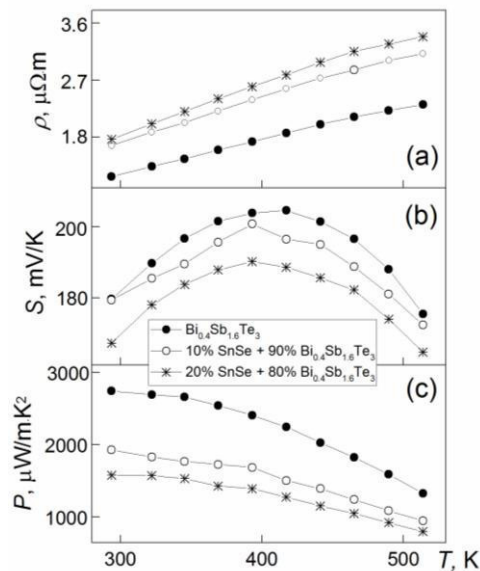


Figure. Temperature dependences of ρ , S and P for the composites with various compositions

Starting $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ and SnSe powders were used to prepare the composites corresponding to different contents of filler (0, 10 and 20 wt. %). Spark plasma sintering (SPS) method by using a SPS-25/10 system was applied to compact powder mixture at pressure of 40 MPa, temperature 620 K and sintering time of 5 min and, hence, prepare bulk samples. X-ray diffraction (XRD) analysis of the bulk samples was performed by a Rigaku Ultima IV diffractometer with $\text{CuK}\alpha$ – radiation. The specific electrical resistivity, ρ , and the Seebeck coefficient, S , were measured by using a ZEM-3 system. According to the XRD pattern, the bulk samples consist of individual $\text{Bi}_{0.4}\text{Sb}_{1.6}\text{Te}_3$ and SnSe subsystems, that is these samples are really composites. Besides, all the compositions were found to be highly textured. Due to this texturing, strong anisotropy in ρ and S , measured along directions parallel and perpendicular to the SPS-pressing direction, was found. These properties were found to be enhanced ones

for the parallel orientation. With increasing the filler content, ρ was decreasing, whereas S is decreasing within whole temperature range, presented in Fig. Naturally, power factor, P , defined as $P=S^2/\rho$ is naturally decreasing. ρ is gradually increasing with increasing in measuring temperature for all the compositions, that is characteristic of degenerate semiconductors. Maxima observed in the $S(T)$ curves are originated from a bipolar effect, when electrons and holes are simultaneously thermally generated in semiconductor due to intrinsic conductivity.

In spite of degrading in ρ and S in the composites developed, their thermal conductivity can be happened to be low enough to compensate this degrading, and, hence, to result in improving in the thermoelectric efficiency. The thermal conductivity measurements are in progress now.

References

1. Sassi S. Transport properties of polycrystalline *p*-type SnSe / S. Sassi, C. Candolfi, J. B. Vaney, V. Ohorodniichuk, P. Masschelein, A. Dauscher, B. Lenoir // Mater. Today Proc. – 2015. V. 2. P. 690–698.

УДК 537.9

СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЁНОК ДИРАКОВСКОГО ПОЛУМЕТАЛЛА Cd_3As_2

В.С.Захвалинский¹, Е.А. Пилюк², С.В. Иванчихин³, А.В. Кочура⁴, Зо Хтет Аунг⁵

¹Д-р физ.-мат. наук, доцент, v_zaxval@mail.ru

²К-т физ.-мат. наук, доцент, pilyuk@yandex.ru

³Аспирант, seregious@yandex.ru

ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»

⁴К-т физ.-мат. наук, доцент, akochura@mail.ru

⁵Аспирант, zawh0898@gmail.com

ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет»

В данной работе представлена технология получения тонких плёнок Дираковского полуметалла Cd_3As_2 . Приведены результаты исследования тонких плёнок методами сканирующей электронной микроскопии, рамановской спектроскопии и дифракционного рентгеновского анализа. Показано, что полученные плёнки соответствуют стехиометрии Cd_3As_2 , являются сплошными и имеют гранулированный характер.

Ключевые слова: вч- магнетронное напыление, тонкие плёнки, Cd_3As_2 .

По результатам теоретических [1] и экспериментальных [2] исследований, было установлено, что Cd_3As_2 относится к особому классу топологических изоляторов - дираковским полуметаллам, в которых носители заряда - дираковские фермионы имеют нулевую эффективную массу и подчиняются релятивистским законам движения. Подобные системы рассматриваются как некий аналог трехмерного графена, а потому представляют значительный интерес, как с точки зрения фундаментальной науки, так и с точки зрения потенциальных приложений.

Нами для напыления пленок Cd_3As_2 был применен магнетронный метод, поскольку он отличается достаточно равномерным распылением различных атомов мишени и слабой зависимостью процесса роста пленки от разницы давления их паров. Кроме того, в имеющейся литературе нет сведений о получении пленок и структур на основе арсенида кадмия подобным методом.

В данной работе напыление тонких плёнок Cd_3As_2 проводилось в вакуумной системе ВН-2000, оснащенной приставкой ВЧ - магнетронного неактивного напыления.

Рентгенофазовый анализ (РФА) пленок был выполнен с помощью рентгеновского дифрактометра GBC ЕММА (излучение $Cu K\alpha$, $\lambda = 1.5401 \text{ \AA}$) при комнатной температуре.

Для исследования структуры образцов, их состава и распределения элементов на поверхности использовался сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) JSM-6610LV

(Jeol) с приставкой для энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) X-Max^N (Oxford Instruments). При съемке применялись детекторы вторичных и обратно рассеянных электронов.

Спектры комбинационного рассеяния света (КРС) исследуемых пленок были измерены при комнатной температуре с помощью конфокального спектрометра КРС OmegaScoreTM (AIST-NT Inc.) с длиной волны лазерного излучения 532 нм, мощностью 50 мВт и размером пятна сфокусированного света на поверхности образца около 500 нм. Спектральное разрешение прибора составляло 0.8 см⁻¹.

Параметры кристаллической решетки образцов и особенности напыления пленок приведены в таблице.

Таблица

Параметры кристаллической решетки пленок α -Cd₃As₂ и порошка исходной мишени

Номер образца	Описание	Параметры кристаллической решетки, Å		Область когерентности рентгеновского излучения L, нм
		<i>a</i>	<i>c</i>	
I	порошок мишени	12.62	25.38	-
II	пленка, подложка Si, нагрев подложки	12.69	25.38	31
III	пленка, подложка Si, отжиг	12.66	25.38	28
IV	пленка, подложка Si, без нагрева подложки, не отжигался,	12.77	25.58	-
V	пленка, подложка α -Al ₂ O ₃ , отжиг	12.59	25.38	35

Исследование колебаний кристаллической решетки с помощью спектров КРС в дальней ИК- области (Рис.) подтверждает, то, что пленки формируются из арсенида кадмия. Два широких пика с положением около 196 см⁻¹ и 247 см⁻¹, природа которых не связана с классическим механизмом неупругого рассеяния света часто используют для характеристики наноструктур, содержащих Cd₃As₂.

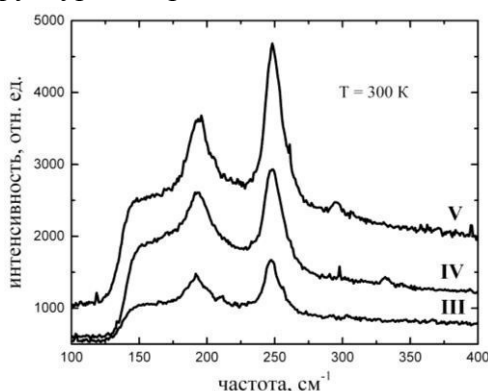


Рисунок. Спектры КРС тонких магнетронных пленок Cd₃As₂ (III - V).
Номера кривых соответствуют номерам образцов из таблицы

Работа выполнена при поддержке гранта министерства образования и науки №16.2814.2017/ПЧ.

Литература

1. Wang Z, Weng H, Wu Q, Dai X and Fang Z., 2013, Three dimensional Dirac semimetal and quantum transport in Cd₃As₂, *Phys. Rev. B* 88, 1254272. Lazaro A. Effects of interferences inUHF RFID systems / A. Lazaro, D. Girbau, R. Villarino // *Prog. Electromagn.Res.* -2009. - V. 98. - P. 425–443.
2. Borisenko S., Gibson Q., Evtushinsky D., Zabolotnyy V., Buchner B. and Cava R.J., 2014, Experimental realization of a three-dimensional Dirac semimetal, *Phys. Rev. Lett.*,V.113(2), p.027603.

А.В. Звягинцева¹, Ю.Н. Шалимов²¹Канд. техн. наук, доцент, zvygincevaav@mail.ru²Д-р техн. наук, профессор, shalimov_yn@mail.ru

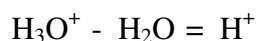
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Рассмотрены вопросы релаксации электролитов в электрохимической системе электрод – электролит в различных условиях электролиза. Показаны основные аспекты временной релаксации электролитов различного химического состава, а именно электролитов хромирования на основе сульфата хрома и электролитов никелирования на основе сульфата никеля с безуглеродной борсодержащей добавкой класса полиэдрические бораты. Установлено, что временная релаксация определяется устойчивостью комплексов, образующих эти соединения.

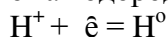
Ключевые слова: электрохимическая система, временная релаксация, электролиты хромирования и никелирования.

Работа связана с возможностью хранения водорода в электролитических металлах и сплавах, полученных из электролитов на основе хрома и никеля. Экспериментальными результатами установлено, что в электролитах хромирования временная релаксация на 1-1,5 порядка превосходит временную релаксацию в электролитах никелирования. В работах Постникова В.С. [1] было установлено, что временная релаксация в электролите сульфата никеля (0,5 М NiSO₄) лежит в диапазоне $\sim 10^{-4}$ сек, а в электролите хромирования на основе Cr₂(SO₄)₃ $\sim 10^{-2}$ сек.

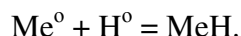
Сложность исследования процесса заключается в том, что на катоде при формировании металлгидридов в качестве элементов накопления водородного топлива, именно эти элементы дают возможность аккумулировать водород в количествах необходимых для практического использования в системах хранения водорода. Основная сложность этих систем состоит в том, что на катоде протекают параллельные реакции, в результате одной из них образуется структура металлической фазы с одновременным протеканием процесса образования атома водорода, именно для электролитических металлов и сплавов. Нами установлено [2], что вероятность образования металлгидридов осуществляется по дефектам структуры, а их формирование в свою очередь является основной задачей определяющей емкость водородного накопителя. Итак, время релаксации фактически будет зависеть от суммарного времени элементарного акта и в общем случае можно сказать, что при преобразовании металлической фазы на катоде длительность процесса будет зависеть от устойчивости комплексного соединения того или иного элемента в электролите. С другой стороны, зависит от вероятности протекания реакции образования гидрида при атомной структуре металла со свободным атомом водорода. Итак, первая задача, которая обуславливает объем емкости по водороду, состоит в формировании дефектов в структуре металлов, в качестве дефектов могут выступать границы зерен, выход дислокаций на поверхность, участки электрода с различной степенью механических напряжений, например за счет воздействия ультразвукового поля большей интенсивности на поверхности электрода. В условиях кавитации высокие давления в системе или разряжения возникают механические напряжения, которые играют роль дефектов структуры. Вторая задача, которая стоит перед исследователями это определение устойчивости дефектов при воздействии определенной температуры во время температурного разложения металлгидрида и хотя температуры разложения гидридов Ni и Cr близки ~ 150 °С (за счет разрыва водородной связи Ni-H и Cr-H). Поэтому вопрос экстракции водорода является важным при изучении возможности использования накопителя в циклическом режиме: заряд – разряд. Режим зарядки осуществляется в водном растворе электролита при разрядке катиона гидроксония H₃O⁺ при его предварительной дегидратации в зоне двойного электрического слоя по схеме:



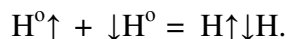
и последующего восстановления до атома водорода:



в структуре металлической фазы при присоединении к нему электрона с дальнейшим образованием гидрида:



Определить количество образующегося гидрида металла удается только опытным путем, ибо, кроме реакции образования металлогидрида протекает реакция образования молекулярного водорода:



Количество образующегося молекулярного водорода зависит от целого ряда факторов, одним из которых - это выход по току водорода, который можно определить экспериментально, что касается специфики устойчивости определенных комплексов, то по результатам наших исследований [3] было установлено, что устойчивость комплексов Cr(III) превосходит устойчивость комплексов Ni(II).

Таким образом, временная релаксация в электрохимических системах определяется в основном устойчивостью комплексных соединений металлов, но также необходимо учитывать время релаксации второго компонента водорода. Однако, как правило, в рассматриваемых электролитах время релаксации определяется элементарным актом для катиона металла Me^{n+} .

Литература

1. Постников В.С. Внутренне трение в металлах. 2-е изд. М.: Металлургия, 1974. - 352 с.
2. Zvyagintseva, A.V. On the Stability of Defects in the Structure of Electrochemical Coatings /A.V. Zvyagintseva, Yu.N. Shalimov //Surface Engineering and Applied Electrochemistry. - 2014. - Vol. 50. - No. 6. - PP. 466–477.
3. Фаличева А.И., Бурдыкина Р.И. Электроосаждение хромовых покрытий из электролитов, содержащих соединения трехвалентного хрома // Гальванотехника и обработка поверхности. 1997. Т. 5. № 1. С. 15-16.

УДК 544.6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОРОДНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МЕТАЛЛОВ С УЧЕТОМ ПОЛЕЙ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

А.В. Звягинцева

Канд. техн. наук, доцент, zvygincevaav@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе показан процесс создания физико-математической модели водородной проницаемости электрохимических сплавов, синтезированных методом электролиза, в зависимости от уровня, знака и характера распределения внутренних напряжений. На основании исследования диффузионных процессов атомов водорода через цилиндрическую оболочку металлов получена упрощенная математическая модель, которая позволяет получить приемлемые аналитические соотношения при переходе от свободной диффузии атомов водорода в металлах и сплавах к диффузионному процессу в среде с образованием и распадом неподвижных комплексов.

Ключевые слова: электрохимическая система, внутренние напряжения, диффузия, водородная проницаемость.

В континуальном приближении каждому структурному несовершенству можно поставить в соответствие упругую модель [1, 2]. Это позволит использовать хорошо разработанные методы математической физики для решения диффузионных задач с

учетом полей внутренних напряжений.

В настоящей работе при описании диффузии водорода в металлах с примесными ловушками (дефектами) используется следующий подход, более подробно в [1, 2]. При описании диффузионных процессов в металлах, полученных электрохимическим способом и образующих, например, такой систему как Ni–В–Н, бор представляется, как примесная ловушка малого атомного радиуса [2, 3]. Включение атома бора в никель электрохимическим методом обуславливает структурные изменения в металле и, как следствие, - возникновение структурных ловушек.

Диффузия атомов водорода через цилиндрическую оболочку с примесными ловушками описывается нестационарным уравнением при соответствующих начальном и граничном условиях. Упрощенная математическая модель позволяет получить приемлемые аналитические соотношения при переходе от свободной диффузии атомов водорода к диффузионному процессу с образованием и распадом неподвижных комплексов, например, таких, как никель-бор-водород. Диффузия атомов водорода через цилиндрическую оболочку с примесными ловушками (дефектами) при соответствующих начальном и граничном условиях описывается нестационарным уравнением [2]:

$$\frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial t} = \Delta c - \alpha K_1 (1 - K_2) c_1 c, \quad r_0 < r < R, \quad (1)$$

$$c(r, 0) = c_0, \quad c(r_0, t) = 0, \quad c(R, t) = 0,$$

где D – коэффициент диффузии атомов водорода, c_1 – доля примесей замещения малого атомного радиуса (примесных ловушек) по отношению к атомам основного металла, r_0 и R – внутренний и внешний радиусы цилиндрической оболочки, c_0 – исходная концентрация атомов водорода c в момент $t = 0$, α – коэффициент эффективности образования комплексов, K_1 и K_2 – коэффициенты для характеристики вероятности образования и распада комплексов, определяемые множителями:

$$\exp\left(-\frac{E_d}{kT}\right) \text{ и } \exp\left(-\frac{E_t}{kT}\right),$$

где E_d и E_t – энергии активации атома водорода, соответственно, для свободной диффузии и в дефекте.

Решение уравнения для концентрации атомов водорода находим в виде:

$$c(r, t) = \varphi(r, t) \exp[-K_1 \alpha (1 - K_2) D c_1 t],$$

Решение соответствующей задачи при наличии примесных ловушек сводится к введению экспоненциального множителя:

$$\exp[-\alpha K_1 (1 - K_2) D c_1 t] \quad (3)$$

В общем случае выражение (3) определяет отношение концентрации атомов водорода в среде с ловушками $c(r, t)$ к подобной величине при свободной диффузии $\varphi(r, t)$:

$$\frac{c(r, t)}{\varphi(r, t)} = \exp[-\alpha K_1 (1 - K_2) D c_1 t] \quad (5)$$

Если $K_1 = 0$ (комплексы не образуются), то $\frac{c(r, t)}{\varphi(r, t)} = 1$. Для $K_2 = 1$ (комплексы моментально распадаются) получаем зависимость, показывающую, что атомы водорода не задерживаются в ловушках. При других условиях ($K_1 \neq 0$ и $K_2 \neq 1$) замедление диффузионной кинетики зависит от доли ловушек c_1 , коэффициента диффузии атомов водорода и времени (D, c_1, t).

Таким образом, структурные и примесные ловушки уменьшают водородную проницаемость металла.

Литература

1. Власов Н.М., Звягинцева А.В. Математическое моделирование водородной проницаемости металлов / Монография. Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2012. - 247 с.
2. Звягинцева А.В. Структурные и примесные ловушки для точечных дефектов / Монография. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 180 с.
3. Fakioglu E., Yurum Y., Veziroglu (2004) T. A review of hydrogen systems based on boron and its compounds. Int. J. HydrogenEnergy, 29, pp. 1371-1376.

УДК 53.093

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ РЕЛАКСАЦИИ ПРИРОДНОГО БИОПОЛИМЕРА ПРИ ПЕРЕПАДЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

Н.С. Камалова¹, Н.Н. Матвеев², Н.Ю. Евсикова³, В.И. Лисицын⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, rc@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, nmtv@vgtu.vrn.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, natalyaevsikova@mail.ru

⁴Канд. физ.-мат. наук, профессор, viktor-lisicyn@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет»

Анализ приведенных в работе результатов суточной динамики разности потенциалов, возникающей в стволах древесных растений при перепадах температуры окружающей среды, показывает, что релаксация в древесине ствола живого дерева носит пороговый характер и характеризуется практически неизменной во времени относительной разностью потенциалов.

Ключевые слова: поток ионов солей, разность потенциалов, электроизмерительные приборы.

Интерес к исследованиям отклика пористых биополимерных композитов на воздействие внешних физических факторов вызван стремлением разработать технологию неразрушающего мониторинга состояния комплексных систем органического происхождения с контролируемой точностью. Отсутствие таких методов является главной причиной затруднений, возникающих при исследованиях сложных полимерных систем естественного происхождения, примером которых служит древесина [1, 2].

В данной работе представлены результаты наблюдения динамики относительной температуры окружающей среды (T/T_{\max} , где T_{\max} – максимальное значение температуры за время наблюдения) и относительной разности потенциалов (U/U_{\max} , где U_{\max} – максимальная величина разности потенциалов за время наблюдения), измеренной в деревьях разного жизненного состояния (см. рис.) [1]. Анализ приведенных результатов показывает, что релаксация в древесине ствола живых деревьев носит пороговый характер и отличается практически неизменной во времени относительной разностью потенциалов, это позволяет в омическом приближении сделать предположение о том, что скорость относительного изменения потока ионов солей dJ/Jdt зависит от величины самого потока J . В первом приближении с учетом данных эксперимента эту зависимость можно моделировать, как линейную:

$$\frac{dJ}{Jdt} = \chi - \beta J, \quad (1)$$

где β – коэффициент, характеризующий вызванное изменением J изменение скорости χ относительного изменения потока. Решение дифференциального уравнения (1) находится аналитически:

$$\frac{J}{J_0} = \frac{e^{\chi t}}{1 + \chi J_0 (e^{\chi t} - 1) / \beta}. \quad (2)$$

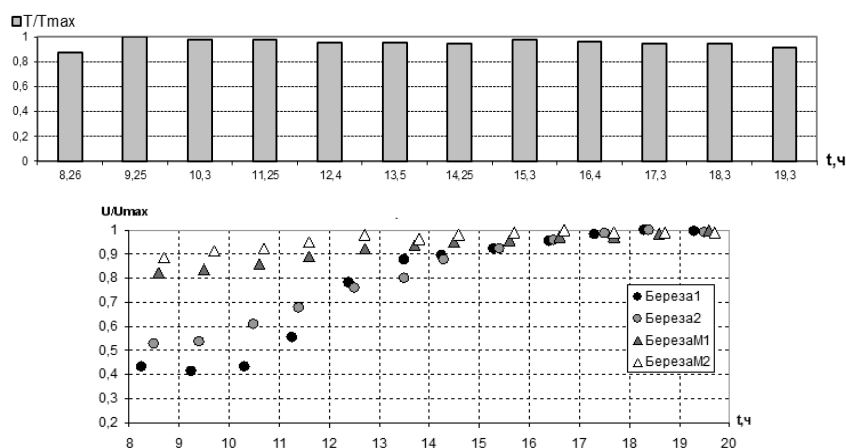


Рисунок. Суточная динамика относительной температуры окружающей среды (T/T_{max}) и относительной разности потенциалов (U/U_{max}), измеренной вдоль стволов живых (Береза 1 и Береза 2) и мертвых (Береза М1, Береза М2) деревьев между точками, расположенными на расстоянии $0,25R$ от оси ствола на высотах 1,3 и 3 м (где R – радиус ствола дерева на высоте 1,3 м)

Из (2) следует, что относительная разность потенциалов, вызванная направленным движением ионов минеральных солей, будет определяться соотношением:

$$\frac{U}{U_0} = \frac{e^{\chi t}}{1 + \beta J_0 (e^{\chi t} + 1) / \chi} \quad (3)$$

Полученные результаты позволяют предложить использовать отклик потока солей в порах древесины на изменение температуры окружающей среды в качестве принципа работы цифрового датчика для мониторинга состояния деревьев. Такой прибор станет незаменимым инструментом для исследования отклика биополимеров природного происхождения на воздействие внешних физических факторов с контролируемой точностью, что является актуальной задачей.

Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» на проект «Разработка фундаментальной концепции методов измерения термополяризационных электрических полей в стволах древесных растений».

Литература

1. Мониторинг распределения температуры при прогнозировании лесных пожаров / Н.Н. Матвеев, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова, В.И. Лисицын // Лесотехнический журнал. – 2015. – Т. 5. – № 4 (20). – С. 16-25.
2. Модель распределения неоднородного электрического поля термического происхождения по радиальной составляющей в стволе дерева / Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова, В.И. Лисицын, Н.Н. Матвеев, В.В. Постников, Н.А. Саврасова, В.В. Саушкин // Наука и образование на службе лесного комплекса (к 75-летию ВГЛТА): материалы Международной научно-практической конференции, Воронеж, 26-28 октября 2005 г./ Воронеж: ВГЛТА, 2005. – Т. 1. – С. 294-298.

УДК 537.9

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПОЛЯРИЗОВАННОСТИ ЛИНЕЙНОГО ПИРОЭЛЕКТРИКА В НЕОДНОРОДНОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ ПОЛЕ

Н.С.Камалова¹, Н.Н. Матвеев², Н.Ю. Евсикова³, Н.А. Саврасова⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, rc@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, nmtv@vglta.vrn.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, natalyaevsikova@mail.ru

⁴Канд. физ.-мат. наук, доцент, savrasova-nataly@mail.ru

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований изменения поляризованности полидиметилсилоксана с добавлением 0,5% метилвиниловых групп СКТВ-1 методом термограмм плотностей поляризационных токов в условиях неоднородного температурного поля. Результаты экспериментов убедительно свидетельствуют о том, что зависимость поляризованности линейных пироэлектриков в неоднородном температурном поле от температуры при фазовых переходах носит пороговый характер.

Ключевые слова: поляризованность, термограммы плотностей токов, кристаллизация, плавление.

Интерес к исследованиям ориентационной поляризованности линейных пироэлектриков при фазовых переходах в неоднородном температурном поле основан на устойчивом стремлении исследователей расширять спектр потенциальных источников энергии. Углубленное изучение преобразования тепловой энергии в электрическую позволяет расширить методы наблюдения за изменениями надмолекулярной структуры полимеров под влиянием внешних воздействий [1-3]. Поскольку надмолекулярная структура во многом определяет свойства полимеров, то подобные исследования могут стать основой для технологий получения материалов с заданными свойствами и являются актуальными.

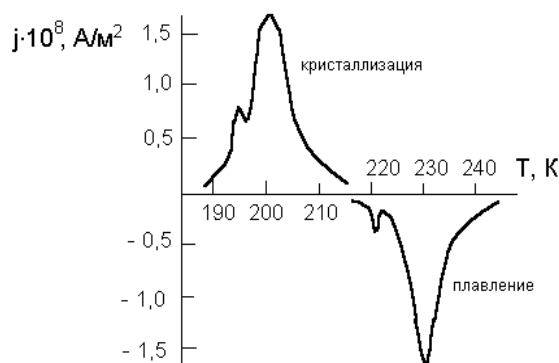


Рисунок. Термограммы плотностей поляризационных токов при кристаллизации и плавлении СКТВ-1 ($\nabla T = 7,7 \cdot 10^4$ К/м)

В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований изменения поляризованности СКТВ-1 методом термограмм плотностей поляризационных токов в условиях неоднородного температурного поля с градиентом $\nabla T = (10^4 \div 10^5)$ К/м [1]. Полученные термограммы поляризационных токов представлены на рис 1. Охлаждение образца со скоростью $(0,05 \pm 0,01)$ К/с при температурах ниже 213 К сопровождается появлением поляризационного тока, и кроме основного максимума при $T = 203$ К на зависимости $j(T)$ наблюдается еще один максимум при $T = 199$ К, отвечающий, по-видимому, за вторую стадию кристаллизации. При нагревании с той же скоростью закристаллизованного СКТВ-1 наблюдаются токи депольаризации, связанные с плавлением, причем дуплетность пика сохраняется (температуры, соответствующие основному и локальному максимумам, равны 230 и 222 К).

Дуплетность пика свидетельствует о двухстадийном процессе кристаллизации, что в свою очередь говорит о том, что зависимость поляризованности от температуры при фазовых переходах носит пороговый характер. Это позволяет выдвинуть предположение о том, что скорость относительного нарастания кристаллической фазы $dN/(Ndt)$ не является постоянной и зависит от количества образовавшихся кристаллитов:

$$\frac{dN}{Ndt} = \chi - \beta N \quad , \quad (1)$$

где χ и β – параметры кинетики изменения надмолекулярной структуры линейного пироэлектрика. Величина параметров зависит от особенностей структуры кристаллитов и их химического состава.

Таким образом, соотношение (1) может лечь в основу аксиоматики модели для вычислительного эксперимента по определению параметров кинетики надмолекулярной структуры линейных пироэлектриков по результатам экспериментальных зависимостей их поляризованности от температуры в неоднородном температурном поле.

Работа выполнена при поддержке гранта ФГБОУ ВО «ВГЛТУ» на проект «Разработка фундаментальной концепции методов измерения термополяризационных электрических полей в стволах древесных растений».

Литература

1. Polarization effect and crystallization PDMS, SKTV - 1 / N.N. Matveev // Proc. 9th Intern. Meet. On Ferroelectricity. – Seoul. Korea, 1997. – P. 133.
2. Матвеев Н.Н., Сидоркин А.С. Термополяризация кремнийорганических полимеров при переходах кристаллизация-плавление / Н.Н. Матвеев, А.С. Сидоркин // Физика твердого тела. – 2010. – Т. 36. – № 9. – С. 2791-2794.
3. Клиньских А.Ф., Матвеев Н.Н. Поляризационный эффект при кристаллизации полимерных пироэлектриков / А.Ф. Клиньских, Н.Н. Матвеев // Высокомолекулярные соединения. Серия Б. – 1995. – Т. 37. – № 2. – С. 320-323.

УДК 537.9

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ПОРАХ ПРИРОДНОЙ ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ ПОСЛЕ ОБРАБОТКИ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Н.С.Камалова¹, В.В. Постников², В.В.Саушкин³

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, rc@yandex.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, vvpost45@mail.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, vvs5@yandex.ru

«Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова»

Представлены результаты экспериментальных исследований релаксации структуры молекул CO₂ в порах природной гетероструктуры - древесина березы. Результаты эксперимента свидетельствуют об изменениях надмолекулярной структуры молекул CO₂ в порах гетероструктуры, носящих пороговый характер.

Ключевые слова: ИК-спектры древесины, полоса поглощения, волновое число.

Ранее были обнаружены эффекты воздействия слабого ($B \leq 0,5$ Тл) импульсного магнитного поля (ИМП) на физические свойства целого ряда диамагнитных материалов, в частности, гетероструктур природного происхождения [1,2].

В предлагаемой работе представлены результаты экспериментальных исследований релаксации структуры молекул CO₂ в порах тонких срезов древесины березы. Исследования проводились методом ИК-спектроскопии. Анализировались спектры пропускания ИК-излучения до воздействия ИМП, а также через 30с, 2,5 часа, 1 сутки и 1 неделю после воздействия.

Как видно из рисунка, до воздействия наблюдается двугорбая полоса в интервале волновых чисел 2360-2330 см⁻¹ (сплошная линия), которую относят к области колебаний диоксида углерода CO₂ [3]. Через 30 секунд после воздействия эта полоса исчезает (пунктирная линия). Дальнейшая выдержка обработанного образца в течение 2,5 часов сопровождается появлением ясно выраженной полосы поглощения в области 2350 см⁻¹. Относительная интенсивность полосы при этом увеличивается, а затем с те-

чением времени не меняется. Если же образец нагреть до 150°C в течение 30 с, то полоса поглощения исчезает (точечная линия), при этом двугорбая исходная полоса не восстанавливается.

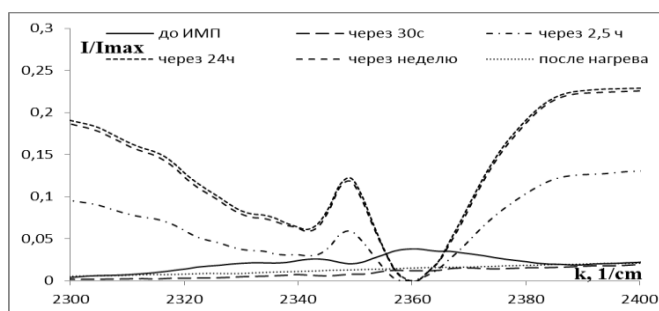


Рисунок. Сравнительные диаграммы ИК-спектров (относительной интенсивности полос поглощения) для образцов древесины березы в интервале частот, соответствующих основным колебаниям молекулы CO_2 ($k = 2300 - 2400 \text{ см}^{-1}$) до и после воздействия ИМП

Результаты эксперимента свидетельствуют об изменениях надмолекулярной структуры молекул CO_2 в порах гетероструктуры, причем следует отметить пороговый характер эффекта. Стимулированные ИМП-воздействием изменения могут быть связаны с парамагнитными свойствами атомов кислорода. В основе моделирования релаксации надмолекулярной структуры CO_2 , по-видимому, должно лежать предположение о возможности образования некоторой молекулярной упорядоченности молекул CO_2 после воздействия ИМП. Следует также заметить, что возникающие структуры достаточно стабильны и требуют теплового воздействия для своего разрушения.

Исследования проведены в рамках гранта, выделенного ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет» на проект «Разработка фундаментальной концепции методов измерения термополяризационных электрических полей в стволах древесных растений».

Литература

1. Постников В.В. Воздействие слабых магнитных полей на фазовые переходы I рода в кристаллизующихся полимерах [Текст] / В.В. Постников // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №3 (167). – С. 107-122.
2. Постников В.В. Физика процесса получения древесины с прочностью стали [Текст] / В.В. Постников, Н.С. Камалова // Лесотехнический журнал. – 2015. – Том 5. – № 1 (17). – С. 160-177.
3. Левдик И.Ю. Исследование химического состава, молекулярной и над-молекулярной структуры целлюлозных материалов методом ИК-спек-троскопии [Текст] / И.Ю. Левдик // Методы исследования целлюлозы. – Рига, 1981. – С. 32–43.

УДК 53.043:66.09

ОСОБЕННОСТИ РЕЛАКСАЦИОННО-КИНЕТИЧЕСКОГО ХАРАКТЕРА ВУЛКАНИЗАЦИИ СМЕСЕЙ КАУЧУКОВ

О.В. Карманова¹, С.Л. Подвальный², Ю.Ф. Шутилин³, С.Г. Тихомиров⁴, А.С. Лынова⁵

¹Д-р техн. наук, профессор, karolga@mail.ru

²Д-р техн. наук, профессор, spodvalny@yandex.ru

³Д-р техн. наук, профессор, shurf7@mail.ru

⁴Д-р техн. наук, профессор, tikhomirov_57@mail.ru

⁵Аспирант, annalinova@mail.ru

^{1,3-5}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

²ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Изучен процесс вулканизации смесей эластомеров, различающихся релаксационно-кинетическими характеристиками в присутствии действительных агентов вулканизации разного состава. Методом температурной релаксации оценено распределение серы между фазами каучуков, рассчитаны коэффициенты распределения серы между фазами. Установлено, что скорость связывания серы каучуками изменяется в ряду СКД>СКС-30>СКН-40=СКИ-3, что согласуется со скоростью релаксации макроцепей при вулканизации.

Ключевые слова: смеси каучуков, температура стеклования, вулканизация.

Особенности структуры и свойств смесей каучуков в целом обоснованы достаточно полно. Большинство из опубликованных материалов посвящено анализу фазовой структуры при переработке и эксплуатации [1-2], но при этом меньшее значение придавалось реальным процессам, происходящим при сшивании комбинаций эластомеров, особенно в присутствии различных вулканизирующих систем. Результаты этих исследований позволят получить дополнительные сведения о механизме вулканизации каучуков, который, как известно, осуществляется со значительным преобладанием вклада в процесс вулканизации релаксационных процессов [3].

Проведены исследования процессов, протекающих при вулканизации систем, состоящих из двух эластомеров, различающихся релаксационно-кинетическими характеристиками в присутствии действительных агентов вулканизации (ДАВ) разного состава. В Изучены структура и свойства резин на основе различных по химической природе и свойствам каучуков – полибутадиена марки СКД, полиизопрена марки СКИ-3, бутадиен-стирольного сополимера марки СКС-30АРКП [4]. В качестве полимера-посредника использовали бутадиен-нитрильный каучук марки СКН-40. Таким образом, исследовали смеси несовместимых каучуков СКН-40/СКД, СКН-40/СКС-30АРКП, СКН-40/СКИ-3. Для выявления различных механизмов вулканизации варьировали виды ускорителей вулканизации: дибензтиазолилдисульфид (ДБТД), 2-меркаптобензтиазол (МБТ), и их комбинации с дифенилгуанидином (ДФГ) и дозировки (от 1 до 5 мас.ч.) ускорителей при постоянном отношении «сера: ускоритель»= 2:1.

Методом температурной релаксации по изменению температуры стеклования в смесях каучуков оценено распределение серы между фазами. Разработана методика и проведена оценка коэффициентов распределения серы в фазах каучуков (табл.).

Установлено, что в интервале концентраций серы от 2 до 10 мас.ч. в вулканизатах наблюдалась следующая закономерность ее связывания каучуками: СКД>СКС-30>СКН-40=СКИ-3. Известно [4], что активность индивидуальных каучуков при вулканизации меняется следующим образом: СКИ-3>СКН-40>СКС-30>СКД, что не совпадает с вышеприведенными данными о связывании серы этими каучуками в их комбинациях. Однако в условиях вулканизации скорость релаксации цепей меняется в ряду СКИ 3<СКН-40<СКС-30<СКД [3], что совпадает со степенью присоединения серы к каучукам в их смесях.

Таблица

Коэффициенты распределения серы в вулканизатах смесей каучуков

Вулканизирующая группа	СКД/СКН-40	СКС-30/СКН-40	СКИ-3/СКН-40
2 мас. ч. серы + ДБТД	1,42	1,16	0,82
5 мас. ч. серы + ДБТД	2,42	1,63	0,86
10 мас. ч. серы + ДБТД	2,63	2,07	1,86
5 мас. ч. серы + (ДБТД/ДФГ=1/1)	2,10	1,63	0,82
5 мас. ч. серы + (ДБТД/ДФГ=3/1)	1,78	1,94	0,82
2 мас. ч. серы + МБТ	1,50	1,20	0,90
5 мас. ч. серы + МБТ	2,44	1,50	0,88
5 мас. ч. серы + (МБТ /ДФГ=1/1)	1,94	1,94	0,83
5 мас. ч. серы + (МБТ /ДФГ=3/1)	2,12	1,78	0,80
10 мас. ч. серы + МБТ	2,64	1,80	1,50

Время релаксации СКД намного меньше, чем СКИ-3 или СКН-40 при температурах вулканизации. При взаимодействии каучука с ДАВ скорость обмена цепей у поверхности ДАВ у СКД больше, чем у СКИ-3. Вследствие лучших (с данных позиций) релаксационно-кинетических характеристик СКД или СКС-30 присоединяют большее количество вулканизирующего агента.

Литература

1. Бартенев Г. М. Микроструктура полимерных цепей и релаксационные свойства полибутадиенов / Г. М. Бартенев, С. В. Баглюк, В. В. Тулинова // *Высокомолекул. соед.* - 1990. - Сер. А. - Т. 32. - № 7. - С. 1436 - 1443.
2. Milani G., Milani F. Quasi-analytical kinetic model for natural rubber and polybutadiene rubber blends // *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis.* - 2018. - V. 123. - № 2. - P.351–365.
3. Шутилин Ю.Ф. О релаксационно-кинетических особенностях структуры и свойств эластомеров и их смесей. // *Высокомолекул. соед.* - 1987. - Т.29А. - № 8. - С. 1614-1619.
4. Осошник И.А. Производство резиновых технических изделий / И.А. Осошник И.А., Ю.Ф. Шутилин, О.В. Карманова. Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., 2007. 972 с.

УДК 539.25+548.53

СТРУКТУРНЫЕ И СУБСТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ В ФОСФАТАХ КАЛЬЦИЯ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А.В. Костюченко

Канд. физ.-мат. наук, av-kostuchenko@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе исследованы структурные и субструктурные превращения в пленках фосфатов кальция (ФК) состава гидроксиапатита (ГА) в процессе выдержки в пучке быстрых электронов в колонне просвечивающего электронного микроскопа. Показан эффект электронного облучения аморфных пленок ФК, заключающийся в образовании кристаллических фаз ГА и трехкальциевого фосфата и формировании нанопористой структуры.

Ключевые слова: электронное облучение, гидроксиапатит, субструктура.

Процессы синтеза, структура и свойства керамических материалов на основе гидроксиапатита (ГА, $\text{Ca}_{10}(\text{PO})_4(\text{OH})_2$) для восстановления костных тканей в течение ряда десятилетий активно исследуются. В качестве наиболее чувствительного метода в исследовании субструктуры материалов используют просвечивающую электронную микроскопию (ПЭМ), не имеющую альтернативы вследствие ее предельно высокой разрешающей способности, возможности количественной оценки кристалличности строения, выявления вторых фаз и их пространственного распределения. При этом имеются сведения [1], что структура кристаллов ГА чувствительна к воздействию быстрых электронов. В связи с этим цель работы – выявление структурных превращений в пленках фосфатов кальция (ФК) состава ГА в процессе облучения быстрыми электронами.

Для исследования эффекта электронного облучения на ненагретом сколе NaCl в процессе высокочастотного магнетронного распыления мишени ГА были синтезированы тонкие 0,1 мкм пленки ФК. Исследование воздействия электронного облучения проводили *in situ* в колонне электронного микроскопа (Karl Zeiss Libra 2D) и электронографа (ЭГ-100М), выдерживая образцы пленки в сфокусированном пучке быстрых электронов (120 кэВ и 80 кэВ) от 2 до 45 мин.

Исходные пленки имели аморфную структуру (рис. 1а): на картине микродифракции наблюдаются только максимумы от решетки NaCl. Под воздействием электронного пучка наблюдается эволюция субструктуры, включающая следующие стадии: образование нанокристаллитов размером до 10 нм (рис. 1 б, с); образование и рост нанопор до 30 нм (рис. 1 d-f); миграция нанопор к периферии облучаемой области (рис.

g-i). Как следует из фазового контраста на ПЭМ-изображении (рис. 2), в пленке после облучения в течение 45 мин формируется нанокристаллическая субструктура с решеткой ГА. Также в пленке наблюдаются нанопоры, имеющие несквозной характер, о чем свидетельствует наблюдаемый в их пределах фазовый контраст от решетки ГА. Формирование пор можно объяснить испарением материала в процессе облучения пленки.

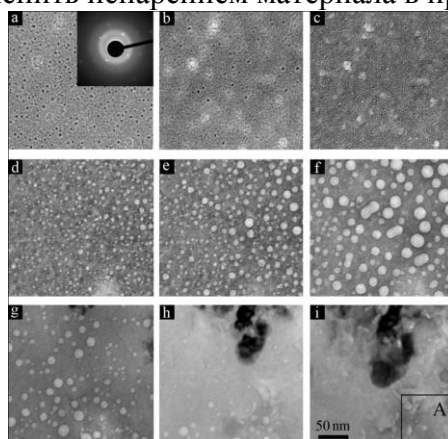


Рис. 1. ПЭМ изображения тонкой пленки ФК до (а) и после облучения пучком быстрых электронов (120 кэВ) в течение 2 (b), 4 (c), 10 (d), 14 (e), 20 (f), 30 (g), 35 (h) и 45 мин (i)

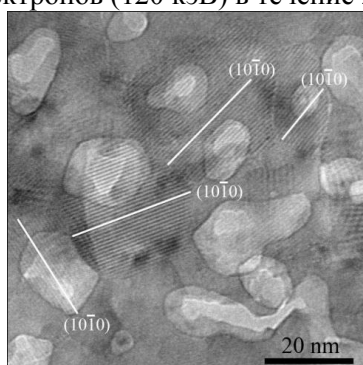


Рис. 2. ВРЭМ-изображение участка А пленки после облучения быстрыми электронами (120 кэВ) в течение 45 мин

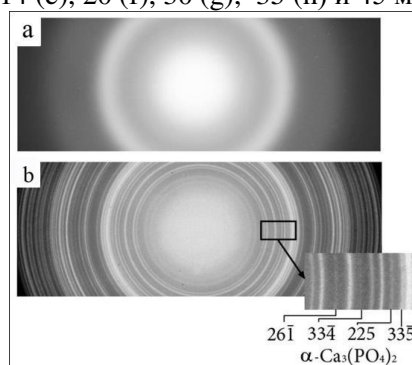


Рис. 3. Электронограммы исходной аморфной пленки ФК (а) и после (b) облучения быстрыми электронами (80 кэВ) в течение 10 мин

Как следует из электронограммы (рис. 3), после облучения ФК пленки в течение 10 мин. в колонне электронографа помимо фазы ГА происходит образование α -трикальциевого фосфата $\alpha\text{-Ca}_3(\text{PO}_4)_2$.

Литература

1. Eddisford P., Brown A., Brydson R. Identifying and quantifying the mechanism of electron beam induced damage and recovery in hydroxyapatite // Journal of Physics: Conference Series. – 2008.- V.126. – P.1-4.

УДК 532.135

ИЗМЕНЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОМОЛЕКУЛЯРНЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ПОСЛЕ ВЫСОКОИНТЕНСИВНОЙ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКИ

Д.И. Макарьев¹, А.Н. Резниченко², М.А. Луговая³, А.Н. Рыбняц⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, dmakarev@ Rambler.ru

²Научный сотрудник, reznichenkoan@yahoo.com

³Аспирант, lugovaya_maria@mail.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arubyanets@gmail.com

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

Проведены исследования влияния высокоинтенсивного ультразвукового воздействия на реологические характеристики высокомолекулярных углеводов. Представлены зависимости их изменения в зависимости от частоты в диапазоне от 15 до 87 кГц при постоянной интенсивности и длительности ультразвукового воздействия. Исследованы процессы релаксации кинематической вязкости данных веществ после ультразвуковой обработки.

Ключевые слова: ультразвук, нефть, кинематическая вязкость, релаксация.

Основная часть разведанных нефтяных запасов приходится на месторождения тяжелой нефти. Однако высокая вязкость [1] таких сортов нефти существенно затрудняет их добычу. Одним из способов уменьшения вязкости нефти и увеличения дебита скважин является силовое ультразвуковое воздействие. В отличие от других методов снижения вязкости, таких как нагрев пласта или применение химических растворителей, данный метод является менее энергозатратным и более экологичным. В качестве объекта исследования нами был разработан акустический фантом плотностью 0.93 г/см^3 , аналогичный по химическому составу, плотности и реологическим свойствам тяжелой нефти-93. В качестве источников ультразвукового воздействия была изготовлена линейка силовых излучателей на частоты 15.3 кГц, 23.6 кГц, 28.7 кГц, 36.3 кГц, 40 кГц, 63.5 кГц и 87.4 кГц. Мощность воздействия составила 20 Вт, длительность - 300 с. Объем образцов составлял 200 мл, исходная кинематическая вязкость - от 1230 до 1290 $\text{мм}^2/\text{с}$. В лаборатории, в которой проводились эксперименты, при помощи системы климат-контроля поддерживалась постоянная температура 25°C . Поскольку образцы нагревались в процессе УЗ-воздействия, что существенно влияло на их вязкость, измеренная кинематическая вязкость приводилась к вязкости при температуре 25°C .

График первых пяти часов после воздействия показан на рисунке. Из рисунка видно, что непосредственно после воздействия кинематическая вязкость образцов возрастает до 2500-9000 $\text{мм}^2/\text{с}$, затем в течение 2-3 часов релаксирует к значениям 1500-2000 $\text{мм}^2/\text{с}$, после чего стабилизируется. Также видно, что зависимость изменения кинематической вязкости от частоты ультразвукового воздействия в данном диапазоне частот носит немонотонный характер. Она имеет максимум при частотах 15-20 кГц, минимум при 40 кГц, затем вновь возрастает. Дальнейшие наблюдения за вязкостью показали, что в течение 10 суток после воздействия она не меняется или слабо возрастает (не более 10%)

Таким образом, был сделан вывод, что ультразвуковое воздействие на тяжелые сорта нефти с плотностью 0.93 г/см^3 немонотонно зависит от частоты этого воздействия и приводит к резкому повышению вязкости образцов. Это существенно отличает влияние такого же воздействия на высоковязкие нефтепродукты, такие как мазут М-100 и М-40 [2].

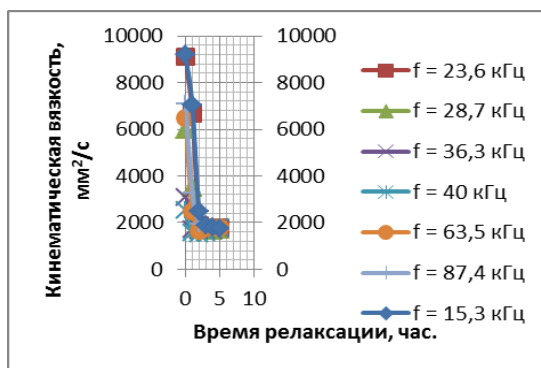


Рисунок. Общая зависимость от времени релаксации приведенной к 25°C кинематической вязкости образцов акустического фантома тяжелой нефти плотностью 0.93 г/см^3 после ультразвукового воздействия указанными на графике частотами и мощностью 20 Вт. Длительность воздействия 300 с. Первые часы после воздействия

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (базовая часть госзадания, тема № 12.5425.2017/8.9).

Литература

1. Галиуллин Э.А. Новые технологии переработки тяжелых нефтей и природных битумов / Э.А. Галиуллин, Р.З. Фахрутдинов // Вестник Технологического университета. - 2016. - Т. 19. - № 4.- С. 47-51.

2. Makarev D.I. Anomalous viscosity of high-molecular petroleum fractions in process of relaxation after high-intensity ultrasonic treatment / D.I. Makarev, A.N. Rybyanets, V.L. Sukhorukov // Indian Journal of Science and Technology. - 2016. -V. 9. - N 29. - P. 99457.

УДК 539.213

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНОЙ САМООРГАНИЗАЦИИ СПЛАВА Cu_8Zr_3

А.В. Миленин¹, В.В. Ожерельев², С.А. Дерипаско³

¹Канд. физ.-мат. наук, millennium@mail.ru

²Канд. физ.-мат. наук, ozher@mail.ru

³Студент, deripasko918@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В рамках метода молекулярной динамики на основе статистико-геометрического и кластерного анализа выполнено исследование эволюции атомной структуры интерметаллида Cu_8Zr_3 . Нагрев системы от 0 К до 1010 К со скоростью $3,33 \cdot 10^{11}$ К/с приводит к образованию сложного икосаэдрического кластера.

Ключевые слова: структурная самоорганизация, координационный многогранник, многогранник Вороного, икосаэдр, кластер.

Диаграмма состояния системы Cu-Zr достаточно сложна и до сих пор считается не до конца изученной [1]. Система образует несколько эвтектик и интерметаллидных соединений и известна своей высокой стеклообразующей способностью.

Ранее в работах [2, 3] были изложены представления о стекловании, как о процессе образования перколяционного кластера. Авторами работ [4-6] в рамках метода молекулярной динамики было показано, что в основе структурной перестройки расплава при стекловании чистых металлов и сплавов типа металл-металл лежит процесс образования перколяционного кластера из контактирующих и взаимопроникающих икосаэдров, доля которых в системе не превышает 14%.

Молекулярно-динамическая модель интерметаллида Cu_8Zr_3 , состоящая из 167580 атомов Cu и 62700 атомов Zr в основной ячейке без периодических граничных условий, строилась путем трансляции элементарной ячейки интерметаллида Cu_8Zr_3 с размерами $a = 7.868 \text{ \AA}$, $b = 8.146 \text{ \AA}$, $c = 9.977 \text{ \AA}$ пространственной группы $Pnma$ [7]. Исходный размер модели по осям составил $L_x = 149.48 \text{ \AA}$, $L_y = 148.66 \text{ \AA}$, $L_z = 148.09 \text{ \AA}$. Взаимодействие между атомами описывалось многочастичным потенциалом Финниса-Синклера [8].

Статистико-геометрический анализ исходной структуры на основе многогранников Вороного (МВ) установил наличие в системе икосаэдров (индекс МВ {0-0-12}) в количестве 26 % и топологически близких к икосаэдрам многогранников с индексом МВ {0-1-10-2} в количестве 34 %. В результате формируется кластер, состоящий из 55825 взаимопроникающих и контактирующих между собой икосаэдров (рис.). Данный кластер распределен по всему объему модели, его отдельные элементы представляют собой ориентированные в направлении (010) цепочки из взаимопроникающих икосаэдров, центрами которых являются атомы меди. Рассчитанные для всей системы функция радиального распределения атомов и угловая корреляционная функция свидетельству-

ют о наличии ближнего и дальнего порядка, характерного для кристаллической структуры.

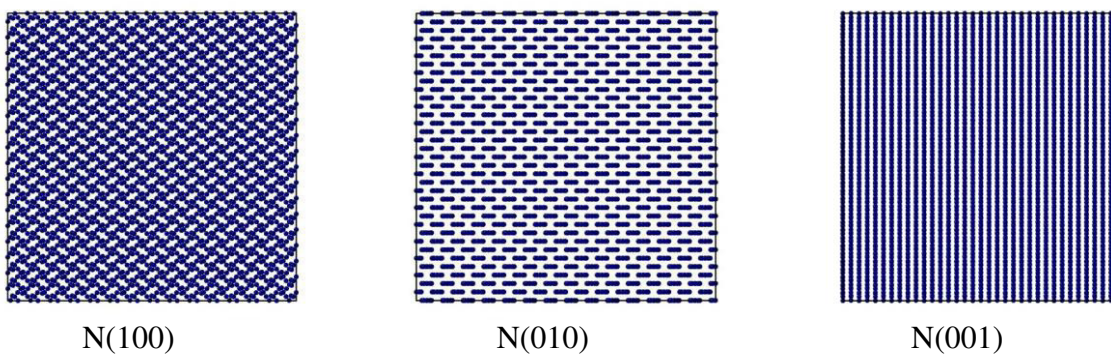


Рисунок. Кластер из взаимопроникающих и контактирующих между собой икосаэдров

Нагрев системы 0 К до 1000 К со скоростью $3,33 \cdot 10^{11}$ К/с приводит к росту числа икосаэдрических многогранников и образованию перколяционного кластера, состоящего из 39438 взаимопроникающих икосаэдра. В построении такого кластера задействовано $\sim 94\%$ атомов системы. Дальнейший нагрев приводит к разупорядочению системы и плавлению при температуре ~ 1700 К.

Литература

1. Okamoto H. Cu-Zr (Copper-Zirconium) // H. Okamoto / Journal of Phase Equilibria and Diffusion. – 2008. – V. 29. – № 2. – P. 204.
2. Medvedev N.N. Distinguishing liquids from amorphous solids: Percolation analysis on the Voronoi network / N.N. Medvedev, A.Geiger, W. Brostow // J. Chem. Phys. – 1990. – V. 93. – P. 8337–8342.
3. Ожован М.И. Стеклообразование в аморфном SiO_2 как перколяционный фазовый переход в системе дефектов сети / М.И. Ожован // Письма в ЖЭТФ. – 2004. – Т. 79. – Вып. 12. – С. 769–771.
4. Евтеев А.В. Атомные механизмы стеклования чистого железа / А.В. Евтеев, А.Т. Косилов, Е.В. Левченко // ЖЭТФ. – 2004. – Т. 126. – № 3. – С. 600–608.
5. Прядильщиков А.Ю. Структурная организация икосаэдрических координационных многогранников в молекулярно–динамической модели металлического стекла $\text{Ni}_{60}\text{Ag}_{40}$ / А.Ю. Прядильщиков, А.Т. Косилов, А.В. Евтеев, Е.В. Левченко // ЖЭТФ. – 2008. – Т. 134. – № 3. – С. 509–513.
6. Король А.В. Структурная организация металлического стекла $\text{Cu}_{80}\text{Zr}_{20}$ / А.В. Король, А.Т. Косилов, А.В. Миленин, А.В. Евтеев, Е.В. Левченко // ЖЭТФ. – 2011. – Т. 139. – № 6. – С. 1158–1165.
7. Arias D. Cu-Zr (Copper-Zirconium) / D. Arias, J.P. Abriata // Journal of Phase Equilibria. – 1990. – V. 11. – № 5. – P 452–459.
8. Mendeleev M.I. Development of suitable interatomic potentials for simulation of liquid and amorphous Cu–Zr alloys / M.I. Mendeleev, M.J. Kramer, R.T. Ott, D.J. Sordelet, D. Yagodin, P. Popel // Phil. Mag. – 2016 – V. 89. – No. 11. – P. 967–987.

УДК 539.213

АТОМИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СТЕКЛА $\text{Cu}_{55}\text{Pd}_{45}$

В.В. Ожерельев¹, А.О. Титаренко²

¹Канд. физ.-мат. наук, ozher@mail.ru

²Студент, ann_tit98@mail.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Методом молекулярной динамики проведено моделирование одноосного сжатия металлического стекла $\text{Cu}_{55}\text{Pd}_{45}$. При помощи статистического анализа многогранников

Вороного и визуализации величины квадратичных неаффинных смещений атомов изучены особенности эволюции атомной структуры в процессе деформации.

Ключевые слова: металлическое стекло, молекулярная динамика, моделирование, деформация, икосаэдр.

В последние годы при помощи методов атомистического компьютерного моделирования активно изучаются механизмы пластического течения металлических стекол (МС) [1]. В настоящей работе проведено компьютерное моделирование одноосного сжатия металлического стекла $\text{Cu}_{55}\text{Pd}_{45}$ и выполнен анализ эволюции атомной структуры на различных стадиях процесса деформации.

Исходная модель МС $\text{Cu}_{55}\text{Pd}_{45}$ была получена методом молекулярной динамики в процессе закалки из расплава со скоростью $6 \cdot 10^{11}$ К/с. Модель содержала 500000 атомов и имела форму цилиндра высотой 320 Å и радиусом 85 Å, вдоль оси цилиндра были наложены периодические граничные условия. Использовался многочастичный потенциал межатомного взаимодействия, рассчитанный в рамках метода погруженного атома [2].

Одноосное сжатие модели (вдоль оси цилиндра) производилось со скоростью $\sim 10^7$ с⁻¹, при этом поддерживалась постоянная температура 60 К. В процессе деформации рассчитывались атомные напряжения [3] и проводился статистико-геометрический анализ атомной структуры на основе построения многогранников Вороного (МВ). Для выявления локальных областей, претерпевающих наибольшие неупругие перестройки, выполнялся расчет квадратичных неаффинных смещений атомов D_2^{\min} [4].

Рассчитанная кривая зависимости напряжения (σ) от деформации (ϵ) имеет вид, типичный для пластичных материалов. При $\epsilon \approx 2$ % начинается отклонение от линейной зависимости $\sigma(\epsilon)$, связанное с ростом числа зон локальных сдвиговых преобразований. В интервале $\epsilon = 4,5 \div 7$ % наблюдается спад величины напряжений. Как показал визуальный анализ величины квадратичных неаффинных смещений (см. рис. а, на котором цвет атома обозначает значение D_2^{\min}), в этом интервале пластическая деформация локализуется в макроскопическую полосу сдвига.

Для анализа закономерностей перестройки атомной структуры в процессе деформации был выполнен статистико-геометрический анализ на основе построения МВ. На рис. б показано изменение доли основных типов МВ в процессе деформации.

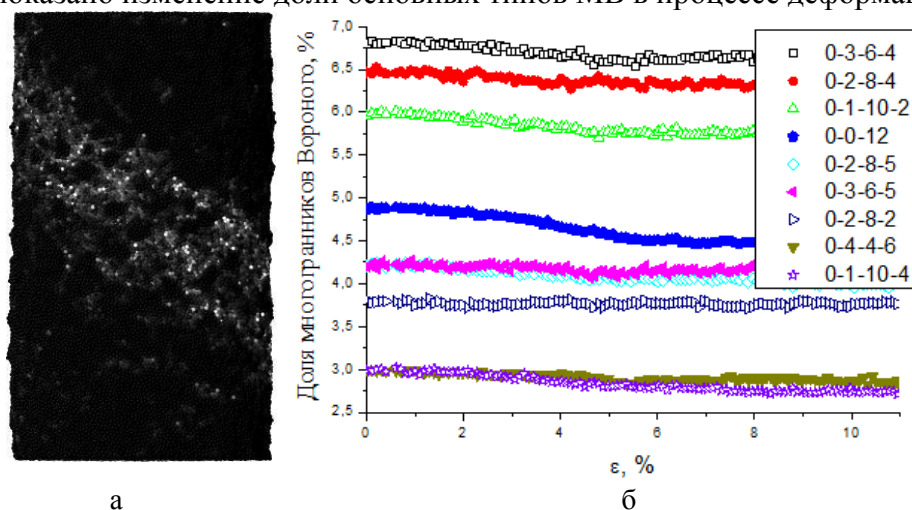


Рисунок. Изображение модели при деформации 8 % (а) и зависимость доли основных типов многогранников Вороного от степени деформации (б)

Важную роль в процессе пластической деформации МС играют икосаэдрические координационные многогранники (МВ {0-0-12}). Известно, что локальные зоны сдвиговых преобразований возникают преимущественно в тех «рыхлых» областях стекла, в

которых доминируют МВ с большим количеством граней, а доля плотноупакованных икосаэдров невелика [1]. Как видно из рис. б, процесс формирования макроскопической полосы сдвига сопровождается разрушением значительного числа икосаэдров в соответствующей области модели.

Литература

1. Takeuchi S. Atomistic simulation and modeling of localized shear deformation in metallic glasses / S. Takeuchi, K. Edagawa // *Progress in Materials Science*. – 2011. – V. 56. – № 6. – P. 785–816.
2. Foiles S.M. Embedded-atom-method functions for the fcc metals Cu, Ag, Au, Ni, Pd, Pt, and their alloys / S.M. Foiles, M.I. Baskes, M.S. Daw // *Phys. Rev. B*. – 1986. – V. 33. – № 12. – P. 7983–7991.
3. Egami T. Atomic level stresses / T. Egami // *Progress in Materials Science*. – 2011. – V. 56. – № 6. – P. 637–653.
4. Falk M.L. Dynamics of viscoplastic deformation in amorphous solids / M.L. Falk, J.S. Langer // *Phys. Rev. E*. – 1998. – V. 57. – № 6. – P. 7192–7205.

УДК 538.975

ИЗМЕНЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ МЕТАЛЛОКСИДНОЙ ПЛЕНКИ SnO₂ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ГАЗОВ-ОКИСЛИТЕЛЕЙ

Т.А. Перепечина¹, С.И. Рембеза², Т.В. Свистова³

¹Аспирантка, sofwind111@gmail.com

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, rembeza@yandex.ru

³Кандидат техн. наук, доцент, svistamara@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Исследовалось изменение электропроводности металлооксидных пленок вследствие воздействия на них газа-окислителя. Было выявлено, что пленка диоксида олова реагирует на углекислый газ даже при комнатной температуре, как и на газы-восстановители (например, аммиак).

Ключевые слова: металлооксидные пленки, диоксид олова, газовая чувствительность, аммиак, углекислый газ.

Газовая чувствительность является индикатором изменения сопротивления металлооксидных полупроводниковых пленок при взаимодействии поверхностных состояний с молекулами газа [1]. Такие пленки нашли широкое применение в производстве газовых датчиков и сложных приборов контроля состава воздуха. Принцип их работы основывается на явлении обратимой хемосорбции.

Так как в последние десятилетия все больше внимания уделяется проблемам экологической безопасности и безопасности на производстве или в быту, то разработка более чувствительных и экономически выгодных датчиков, либо улучшение параметров уже известных материалов (например, повышение величины отклика, селективности и быстродействия, усиление газовой чувствительности) являются достаточно актуальными темами.

Известно, что электрическая проводимость пленки объясняется нестехиометричностью состава из-за наличия различных структурных дефектов, особенно на поверхности. SnO₂ является полупроводником с проводимостью n-типа, что объясняется наличием вакансий кислорода, выполняющих роль центров процесса хемосорбции для кислорода в атмосфере, который адсорбируется на поверхность в виде разных ионов (это зависит от поверхностной температуры в области 200 – 500 °С). Такие ионы, взаимодействуя с газами-окислителями (к примеру, с CO₂, NO_x или др.), способствуют истощению поверхностного слоя (вследствие захвата электронов), что повышает сопротивление металлооксидной пленки. Газы-восстановители (например, пары аммиака,

этилового и других спиртов, ацетона и др.), наоборот, уменьшают сопротивление [2, 3]. Это важно учитывать на этапе выбора материала для достижения наилучших результатов, так как для работы с окислителями лучше подойдут низкоомные пленки, а для работы с восстановителями – высокоомные. Восстановление адсорбционной способности (а значит, и возврат к величине исходного сопротивления) происходит в результате высокотемпературного отжига (иногда длительного) или УФ облучения поверхности пленки.

В данной работе были исследованы тестовые образцы на основе пленки диоксида олова (SnO_2) с примесью 1 ат. % кремния. Результаты исследования отражают газовую чувствительность, то есть отношение сопротивления пленки, измеренного в атмосфере газа к сопротивлению в воздушной атмосфере.

Изменения отслеживались при комнатной температуре у отожженных газосенсорных структур, так как они более стабильны. В качестве газа был выбран углекислый (CO_2 с концентрацией 3366 ppm). На рисунке 1 видно, что чувствительность (и сопротивление соответственно) увеличивается в 2 раза и через 24 минуты выходит на насыщение. Таким образом, к этому времени на всех поверхностных состояниях оказываются адсорбированными молекулы углекислого газа. При этом в первые 150 секунд происходят стабилизационные процессы, которые могут снизить сопротивление. После напуска воздуха происходит небольшое снижение сопротивления, однако, оно не возвращается к начальному значению, для этого необходим отжиг при высокой температуре.

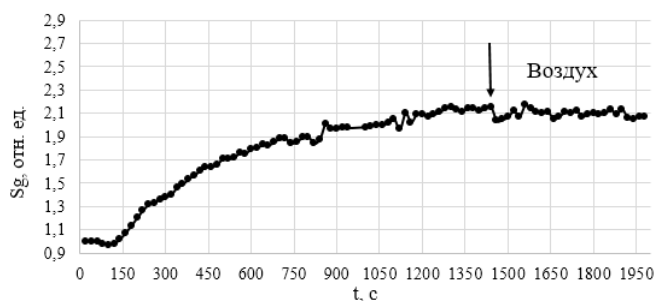


Рисунок. Изменение газовой чувствительности от времени под воздействием CO_2 (3366 ppm) при комнатной температуре

Таким образом, структуры на основе металлооксидной пленки $\text{SnO}_2 + 1$ ат. % Si являются подходящими для обнаружения не только газов-восстановителей, но и для обнаружения газов-окислителей при комнатной температуре.

Литература

1. Таланчук П.М. Выходные информативные параметры полупроводниковых чувствительных элементов / П.М. Таланчук, Т.Ю. Киричек // Диэлектрики и полупроводники. – 1989. – Вып. 35. – С. 93–100.
2. Гриневич В.С. Физико-химический механизм формирования параметров газовых сенсоров на основе оксидных материалов / В.С. Гриневич, В.В. Сердюк, В.А. Смынтына и др. // Журнал аналитической химии. – 1990. – Т. 45. – Вып. 8. – С. 1521–1525.
3. Barsan N. Conduction model in gas-sensing SnO_2 layers: grain-size effects and ambient atmosphere influence / N. Barsan // Sensor and Actuators. – 1994. – V. B. – № 17. – P. 241–246.

GAS SENSITIVE PROPERTIES SnO₂-ZnO THIN FILMS

V.V. Petrov¹, E.M. Bayan², V.Yu. Storozhenko³, Yu.N. Varzarev⁴, A.P. Starnikova⁵, S.A. Khubezhov⁶

¹Dr. tech. Sciences, Professor, vvp2005@inbox.ru

²Cand. chemical Sciences, Associate Professor, ek-bayan@yandex.ru

³Student, viktoriastorojenko@gmail.com

⁴Cand.Tech.Sci., lecturer, varzarevyuv@sfedu.ru

⁵Master's Degree student, a.starnikova@mail.ru

Southern Federal University, Rostov-on-Don, Taganrog, Russia

⁶Cand. Phys.-Mat. Sciences, Researcher

North Ossetian State University, Vladikavkaz, Russia

This paper presents the results of a study of the gas-sensitive properties of thin (up to 100 nm) ZnO – SnO₂ films with respect to carbon monoxide (II). It is shown that the effect of CO molecules leads to a change in the chemical composition of the films and the degradation of gas sensitive properties.

Keywords: gas sensitive properties, thin films, carbon monoxide (II).

Binary ZnO–SnO₂ (ZTO) thin films with varying SnO₂ concentrations were grown on glass substrate. The influence of various factors such as synthesis conditions and properties of the resulting films was studied. ZTO transparent films were obtained from organic compounds of zinc (II) and tin (IV) by low-temperature pyrolysis. It was determined that crystal structure formation starts at the temperature of 550 °C. It was found that the film materials obtained by this method are uniform, dense, distribution occurs over the entire surface. The thickness of the one-layer film is about 30 nm. The method allows to obtain films of a given thickness by layer-by-layer formation. The study of multilayer films showed that high-quality material can be obtained by two to four times the application and the firing temperature of 500-600 °C.

The properties of the synthesized materials were studied by X-ray (ARL X'TRA diffractometer, CuK_{α1}-radiation), surface morphology and elemental microanalysis (scanning electron microscope Nova Nanolab 600 with the system of energy-dispersive X-ray microanalysis EDAX GENESIS 6000i). Electrophysical and gas sensitive properties by carbon oxide (II) were measured using an automated installation for determining the parameters of gas sensors at the Center for Collective Use "Microsystem Technics and Integral Sensors" [1]. X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) has been used to characterize the elemental and surface composition of the ZTO surface at a depth of several atomic layers (XPS) [2]. XPS makes it possible to determine the relaxation of the surface structure of the films as a result of exposure to CO molecules. The studies were carried out in an ultrahigh vacuum (vacuum level no worse than $1,8 \cdot 10^{-9}$ mbar) K-Alpha ThermoScientific installation with a monochromatic X-ray source Al-Kalpha with quantum energy $h\nu = 1486.6$ eV.

Studies of the gas-sensitive properties of the films were carried out on the structures on which V-Cu-Ni contacts were formed. Studies were carried out at a temperature of 300 °C. It was clear that at the first ten CO exposures with a concentration of 50 ppm, the sensor response was 34% of the initial resistance level. In further studies, the sensitivity dropped sharply to a level of no more than 10% when exposed to 1000 ppm.

When conducting XPS studies, it was found that in the process of holding the sensors in a gaseous environment, the chemical composition of the surface layers of the ZTO film degrades due to the chemical adsorption of CO molecules, which leads to the reduction of zinc and tin to metals due to the breakdown of metal oxide bonds. This, in turn, leads to the formation of hydroxides and zinc carbonates. In addition, desorption of tin compounds occurs from the surface layers of the films.

References

1. Petrov V.V., Starnikova A.P., Abdullin Kh.A., Makarenko D.P. Features of the mechanism of gas sensitivity of the zinc oxide nanorods arrays to carbon monoxide// IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1124 (2018) 022017.
2. Yalovega G.E., Shmatko V.A., Nazarova T.N., Petrov V.V., Zabluda O.V. Phase composition study of nanocomposite SiO_2CuO_x materials by X-ray absorption spectroscopy and photoelectron spectroscopy methods // Materials of Electronics Engineering. № 4. 2010. P.31-35.

УДК 538.95

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛОВОЙ РЕЛАКСАЦИИ В ВЯЗКОУПРУГИХ СРЕДАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ВОЛН

А.Н. Рыбьянец¹, С.А. Щербинин², И.А. Швецов³, Д.И. Макарьев⁴

¹Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com

²Научный сотрудник, step_scherbinin@list.ru

³Аспирант, wbeg@mail.ru

⁴Канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, dmakarev@rambler.ru
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В работе представлены результаты экспериментального исследования процессов тепловой релаксации в вязкоупругих средах при воздействии ультразвуковых волн. В качестве модельного образца вязкоупругой среды был выбран полиуретан Силагерм 5020 1/3. Для нагрева образца использовался плоский ультразвуковой преобразователь с охлаждаемой поверхностью. Получены и интерпретированы временные зависимости распределения температуры на различной глубине полиуретанового образца.

Ключевые слова: тепловая релаксация, ультразвуковой преобразователь, полиуретан, ультразвуковой нагрев.

Основные механизмы ультразвукового воздействия на биологические ткани включают в себя нагрев, кавитацию и механические эффекты [1]. Тепловые механизмы обусловлены поглощением ультразвука биологической тканью. Исследование процессов нагрева биологических тканей *in vivo* на животных и пациентах крайне затруднительно. Поэтому использование акустических фантомов с параметрами близкими к свойствам биологических тканей является одним из общепринятых методов исследования различных процессов при распространении ультразвука [2].

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование процессов тепловой релаксации в образцах полиуретана при воздействии ультразвуковых волн различной частоты и интенсивности. Для возбуждения ультразвуковых волн использовался плоский ультразвуковой преобразователь с охлаждаемой поверхностью, обеспечивающий эффективную генерацию ультразвуковых волн с частотами от 2 до 8 МГц при излучаемой акустической мощности до 20 Вт и контролируемой температуре поверхности пьезоэлемента и биологической ткани в диапазоне от 20°C до 36°C. В качестве модельного образца вязкоупругой среды использовался полиуретан Силагерм 5020 1/3 со следующими параметрами: твердость по Шору 20, плотность 1.1 г/см³, скорость звука 1390 м/с, затухание 11 дБ/см на частоте 1 МГц, коэффициент теплопроводности $2 \cdot 10^{-2}$ Вт/(см·°C). Плоский ультразвуковой преобразователь с охлаждаемой поверхностью помещался на поверхность полиуретанового фантома. Измерения распределения температуры полиуретанового образца по глубине и процессов тепловой релаксации выполнялись с помощью терморезисторов Epcos S861 (10 кОм, 1%, NTC), залитых в полиуретан на разной глубине.

Временные зависимости температуры полиуретанового фантома, измеренные на различных глубинах при ультразвуковом нагреве, приведены на рисунке.

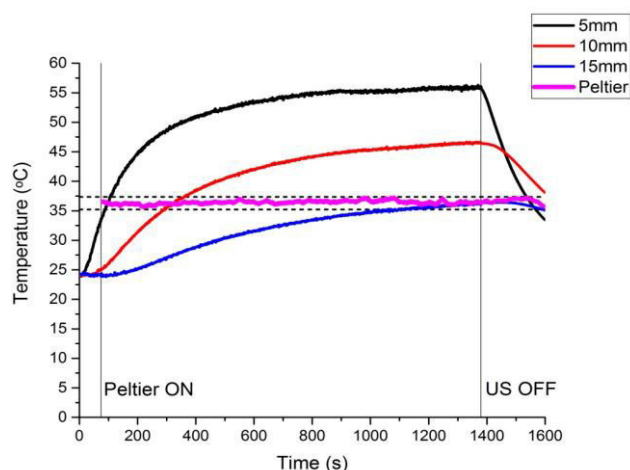


Рисунок. Временные зависимости ультразвукового нагрева (частота 6.85 МГц, интенсивность 1 Вт/см²) полиуретанового фантома на различной глубине при постоянной температуре поверхности 36 °С

Из рисунка видно, что установившиеся значения температуры на глубине 5, 10 и 15 мм составляют 55°С, 45°С и 35°С соответственно при постоянной температуре поверхности равной 36°С (пространственная локализация области нагрева), причем времена выхода на насыщение составляют приблизительно 20 минут и определяются конкурирующим влиянием ультразвукового нагрева, теплопроводности и охлаждения поверхности образца.

Полученные результаты, а также акустические фантомы, измерительные стенды и методики, разработанные в настоящей работе, могут быть использованы при конструировании и калибровке ультразвуковой медицинской аппаратуры.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Hill C.R. Physical principles of medical ultrasonics. Second edition / C.R. Hill, J.C. Bamber, G.R. ter Haar. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
2. Rybyanets A.N. Recent Advances in Medical Ultrasound / A.N. Rybyanets // Nova Science Publishers Inc. - 2012. - Chapter 5. - P. 143-187.

УДК 538.95

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПЛОСКИМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОХЛАЖДАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

А.Н. Рыбьянец¹, Н.А. Швецова², И.А. Швецов³, С.А. Щербинин⁴

¹Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com

²Аспирант, yfnfif_71@bk.ru

³Аспирант, wbeg@mail.ru

⁴Научный сотрудник, step_scherbinin@list.ru

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В работе представлены результаты экспериментального исследования нагрева биологической ткани плоским ультразвуковым преобразователем с охлаждаемой поверхностью. Разработана конструкция ультразвукового преобразователя, обеспечивающая эффективное излучение ультразвуковых волн при подаваемой контролируемой температуре поверхности пьезоэлемента и биологической ткани. Результаты экспериментов *ex vivo* на образцах биологических тканей подтвердили эффективность, безопасность и селективность разработанного метода.

Ключевые слова: ультразвуковой преобразователь, биологическая ткань, ультразвуковой нагрев, коагуляция.

Терапевтический ультразвук используется в медицине на протяжении многих лет [1]. Нефокусированный ультразвук низкой интенсивности (до 3 Вт/см^2) с частотами порядка нескольких мегагерц используется в основном для интенсификации и стимуляции физиологических процессов при лечении травм, а также для терапевтического нагрева. Ультразвуковая хирургия использует ультразвук высокой интенсивности (более 5 Вт/см^2) для управляемого избирательного разрушения тканей [1]. В последнее время к традиционным низкоинтенсивным терапевтическим методам добавились методы, в основе которых лежит использование высокоинтенсивного фокусированного ультразвука (HIFU) для неинвазивного локального направленного воздействия на опухоли и биологические ткани [2]. Одной из новых перспективных областей применения ультразвуковых методов и УЗ аппаратуры за последние годы стала неинвазивная эстетическая и регенеративная медицина [3].

Таким образом, разработка новых методов и конструкций ультразвуковых преобразователей, обеспечивающих эффективную и безопасную терапевтическую и косметическую обработку поверхностных тканей пациента, является актуальной задачей современной эстетической и восстановительной медицины.

В настоящей работе выполнено экспериментальное исследование нагрева биологической ткани плоским ультразвуковым преобразователем с охлаждаемой поверхностью. Разработанная конструкция ультразвукового преобразователя обеспечивала эффективное излучение ультразвуковых волн на частотах от 2 до 8 МГц при подаваемой электрической мощности до 50 Вт и контролируемой температуре поверхности пьезоэлемента и биологической ткани в диапазоне от 20°C до 36°C .

Результаты экспериментов *ex vivo* на образцах биологических тканей приведены на рисунке. Плоский ультразвуковой преобразователь с охлаждаемой поверхностью помещался на поверхность свежей говяжьей печени. Использовался следующий протокол ультразвуковой обработки: частота ультразвука 6.85 МГц, акустическая интенсивность 1 Вт/см^2 , время обработки 5 минут, температура поверхности пьезоэлемента и биологической ткани 36°C , температура образца биологической ткани на глубине 10 мм 56°C .

Из рисунка видно, что ультразвуковой нагрев приводит к локальной коагуляции биологической ткани внутри образца без повреждения его поверхности. Область коагуляции локализована на глубине от 5 до 15 мм от поверхности образца и ограничена в поперечном направлении размерами ультразвукового преобразователя.



Рисунок. Результаты ультразвукового воздействия на образец говяжьей печени *ex vivo*

Проведенные эксперименты подтвердили эффективность, безопасность и селективность разработанного метода обработки биологической ткани и конструкции ультразвукового преобразователя с охлаждаемой поверхностью.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. Hill C.R. Physical principles of medical ultrasonics. Second edition / C.R. Hill, J.C. Bamber, G.R. ter Haar. – London: John Wiley & Sons Ltd., 2004.
2. Rybyanets A.N. Recent Advances in Medical Ultrasound / A.N. Rybyanets // Nova Science Publishers Inc. - 2012. - Chapter 5. - P. 143-187.
3. Shvetsova N.A. Ultrasonic transducer designs for combinational treatment of biological tissues / N.A. Shvetsova, I.A. Shvetsov, M.A. Lugovaya, A.N. Reznichenko, A.N. Rybyanets // Ferroelectrics. 2019. V. 539. I. 1. P. 126-133.

УДК 544.6

СТРУКТУРНЫЕ И ПРИМЕСНЫЕ ЛОВУШКИ ДЛЯ АТОМОВ ВОДОРОДА В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.С. Самофалова¹, А.В. Звягинцева²

¹Инженер, samofalova.94@bk.ru

² Канд. техн. наук, доцент, zvygincevaav@mail.ru

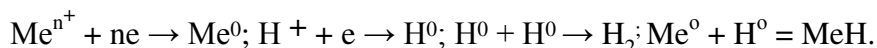
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Рассмотрено формирование структуры металла с определенной степенью дефектности: за счет введение в основной металл примесей неметаллов, способствующих получению мелкокристаллической структуры с оптимальной степенью дефектности формируемой электрохимической системы, которые являются местами закрепления водорода. Высказан механизм насыщения композита Ni-B водородом, учитывающий влияние бора как элемента искажающего решетку основного компонента Ni.

Ключевые слова: композит никель-бор, точечные дефекты, примесные и структурные ловушки, водород.

Взаимодействие водорода с металлами является определяющим процессом, как минимум, двух направлений научных исследований. Одно из направлений исследования - водородная энергетика, данному направлению посвящен целый ряд работ [1, 2]. Второе направление - разработка эффективных покрытий с целью удержания атомов водорода в приповерхностном слое элементов конструкций различного назначения [2]. В работе внимание уделено примесям замещения и внедрения, которые можно рассматривать, как точечные дефекты различного происхождения.

Исследуемые в работе материалы, полученные из водных растворов электрохимическим способом, существенно отличаются по свойствам от металлов, полученных кристаллизацией из расплавов по свойствам, но прежде включением других элементов и водорода, существенно искажающих кристаллическое строение металла, вплоть до изменения кристаллографической формы выделяющегося металла. Процесс формирования электролитических металлов (никеля) происходит по схеме с последующим обоазованием гидридной фазы (при взаимодействии с атомарным водородом):



Включение водорода в катодный осадок возможно тремя вероятными путями: адсорбцией атомарного водорода на поверхности осаждаемого осадка, когда атомы водорода либо занимают узлы кристаллической решетки металла, либо располагаются между ними, образуя твердый раствор внедрения; образованием гидридов с металлом покрытия, распадающихся впоследствии в процессе выделения водорода; механический захватом водорода вследствие застраивания плоскостей в растущем осадке.

Исследованиями установлено, что при легировании никелевых покрытий бором до 1 % образуется твердый раствор бора и водорода в никеле, кристаллизующемся с

ГЦК решеткой характерной для никеля. С увеличением содержания бора от 0,1 до 1 % об. происходит уменьшение параметров кристаллической решетки (межплоскостных расстояний и периода решетки), размера кристаллитов, снижается совершенство текстуры $\langle 111 \rangle$, характерной для никеля, возрастают деформация и искажение кристаллической решетки. Размер кристаллитов для никеля изменяется от 60 до 200 нм, а Ni+0,54В от 20–120 нм. Для никеля число кристаллитов размером 0–400 Å составляет ~68 %, а для композита Ni+0,54В количество кристаллитов ~93 % находится в районе 0–400 Å. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о получении структур наноразмерного диапазона, при включении примесного атома бора (примесная ловушка), который создает предпосылки формирования структурных ловушек. Водород же является примесью внедрения, увеличивает параметры решетки Ni и расположен в тетра и октапорах системы. Далее проведено сопоставление структурного изменения материала с его способностью аккумулировать водород. При введении от 2 до 10 ат. % бора в никель происходит переход от кристаллической структуры (до 5 ат. %) к неявно выраженной кристаллической структуре (6–9 ат. %) с переходом к аморфной, что сопровождается увеличением экстрагируемого водорода из образца, содержание которого определялось методом вакуумной экстракции методом термодесорбции [3].

Итак, структурные ловушки, по сути, - дефекты кристаллического строения металлов. Основными среди них являются краевые дислокации, вершины микротрещин и клиновые дисклинации. В окрестности этих структурных несовершенств формируются примесные сегрегации из атомов водорода и гидридные фазы, при достижении предела растворимости водорода. Структурные ловушки захватывают атомы водорода на длительное время. Техническим результатом являются синтезированные материалы никель-бор-водород, имеющие структуру, способную аккумулировать водород за счет возникающих структурных и примесных ловушек.

Литература

1. Oudriss A., Creus J., Bouhattate J., Conforto E., Berziou C., Savall C., Feaugas X. Grain size and grain-boundary effects on diffusion and trapping of hydrogen in pure nickel. *Acta Materialia*, 2012. No. 60, pp. 6814-6828.
2. Структурные и примесные ловушки для точечных дефектов: монография /А.В. Звягинцева. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 180 с.
3. Zvyagintseva A.V. Hydrogen permeability of nanostructured materials based on nickel, synthesized by electrochemical method /A.V. Zvyagintseva //Proceedings of the 2017 IEEE 7th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties (NAP-2017). - IEEE Catalog Number: CFP17F65-ART, 2017. - Part 2. - 02NTF41-1-02NTF41-5.

УДК 537.31

НЕЛИНЕЙНЫЕ СВОЙСТВА СТРУКТУРЫ СВЕРХПРОВОДНИК-НОРМАЛЬНЫЙ МЕТАЛЛ СИСТЕМЫ Bi-Sr-Ca-Cu-O

А.В.Сергеев¹, И.М. Голев²

¹Канд. физ.-мат. наук, доцент, sergeev-av@bk.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, imgolev@gmail.com

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

В данной работе приводятся результаты исследований влияния амплитуды переменного магнитного поля на напряжение третьей гармоники сигнала отклика сверхпроводника со структурой нормальный металл-сверхпроводник системы Bi-Sr-Ca-Cu-O

Ключевые слова: высокотемпературный сверхпроводник, переменное магнитное поле, структура сверхпроводник-нормальный металл.

В настоящее время наблюдается ограниченное применение высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) материалов, не смотря на уникальность их электрических и магнитных свойств. Происходит это вследствие того, что на конструкции устройств, в которых в качестве чувствительного элемента используются ВТСП-материалы, в процессе эксплуатации действуют постоянные и переменные магнитные поля, что предполагает рассеяние энергии магнитного поля в объеме сверхпроводника, и как следствие – проявлению нелинейных свойств [1].

В работе [2] описывается технология получения ВТСП-материалов на основе системы Bi-Sr-Ca-Cu-O, имеющих большое количество межкристаллитных границ. Полученные по такой технологии сверхпроводники со структурой сверхпроводник-нормальный металл обладают широким диапазоном температур сверхпроводящего перехода и малыми значениями критического тока, а также обладают нелинейными магнитными свойствами.

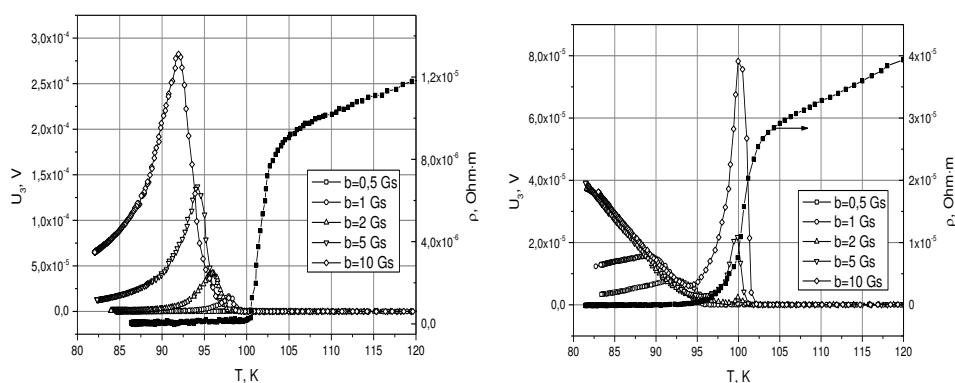


Рисунок. Зависимости $U_3(T)$

Были проведены измерения температурных зависимостей напряжения третьей гармоники ответного сигнала от катушки индуктивности, намотанной на образец сверхпроводника, находящийся в переменном магнитном поле. В зависимости от состава образца, в диапазоне температур сверхпроводящего перехода на кривых зависимости $U_3(T)$ наблюдался один или два максимума, свидетельствующие о возникновении диссипации энергии переменного магнитного поля, как описано в [3, 4]. В исследуемых материалах на основе висмута со структурой сверхпроводник-нормальный металл проявляются нелинейные магнитные свойства, обусловленные, в первую очередь, системой слабых связей между кристаллитами фазы Bi-2223. Управляя соотношением нормальной и сверхпроводящей фазы Bi-2212 и Bi-2223, размерами кристаллитов, возможно управлять величиной диссипации переменного магнитного поля в объеме сверхпроводника, и как следствие – нелинейным откликом, что позволит открыть новые перспективы применения ВТСП материалов.

Литература

1. Sergeev A., Golev I. High-Temperature Superconducting Materials Based on Bismuth with a Low Critical Current// Materials Today: Proceedings 11 (2019) 489–493.
2. Majewski P. Materials aspects of the high-temperature superconductors in the system Bi2O3-SrO-CaO-CuO. J. Mater. Res., V. 15. No. 4 (2000)., P. 854-870.
3. I.M. Golev, A. V. Sergeev, V. G. Kadmenskiy, and O. V. Kalyadin Specifics of Third-Harmonic Generation in Bi-Sr-Ca-Cu-O Superconductors in the Region of Superconducting Transition Temperatures / Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics, 2016, Vol. 80, No. 9, pp. 1077–1079.
4. I.M. Golev, A.V. Sergeev, O.V. Kalyadin Nonlinear Properties of Multiphase High-Temperature Superconductors of the Bi-Sr-Ca-Cu-O System in the Temperature Range of the Superconducting Transition / Physics of the Solid State. – 2017. – Vol. 59. – No. 1. – pp. 16–20.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ МНОГОСЛОЙНЫХ НАНОСТРУКТУР Mg/(ZrAlO)₄₅

А.Н. Смирнов¹, О.В. Стогней²

¹Аспирант, deadpank@mail.ru

²Д-р физ.-мат. наук, профессор, sto@sci.vrn.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

В работе изучено влияние термического отжига, проводимого в вакууме, на фазовый состав и электрическое сопротивление многослойных наноструктур Mg/(ZrO+AlO)₄₅ с различной толщиной металлических слоёв.

Ключевые слова: многослойная наноструктура, термический отжиг, температурная зависимость, малоугловая рефлектометрия.

Многослойная структура Mg/(ZrO+AlO)₄₅ была получена методом ионно-плазменного распыления двух мишеней: металлической (Mg) и оксидной (ZrO+AlO) с последующим осаждением материала на подложки, совершающие круговое движение вокруг мишеней. Металл осаждался через V-образный экран, а смесь оксидов - без экрана, благодаря чему полученные образцы отличались друг от друга толщиной металлического слоя. Толщина оксидного слоя оставалась постоянной и составляла ~ 3 нм. Определение толщины слоёв магния, осуществлённое на тестовых образцах показало, что она меняется от 1,8 нм до 3,9 нм.

Зависимость электрического сопротивления многослойной структуры Mg/(ZrO+AlO)₄₅ от толщины слоя Mg немонотонна, с резким уменьшением значений сопротивления при толщинах слоя 1,5 - 1,9 нм (рис.1), что позволяет предполагать наличие перколяционного перехода по проводимости в полученной системе.

До порога перколяции магниевые включения в слоях не формируют связанные и протяженные области, поэтому проводимость определяется переносом через оксидную матрицу, что обуславливает высокие значения сопротивления (рис. 1). За порогом перколяции слои магния представляют собой сплошные проводящие области, поэтому значения сопротивления в этом случае сравнительно низкие и слабо зависят от толщины магниевых слоев.

Несмотря на предполагаемые существенные различия в морфологии образцов температурные зависимости электрического сопротивления многослойных структур Mg/(ZrO+AlO)₄₅ в основных своих особенностях повторяются как для малой толщины слоя магния, так и для большой (рис. 2). Характерной особенностью всех зависимостей является наличие участка с резким уменьшением сопротивления примерно при одной и той же температуре (250-270 °C) и последующим ростом значений.

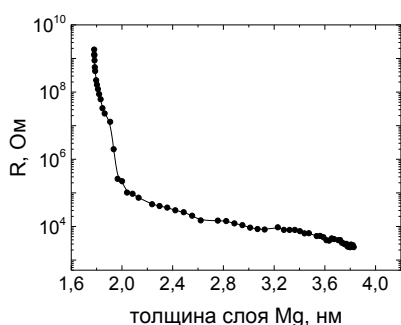


Рис. 1. Зависимость сопротивления многослойной наноструктуры Mg/(ZrO+AlO)₄₅ от толщины слоя магния

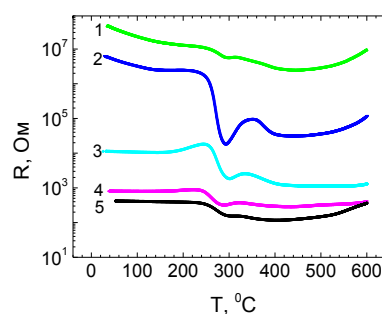


Рис. 2. Температурная зависимость сопротивления многослойной структуры Mg/(ZrO+AlO)₄₅ с различной толщиной бислоя: 1 – 1,8 нм; 2 – 1,85 нм; 3 – 2,3 нм; 4 – 2,95 нм; 5 – 3,5 нм

Рентгенодифракционные исследования (рис. 3) показывают, что при нагреве образцов происходит окисление магния и формирование его оксида (MgO). Появление слабого и размытого максимума, соответствующего отражению от семейства плоскостей (200), наблюдается уже после отжига при 250 °С. Это позволяет предположить следующее объяснение наблюдаемым зависимостям. Окисление магния возможно за счет атомов кислорода, содержащихся в оксидных слоях многослойной структуры. При этом, «уход» атомов кислорода из матрицы приводит к созданию большого числа дополнительных кислородных вакансий, через которые возможен электроперенос.

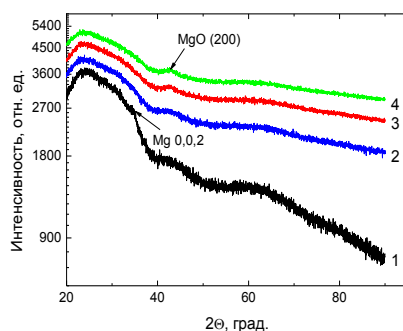


Рис. 3. Дифрактограммы многослойной наноструктуры Mg/(ZrO+AlO)₄₅: 1 – исходное состояние; 2 – отжиг в вакууме при T=250 °С; 3 - отжиг в вакууме при T=300 °С; 4 - отжиг в вакууме при T=400 °С

В результате сопротивление многослойной структуры Mg/(ZrO+AlO)₄₅ снижается. В пользу данного предположения говорит тот факт, что температурные зависимости сопротивления многослойных структур, исследованные в интервале -196 – 0 °С, имеют неметаллический характер (ТКС < 0) даже при толщинах магниевых слоев 3,6 – 3,8 нм. Иными словами, проводимость не является металлической в чистом виде, несмотря на сравнительно низкие значения абсолютного сопротивления.

Последующий рост сопротивления (300-350 С) связан, по всей видимости, с релаксацией матрицы, аналогично тому, что наблюдается в композитах металл-диэлектрик – термические отжижки снижают плотность структурных дефектов, что приводит к росту электросопротивления [1].

Литература

1. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах \С.А. Гриднев и др. \ М.: Бином. – 2012. – 352 с.

УДК 004.94; 534.8

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ ПЛОСКИМ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ С ОХЛАЖДАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С.А. Щербинин¹, И.А. Швецов², Н.А. Колпачева³, А.Н. Рыбьянец⁴

¹Научный сотрудник, step_scherbinin@list.ru

²Аспирант, wbeg@mail.ru

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

³Канд. физ.-мат. наук, ассистент кафедры «Физика», kolpacheva.natalia@gmail.com
ФГБОУ ВО «Донской государственной технической университет»

Настоящая работа посвящена компьютерному моделированию нагрева биологической ткани плоским источником ультразвука с внешним охлаждением. Результаты проведенных вычислительных экспериментов демонстрируют возможность пространственной локализации

максимума температуры на заданной глубине посредством подбора режимов работы источника ультразвука.

Ключевые слова: ультразвук, нагрев биологической ткани, конечно-элементное моделирование, псевдоспектральные методы, вычислительный эксперимент.

Ультразвуковой нагрев тканей тела используется в целом ряде областей косметической медицины: неинвазивная липосакция, заживление ран и ожогов, омоложение и подтяжка кожи, лечение целлюлита и т.п. Так, объектом исследования настоящей работы является плоский источник ультразвука с охлаждаемой поверхностью. Подобный ультразвуковой преобразователь может быть использован для обработки поверхностных тканей пациента: подкожного жира и поверхностной мышечно-апоневротической системы, при этом за счет охлаждения поверхности преобразователя возможно, во-первых, сохранять на коже комфортную для пациента температуру и, во-вторых, добиться избирательного по глубине нагрева до некоторой заданной температуры.

Компьютерное моделирование было проведено для двумерной задачи. Рассматривался плоский квадратный участок жировой ткани размером 47.2 мм, на одной из сторон которого посередине располагался источник ультразвука длиной 23 мм. Акустические расчеты производились с использованием пакета K-Wave [1], в котором реализован псевдоспектральный метод решения связанных акустических уравнений первого порядка [2]. Расчетная модель данного пакета позволяет учитывать степенной закон акустического поглощения. По краям моделируемой области задавались слои (так называемые PMLs: perfectly matched layers), полностью поглощающие ультразвук. Расчет нагрева среды проводился посредством решения классического уравнения теплопроводности методом конечных элементов, для чего использовался пакет программ FEniCS [2, 4]. При этом на той стороне расчетной области, где был расположен источник ультразвука, задавалось граничное условие, соответствующее температуре охлаждения преобразователя, а на трех других - температура человеческого тела, равная 37°C.

На рисунке 1 представлено распределение тепловых источников, порождаемое ультразвуковым полем рассматриваемого источника при частоте 4 МГц и интенсивности его излучения 0.5 Вт/см² (источник расположен вдоль оси y). На рисунке 2 изображено распределение температуры вдоль прямой $y = 0$ для трех различных моментов времени при частоте излучения 4 МГц, интенсивности 0.5 Вт/см² (температура охлаждения равна 37°C). Из этого рисунка видно наличие выраженного максимума температуры, который меняет свое положение с течением времени.

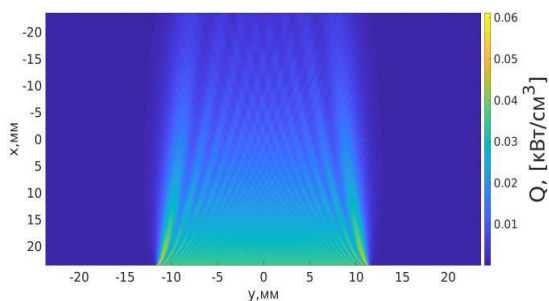


Рис. 1. Распределение тепловых источников, порождаемое ультразвуковым полем плоского источника, расположенного вдоль оси Y , при частоте 4 МГц и интенсивности излучения 0.5 Вт/см²

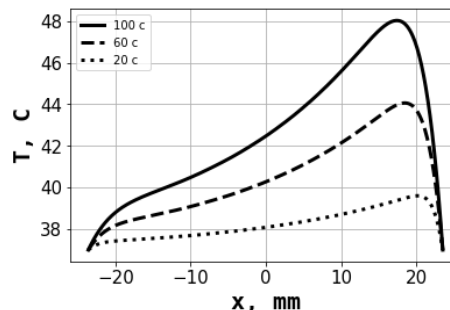


Рис. 2. Распределение температуры вдоль прямой $y = 0$ для трех различных моментов времени ($t = 20, 60$ и 100 секунд) при частоте излучения 4 МГц, интенсивности 0.5 Вт/см², температура охлаждения до 37°C

В настоящей работе были рассчитаны зависимости скорости движения максимума температуры и скорости роста температуры в этом максимуме от частоты излуче-

ния, его интенсивности и от температуры охлаждения. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показывают, что путём изменения указанных параметров возможно регулировать глубину, на которой будет достигнута некоторая заданная температура (в данном исследовании величина такой температуры была равна 48 °С). Также было проведено моделирование установившихся равновесных режимов исследуемой системы.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания).

Литература

1. <http://www.k-wave.org/>
2. Treeby Bradley E. Time Domain Simulation of Harmonic Ultrasound Images and Beam Patterns in 3D Using the k-space Pseudospectral Method / Bradley E. Treeby, Mustafa Tumen, B. T. Cox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. MICCAI 2011. - Springer, 2011.
3. <https://fenicsproject.org/>
4. Langtangen Hans Petter. Solving PDEs in Python / Hans Petter Langtangen. Anders Logg. - Springer, 2017.

УДК 004.94; 534.8

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ВЯЗКОУПРУГОЙ СРЕДЫ СТОЯЧИМИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМИ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ ВОЛНАМИ

С.А. Щербинин¹, Е.И. Петрова², А.Н. Резниченко³, А.Н. Рыбняец⁴

¹Научный сотрудник, step_scherbinin@list.ru

²Научный сотрудник, harigamypeople@gmail.com

³Научный сотрудник, reznichenkoan@yahoo.com

⁴Д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник, arybyanets@gmail.com
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

В настоящей работе было проведено компьютерное моделирование нагрева вязкоупругой среды стоячими цилиндрическими ультразвуковыми волнами, создаваемыми круговым источником. Частота излучения соответствовала частоте толщинной моды колебаний пьезокерамического преобразователя, выполненного в форме полого цилиндра, поляризованного по радиусу. Скорость нагрева среды была рассчитана в зависимости от интенсивности излучения и его частоты.

Ключевые слова: ультразвуковой нагрев, стоячие волны, кольцевой пьезоэлемент, конечно-элементное моделирование, псевдоспектральные методы.

Ультразвук находит широкое применение в терапевтической и диагностической медицине, косметологии, а также в целом ряде областей современной науки и техники. Спектр различных применений ультразвука постоянно расширяется, что определяет актуальность разработки пьезоэлектрических преобразователей с характеристиками, оптимизированными под конкретную задачу. Так, для некоторых косметологических процедур могут быть использованы высокоинтенсивные ультразвуковые стоячие цилиндрические волны, возникающие внутри поляризованного по радиусу кольцевого пьезоэлектрического преобразователя [1, 2]. Использование подобных преобразователей представляется перспективным также для разжижения текущей внутри трубы нефти путем ее нагрева, а также для активации скважин тяжелых нефтей.

Фотография преобразователя такой конструкции, изготовленного из пьезокерамики ЦТС-19, приведена на рисунке.



Рисунок. Кольцевой пьезоэлемент, изготовленный из керамики ЦТС-19 с внутренним радиусом 60 мм и внешним радиусом 70 мм. Элемент поляризован по радиусу

Ранее было показано, что кольцевой преобразователь, работающий на радиальной моде, не способен создать внутри себя стоячие ультразвуковые волны [2]. Однако, частота моды колебаний по толщине стенки такого пьезоэлемента оказывается достаточно близкой к резонансному условию возникновения стоячих цилиндрических волн внутри него.

Компьютерное моделирование было проведено для двумерной задачи. Рассматривался кольцевой пьезокерамический элемент с внутренним радиусом 60 мм и внешним 70 мм, заполненный касторовым маслом и окруженный воздухом. Источник ультразвука полагался совпадающим с границей раздела сред масло/пьезокерамика. Теплопередача между пьезокерамикой и воздухом предполагалась нулевой. Акустические расчеты производились с использованием пакета K-Wave [3], в котором реализован псевдоспектральный метод решения связанных акустических уравнений первого порядка [4]. Расчетная модель данного пакета позволяет учитывать степенной закон акустического поглощения. Нагрев среды рассчитывался посредством решения классического уравнения теплопроводности методом конечных элементов, для чего использовался пакет программ FEniCS [5].

Были проведены расчеты для различных интенсивностей и частот ультразвукового излучения, а также для различных параметров моделируемой среды. Результаты вычислительных экспериментов показывают, что нет необходимости регулировать частоту толщинной моды колебаний кольцевого преобразователя при использовании его для нагрева конкретной среды: пьезоэлемент, изображенный на рисунке, достаточно эффективно нагревает внутри себя любую вязкоупругую среду в широком диапазоне соответствующих такой среде параметров.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (тема № 12.5425.2017/8.9, базовая часть госзадания) и Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ № 16-58-48009-Инд-оми).

Литература

1. Rybyanets A.N. New Methods and Transducer Designs for Ultrasonic Diagnostics and Therapy / A.N. Rybyanets / Springer Proceedings in Physics. - 2016. - V. 175. - P. 603-620.
2. Наседкин А.В. Конечно-элементное моделирование и экспериментальное исследование цилиндрических фокусирующих пьезопреобразователей / А.В. Наседкин, А.Н. Рыбьянец, И.А. Швецов, С.А. Щербинин, И.И. Лукьянов / Известия Российской академии наук. Серия физическая. - 2018. - Т. 82. - № 3. - С. 402-404.
3. <http://www.k-wave.org/>
4. Treeby Bradley E. Time Domain Simulation of Harmonic Ultrasound Images and Beam Patterns in 3D Using the k-space Pseudospectral Method / Bradley E. Treeby, Mustafa Tumen, B. T. Cox // Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention. MICCAI 2011. - Springer, 2011.
5. Langtangen Hans Petter. Solving PDEs in Python / Hans Petter Langtangen. Anders Logg. - Springer, 2017.

**THERMOELECTRIC PROPERTIES OF THE $\text{Bi}_{1.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Te}_3$ COMPOUND
SPS-PREPARED AT DIFFERENT TEMPERATURES**M.N. Yaprincev¹, A.E. Vasil'ev², O.N. Ivanov³, M.V. Zhezhu⁴¹Cand. phys. and math. sci., yaprintsev@bsu.edu.ru²Post graduate student, 748070@bsu.edu.ru³Dr. phys. and math. sci., prof., ivanov.oleg@bsu.edu.ru⁴Post graduate student, 1214239@bsu.edu.ru

Belgorod State University

Patterns in changes of the microstructure (grain structure) and the thermoelectric properties of the *n*-type grained $\text{Bi}_{1.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Te}_3$ compound, spark-plasma-sintered at different temperatures ($T_S = 690, 720, 735, 750, 780, \text{ and } 810 \text{ K}$), have been studied in detail. All the samples studied were highly textured along 001 direction parallel to the pressing direction. The highest value of the thermoelectric figure-of-merit equal to ~ 0.73 for the perpendicular measuring orientation was found for the sample sintered at 750 K.

Keywords: thermoelectric properties, $\text{Bi}_{1.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Te}_3$ compound, spark plasma sintering.

Various physical and technological approaches are developing and improving to optimally combine of the Seebeck coefficient (S), the specific electrical resistivity (ρ) and the thermal conductivity (k) and, hence, to maximize the thermoelectric figure-of-merit (ZT) of the Bi_2Te_3 -based compounds. One of modern technological ways to prepare such compounds is spark plasma sintering [1]. The purpose of this paper is to find and analyze the patterns of the spark plasma sintering temperature effect on the thermoelectric properties of the *n*-type grained $\text{Bi}_{1.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Te}_3$ compounds.

Microwave-solvothermal synthesis and spark plasma sintering were applied to prepare the grained $\text{Bi}_{1.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Te}_3$ samples. Spark plasma sintering method by using a SPS-25/10 system was applied to compact the synthesized powder at pressure of 40 MPa and sintering time of 150 s. Different SPS temperatures, T_S , equal to 690, 720, 735, 750, 780, and 810 K were used.

It was found that all the bulk samples are highly textured along 001 direction parallel to the pressing direction. Texturing observed is related to crystal structure features of the Bi_2Te_3 -based compounds. Orientation factor characterizing a texturing degree and estimated from XRD patterns happened to be weakly T_S -dependent. Average grain size measured along the SPS pressing direction was far less as compared to that measured in the perpendicular direction.

A strong anisotropy in the specific electrical resistivity and the total thermal conductivity at measurements along directions parallel and perpendicular to the SPS-pressing direction was found. The thermoelectric properties for the perpendicular measuring orientation happen to be better as compared to those for the parallel measuring orientation. All the thermoelectric properties, measured within 280-620 K range, were found to be T_S -dependent. With increasing T_S , ρ was gradually decreasing, whereas k_t is gradually increasing. In addition, ρ is gradually increasing with increasing measuring temperature for all the samples. This behavior is characteristic of metals or degenerate semiconductors. All the $k(T)$ curves were found to be rather complicated. The minima located at $\sim 430 \text{ K}$ can be attributed to changing in the thermal conductivity mechanisms. Contributions from crystal lattice, carriers and bipolar conductivity were taken into account to analyze in changing in the $k(T)$ curves for the samples sintered at different T_S . In contrast to T_S -effect on ρ and k , S was nonmonotonically changing with increasing T_S . Owing to the highest S and the low enough ρ , the highest power factor was observed for the sample sintered at 750 K. And vice versa, the sample sintered at 690 K has the highest ρ and one of the lowest S among all the samples, that in turn results in the lowest power factor in this sample.

Finally, the ρ , S and k values were used to plot the $ZT(T)$ dependences for the samples sintered at different T_S (Fig.).

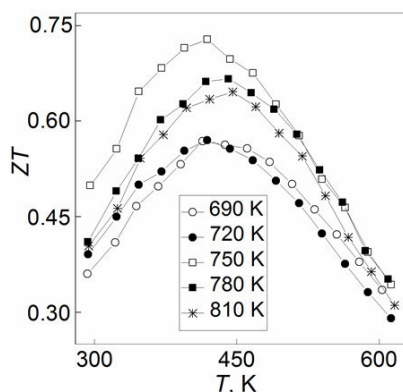


Figure. Temperature dependences of ZT for different T_S

All the $ZT(T)$ dependences have clear maxima positioned at temperature of ~ 430 K. These maxima can be obviously related to onset of the intrinsic conductivity at high temperatures. The intrinsic conductivity is harmful for the thermoelectric efficiency enhancement. The T_S - effect on the thermoelectric figure-of-merit of the grained $\text{Bi}_{1.9}\text{Gd}_{0.1}\text{Te}_3$ compounds is clearly expressed. The highest ZT value equal to ~ 0.73 was observed for the sample SPS-sintered at $T_S = 750$ K. Although this sample possesses mean thermal conductivity value among other samples, its highest power factor is dominant source favoring to the ZT maximization.

M.N. Yaprıntsev thanks the Ministry of Education and Science of the Russian Foundation for Basic research for the financial support under project No 18-32-00415.

References

1. Bhamre S.D. Enhanced thermoelectric performance in spark plasma textured bulk n -type $\text{BiTe}_{2.7}\text{Se}_{0.3}$ and p -type $\text{Bi}_{0.5}\text{Sb}_{1.5}\text{Te}_3$ /S.D. Bhamre, D. Pravarthana, W. Prellier, J.G. Noudem // Appl. Phys. Lett. – 2013. – V.102. P. 2190-1-5.

УДК 541.123.3

ПРОВОДИМОСТЬ ПО ЛОКАЛИЗОВАННЫМ СОСТОЯНИЯМ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $\text{TlGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$

Р.М. Сардарлы, Ф.Т. Салманов, Н.А. Алиева
famin-salmanov@rambler.ru

Институт Радиационных Проблем Национальной Академии Наук Азербайджана

В настоящей работе, представлены результаты исследований электропроводности твердых растворов $\text{TlGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$. Измерения выполнены для составов $x=0; 0,1; 0,2; 0,3$ в температурной области 100-300К и частотном интервале 20 – 10^6 Гц. Термографометрические исследования, показали наличие растворимости в исследуемой системе твердых растворов. Область растворимости находится при значениях $x=0\div 0,3$ и при $x=0,7\div 1$. В концентрационной области со значениями x между 0,3 и 0,7 имеет место раствор эвтектического типа. Целью настоящей работы явилось установление механизма проводимости твердых растворов $\text{TlGa}_{1-x}\text{In}_x\text{Se}_2$ в концентрационной области $x=0\div 0,3$, а также.

На рис.1 и 2 приводится температурная зависимость проводимости в Арениусовых координатах и в координатах Мотта, как видно из рисунка 1 общим для всех исследуемых кристаллов твердых растворов, для зависимостей $\sigma(T)$, является наличие двух участков в температурной зависимости изменения удельной проводимости. В области высоких температур (170–250К) зависимость $\sigma(T)$ носит экспоненциальный характер и связана с проводимостью по делокализованным состояниям, то есть, проводи-

мость осуществляется при помощи термовозбужденных примесных носителей заряда в зону проводимости. По мере убывания температуры происходит процесс убывания концентрации примесных носителей заряда, при температурах же ниже 170К, особенность температурной зависимости проводимости связана с вымораживанием примесных носителей заряда. Монотонное уменьшение наклона кривой $\sigma(1/T)$, связана с проводимостью по локализованным состояниям с участием фононов [1-6]. Особенностью температурной зависимости проводимости исследованных смешанных кристаллов $TiGa_{1-x}In_xSe_2$ является сильная зависимость величины проводимости к изменению температуры, что позволяет рассматривать исследуемую систему твердых растворов, как перспективные термочувствительные материалы.

Проведенные исследования температурной зависимости проводимости показали, что в исследуемых составах твердых растворов $TiGa_{1-x}In_xSe_2$ наблюдается перескоковый механизм проводимости по локализованным состояниям с переменной длиной прыжка с участием фононов. Расчеты параметров прыжковой проводимости, выполненные в рамках приближения Мотта показали, значительное изменение параметров прыжковой проводимости в твердом растворе при сравнении с крайними составляющими раствора. Такое значительное изменение параметров характеризующих прыжковую проводимость, может свидетельствовать наличии дополнительных видов неупорядоченностей, что является причиной возникновения дополнительных локализованных состояний в запрещенной зоне.

Проведенные исследования температурной и частотной зависимости переноса заряда в образцах твердых растворов $TiGa_{1-x}In_xSe_2$ позволили установить температурные и частотные области существования проводимости по локализованным состояниям. Твердые растворы представляют собой систему с неупорядоченной кристаллической решеткой. В работе анализируются причины ответственные за прыжковый характер проводимости в смешанных кристаллах.

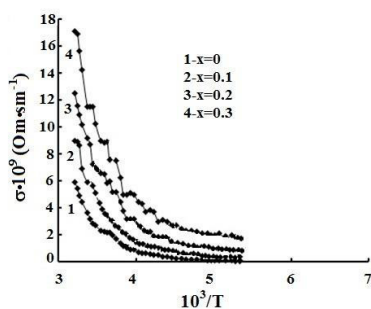


Рис.1. Температурная зависимость удельной проводимости составов $TiGa_{1-x}In_xSe_2$, где кривая: 1- $x=0$; 2 – 0.1; 3 – 0.2; 4 – 0.3

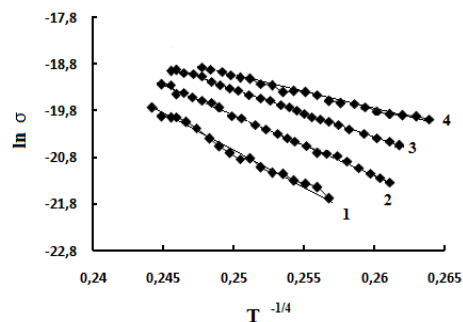


Рис.2. Температурная зависимость удельной проводимости составов $TiGa_{1-x}In_xSe_2$, где кривая: 1 - $x=0$; 2 – 0.1; 3 – 0.2; 4 – 0.3 в координатах Мотта

Литература

1. Sardarly R.M., Samedov O.A., Abdullaev A.P., Salmanov F.T., Urbanovic A., Garet F., Coutas J-L. Japanese Journal of Applied Physics, 50 (2011) 05FC09 1-2.
2. Sheleg A.U., Zub E.M., Yachkovskii A.Ya., Mustafayeva S.N. and Kerimova E.M. "X-ray diffraction study of $(TiInSe_2)_{1-x}(TiGaTe_2)_x$ crystal system" Crystallography Reports", 2012, vol.57, no.2, pp.283-285.
3. Mustafayeva S.N., Kerimova E.M., Abidinbekov S.S., Aliyeva L.N., Hasanov A.I., Jafarova S.G. "Electrophysics of $(TiInSe_2)_{0.1}(TiGaTe_2)_{0.9}$ " ICTRE-2012, N.68, pp.332-334.
4. Panich A.M., Sardarly R.M. "Physical Properties of the Low Dimensional A^3B^6 and $A^3B^3C^6_2$ Compounds" <Nova Science Publishers> NY, 2010, p.310.
5. Alekseyev I.V., Rozov S.V. Nuclear radiation detector. Patent No. 80070, 2009 (in Russian).
6. Sardarly R.M., Samedov O.A., Abdullaev A.P., Guseinov E.K., Salmanov F.T., Safarov G.R. FTP, 44, 610 (2010) (in Russian).

VII. АКУСТИЧЕСКАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ

УДК: 621.78

ЭФФЕКТИВНАЯ ТОЛЩИНА ПЛОСКОЙ ГОМОГЕННОЙ ОГРАНИЧЕННОЙ ЗАЩИТЫ

А.Н. Панюшкин¹, Н.Н. Панюшкин²

¹Инженер 1-ой категории alpanvw@gmail.com

Научное конструкторско-технологическое бюро «Феррит»

²Д-р техн. наук, профессор, npan@yandex.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет»

Предложена модель эффективной толщины плоской однородной ограниченной защиты, которая может быть использована для определения локальных дозовых нагрузок элементов бортовой аппаратуры, размещенной в прямоугольных кожухах на поверхности космических аппаратов. Проведенные численные эксперименты показали, что для практически используемых геометрических размеров ограниченных защит эффективная толщина может превышать физическую толщину примерно на порядок.

Ключевые слова: защита, ионизирующее излучение, локальная дозовая нагрузка, космический аппарат.

В настоящее время существует большое количество зарубежных [1-3] и отечественных программ [4], позволяющих оценить ослабление дозы ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства (КП) за ограниченными защитами различной геометрии. В основе алгоритмов функционирования этих программ лежит использование метода Монте-Карло и его различных модификаций с учетом вида ИИ, геометрии и материала экрана. Расчеты по этим программам требуют много времени, что ограничивает их практическое применение. Разработанная математическая модель позволяет оперативно прогнозировать эффективную толщину плоской защиты с учетом её геометрических размеров. Модель является составной частью модели сплошной защиты с плоскими поверхностями, которая предназначена для определения локальной дозовой нагрузки электро-радио изделий бортовой аппаратуры, расположенной на поверхности космических аппаратов.

Эффективная толщина защиты определена среднее значение толщины поглощающего слоя размером от 0 до x_{MAX} и от 0 до y_{MAX}

$$d_{EFF} = \frac{1}{x_{MAX} y_{MAX}} \int_0^{x_{MAX}} \int_0^{y_{MAX}} d(x, y) dx dy,$$

где x_{MAX} , y_{MAX} – максимальные линейные размеры элемента поглощающего слоя вдоль осей ox и oy соответственно. Эффективная толщина защиты d_{EFF} связана с физической толщиной поглощающего слоя d_0 через коэффициент эффективности k_{EFF}

$$d_{EFF} = k_{EFF} d_0.$$

Получено выражение для коэффициента эффективности в виде

$$k_{EFF} = \frac{l_0^2}{x_{MAX} y_{MAX}} \int_0^{\alpha_{MAX}} \int_0^{\beta_{MAX}} \frac{\sqrt{1 + tg^2 \alpha + tg^2 \beta}}{\cos^2 \alpha \cos^2 \beta} d\alpha d\beta,$$

где

$$\alpha_{MAX} = \arctg \left(\frac{x_{MAX}}{l_0} \right); \quad \beta_{MAX} = \arctg \left(\frac{y_{MAX}}{l_0} \right).$$

где l_0 – кратчайшее расстояние (перпендикуляр) от защиты до расчетной точки; α , β – максимальное значение угла падения в плоскостях, проходящих через расчетную точку O и оси ox и oy соответственно.

Проведенный численный эксперимент показал, что для реальных размеров прямоугольных экранов эффективная толщина защиты может превышать толщину стенки экрана примерно на порядок, в зависимости от геометрических размеров плоскости. Для сплошной защиты в форме полого куба эффективность ослабления на 28% больше, чем для защиты сферической формы.

Литература

1. Halbleib J.A. Vandevender W.H. ETRAN2. A user-oriented version of the ETRAN-18b electron-photon Monte-Carlo technique. SLA-73-0834. Sandia National Laboratories, USA. 1973.
2. Halbleib J.A. [et al.] ITS Version 3.0. The integrated TIGER series of coupled electron/photon Monte-Carlo transport codes. SAND91-1634. UC-405. Sandia National Laboratories, USA. 1992.
3. Seltzer S.M. Electron, electron –bremsstrahlung and proton depth-dose data for space-shielding applications // IEEE Trans. on Nucl. Sci. 1979. Vol. NS-26, №6. P. 21-60.
4. Зинченко В.Ф. Комплекс программ для расчета характеристик ионизирующих излучений космического пространства после прохождения защиты различной геометрии/В.Ф. Зинченко, А.А. Романенко, В.М. Ужegov// Вопросы атомной науки и техники: Сер.: Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. Вып. 1. С. 9-15.

УДК 621.78

РАСЧЕТ ЛОКАЛЬНОЙ ДОЗОВОЙ НАГРУЗКИ ВНУТРИ СПЛОШНОЙ ЗАЩИТЫ В ФОРМЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПАРАЛЛЕЛЕПИПЕДА

А.Н. Панюшкин¹, Н.Н. Панюшкин², В.К. Зольников³

¹Инженер 1-ой категории, nnpn@yandex.ru

Научное конструкторско-технологическое бюро «Феррит»

²Д-р техн. наук, профессор, nnpn@yandex.ru

³Д-р техн. наук, профессор, wkz@rambler.ru

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет»

Предложена модель для определения локальной дозовой нагрузки электрорадиоизделий расположенных внутри сплошной защиты в форме прямоугольного параллелепипеда. Модель учитывает зависимость локальной дозовой нагрузки от геометрических размеров защиты. Проведенные численные эксперименты показали хорошее соответствие результатов расчета со справочными данными, приведенными для типовых защит в форме сплошной сферы и полубесконечной плоскости.

Ключевые слова: ионизирующее излучение, доза, электрон, протон, космическое пространство, космический аппарат.

Дозовая деградация параметров электрорадиоизделий (ЭРИ) является основной причиной отказов радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) космических аппаратов (КА). Поэтому грамотное проектирование защиты ЭРИ от ионизирующих излучений (ИИ) космического пространства (КП) и достоверная оценка её эффективности является приоритетной задачей для разработчиков РЭА КА. Целью проектирования защиты является получение для каждого ЭРИ максимально допустимого значения локальной дозовой нагрузки (ЛДН). Для расчета ЛДН рекомендуется использование лучевого метода или метода секторирования [1]. В соответствии с этими методами для каждого вида ИИ КП производят расчет величины ЛДН. Суммарная доза от всех видов ИИ определяется сложением доз, полученных от каждого вида ИИ. Расчет ЛДН производят в центре защитного экрана, полагая его форму сферической. Из расчетной точки проводят N лучей, равномерно распределенных в пространстве, т.е. телесные углы полагаются одина-

ковыми. Количество лучей N должно быть таким, что в пределах каждого телесного угла, ограниченного лучами, толщину стенки защиты можно было считать постоянной.

Практически используемые защиты имеют форму сплошного прямоугольного параллелепипеда, поэтому телесные углы могут отличаться на порядок и толщину защиты в пределах каждого телесного угла нельзя считать постоянной из-за зависимости толщины поглощающего слоя от угла падения ИИ на плоскость защиты. Предлагаемая модель позволяет проводить расчет ЛДН с учетом геометрии защиты и зависимости эффективной толщины стенок от угла падения ИИ.

Результаты расчета ЛДН для сплошной алюминиевой защиты в форме прямоугольного параллелепипеда с толщиной стенки 4 мм показаны на рисунке. Размеры всех горизонтальных ребер приняты одинаковыми $a=b=100$ мм. Размер вертикальных ребер менялся в диапазоне от 10 мм до 1000 мм, при этом отношение размеров горизонтальных ребер к вертикальным a/d изменялся в диапазоне от 0,1 до 10. Расчет годовой ЛДН проводился в центре экрана для случая совместного воздействия электронов и протонов. На этом же графике представлены справочные данные для типовых защит в форме сплошной сферы и в форме полубесконечной плоскости [2]. Из графика видно, что ЛДН имеет максимум при $a=d$, что соответствует экрану в форме куба. При увеличении или уменьшении относительной высоты параллелепипеда ЛДН снижается, стремясь к значению, соответствующему полубесконечной плоскости. Таким образом, результаты расчета ЛДН по предложенной модели хорошо согласуются со справочными данными для защит в форме сплошной сферы и полубесконечной плоскости.

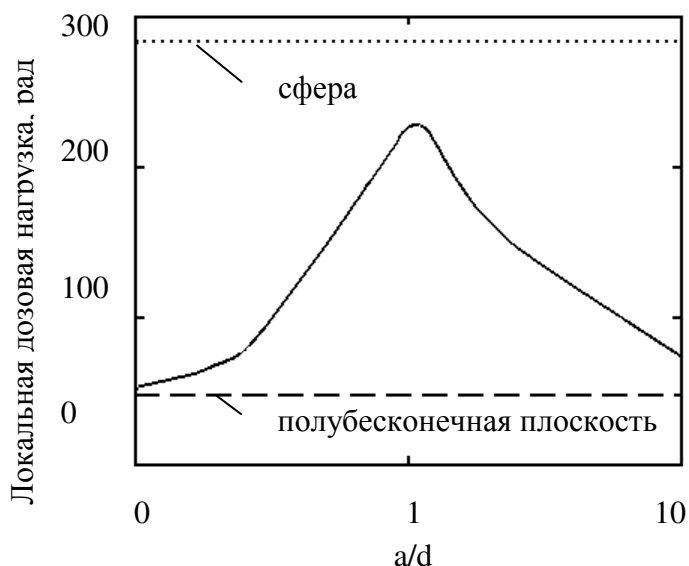


Рисунок. Зависимость локальной дозовой нагрузки в центре прямоугольного параллелепипеда от отношения его длины (ширины) к высоте

Литература

1. ОСТ 134-1034-2003. Аппаратура, устройства, приборы и оборудование космических аппаратов. Методы испытаний и оценки стойкости бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов к воздействию электронных и протонных излучений космического пространства по дозовым эффектам.
2. Панюшкин Н.Н. Отчет о ОКР «Аппаратура управления НА «Пыль-УФ», «Расчет радиационной стойкости» ЦСКЛ.411734.006PP5.

ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛАСТОМЕРОВ

С.Г. Тихомиров¹, С.Л. Подвальный², В.И. Ряжских³, А.А. Хвостов⁴, А.В. Карманов⁵

¹Д-р техн. наук, профессор, tikhomirov_57@mail.ru

²Д-р техн. наук, профессор, spodvalny@yandex.ru

³Д-р техн. наук, профессор, kaf.pmath@yandex.ru

⁴Аспирант, andrikar93@yandex.ru

¹ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»

^{2,3,5}ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

⁴ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского
и Ю.А. Гагарина»

В работе рассмотрены методы ультразвукового контроля предела прочности при разрыве и вязкости по Муни эластомеров с учетом разработанной процедуры минимизации погрешности измерений. Проведены экспериментальные исследования, на основе которых определены оптимальные температурно-частотные условия измерений показателей: 0,6 МГц, 373К для оценки вязкости по Муни и 2,5 МГц, 293 К для предела прочности при разрыве.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, вязкость по Муни, температурно-частотные параметры, предел прочности при разрыве, эластомеры.

Одним из перспективных методов оперативного измерения показателей качества полимеров является ультразвуковой метод. Однако в случае одновременного измерения нескольких показателей качества его практическое применение затруднено, так как возникает неоднозначность трактовки результатов при различных условиях измерений (частотах и температурах) [1].

Рассмотрены способы ультразвукового контроля таких показателей качества эластомеров как предел прочности при разрыве σ_p и его вязкость по Муни M_h . В зависимости от условий измерения (частоты и температуры) возникают существенные погрешности косвенной оценки этих показателей качества ультразвуковым (УЗ) методом.

Для решения задачи снижения погрешности косвенного контроля показателей качества разработана процедура их минимизации. Сформулируем задачу оптимизации как поиск оптимальных частоты и температуры на дискретном множестве ω_i, T_i , минимизирующих оптимизации критерий вида

$$S_{M_h} = A_1 \varepsilon_{M_h}^2(\omega_i, T_i) + A_2 \xi_{M_h}^{-2}(\omega_i, T_i) \longrightarrow \min_{\omega_i, T_i} \quad (1)$$

где i - номер элемента множества ω_i, T_i , T - температура образца; ω - частота УЗ воздействия; A_1, A_2 - весовые коэффициенты;

$$\xi_{M_h} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial M_h(\alpha_i, c_i)}{\partial \alpha} \right|_{\alpha_i}\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m \left. \frac{\partial M_h(\alpha_i, c_i)}{\partial c} \right|_{c_i}\right)^2} - \text{функция чувствительности по изме-}$$

рительным каналам; m - количество точек измерения; $\omega \in (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)$; α, c - коэффициент затухания и скорость УЗ.

Оценка чувствительности осуществлялась по отношению изменения показателя качества к изменению измеряемой величины [2]. Задача выбора оптимальной частоты и температуры при оценке прочности при разрыве решалась аналогично.

Для выбора оптимальных условий измерений проведены экспериментальные исследования 9 образцов каучука СКС-30. С помощью лабораторных методов определялись M_h и образцов σ_p .

Оценка показателей качества осуществлялась по формулам (2), (3) [3-4].

$$M_h = Z_1 \cdot \left(\rho \alpha c^3 / \left(\omega^2 \cdot \left(1 + \left(\frac{\alpha c}{\omega} \right)^2 \right)^2 \right) \right)^{Z_2} \quad (2)$$

$$\sigma_p = P \cdot \left(\frac{\rho c^2 \omega^2}{\alpha h} \cdot \frac{\omega^2 - \alpha^2 c^2}{(\omega^2 + \alpha^2 c^2)^2} \right)^p \quad (3)$$

где ρ - плотность полимера; h – расстояние между плоскостями УЗ излучателей; Z_1, Z_2 , P, p – параметры, определяемые экспериментально [5].

Оценены погрешности расчетов при различных частотах и температурах измерения. Анализ данных показал, что выбранные по критерию (1) условия измерения обеспечивают наилучшие метрологические характеристики.

Найденные таким образом частоты и температуры (0,6 МГц, 373К для оценки M_h и 2,5 МГц, 293 К для σ_p) являются оптимальными для определения M_h и σ_p в исследуемых температурно-частотных диапазонах. Предложенная методика может быть использована для оценки показателей качества полимеров на измерительных установках, реализующих различные температурно-частотные режимы.

Литература

1. Перепечко И. И. Акустические методы исследования полимеров. – М.: Химия. – 1973. – 296 с.
2. Назаров Н. Г. Метрология. Основные понятия и математические модели. – М.: Высш. шк., 2002. – 348 с.
3. Патент на изобретение RUS 2319956. Способ ультразвукового контроля вязкости по Муни полимеров / Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А., Хаустов И.А., Баранкевич А.А., Зайчиков М.А. Оpubл. 15.03.2006.
4. Патент на изобретение RUS 2319957. Способ ультразвукового контроля предела прочности при разрыве полимеров / Битюков В.К., Тихомиров С.Г., Хвостов А.А., Баранкевич А.А., Зайчиков М.А. Оpubл. 15.03.2006
5. Битюков В.К. Контроль показателей качества эластомеров акустическим методом с учетом их частотно-температурных характеристик / В.К. Битюков, С.Г. Тихомиров, А.А. Хвостов, М.А. Зайчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2007. – № 7. – С. 55–55.

УДК 534:853.085332

АНАЛИЗ ТРАНСФОРМАЦИИ СОСТОЯНИЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

А.И. Кустов¹, И.А. Мигель²

¹Канд. техн. наук, доцент, akvor@yandex.ru

²Канд. физ.-мат. наук, доцент, vuaik@mail.ru

¹Воронежский государственный педагогический университет

²Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, Воронеж, Российская Федерация

Разработаны и предложены для анализа состояния кристаллических и диэлектрических материалов методы акустической спектроскопии. Они основаны на применении акустических волн (АВ) для формирования изображений структуры объектов на нано- и микроуровнях, на различной глубине от поверхности, на измерении значений скоростей АВ и коэффициентов их затухания.

Ключевые слова: акустические волны, методы акустической микроскопии, релаксация.

Одной из важных проблем современного материаловедения является проблема получения изотропных диэлектриков с заранее заданными свойствами и контроль их эксплуатационных свойств [1,2]. Достоинства и недостатки этих материалов связаны с их изотропностью или анизотропностью их свойств. Успешно решить проблему их ха-

рактизации возможно при использовании новых методов контроля, к которым относятся и АМД-методы [3,4]. Базой для измерений с их помощью являются режимы визуализации $V(Z)$ -кривых [5,6].

В качестве объектов исследования были выбраны диэлектрические материалы, и ЦТС-керамики - материалы, получаемые по порошковой технологии. Работоспособность пьезокерамик определяется размерами зерен, получаемых в процессе синтеза, размерами, формой и распределением пор в теле материала, уровнем однородности их структуры, значениями дисперсии свойств. При этом, определяющую роль в процессе эксплуатации играют такие параметры материалов как пористость и плотность, степень однородности их значений. При этом, на сегодня, достоверно установлено [7], что физико-механические характеристики коррелируют с электрическими.

Оценка размеров и формы зерен по акустическим изображениям позволила определить ряд прочностных характеристик ЦТС-керамик. Метод анализа полученных с помощью САМ изображений совместим с компьютерными технологиями, что позволяет экспрессно рассчитывать параметры структуры (пористость θ , плотность ρ , дисперсию размеров зерен d_z и проч.). На рис.1 представлены результаты акустической визуализации структуры пьезокерамики, пример экспериментальной $V(Z)$ - кривой пьезокерамики ЦТС-22, и связь значений пористости и диэлектрической проницаемости (рис.1в). $V(Z)$ -кривые позволяют оценивать влияние режимов термообработки на состояние материала, как кристаллического (рис.2), так и аморфного, и порошкового (рис.3).

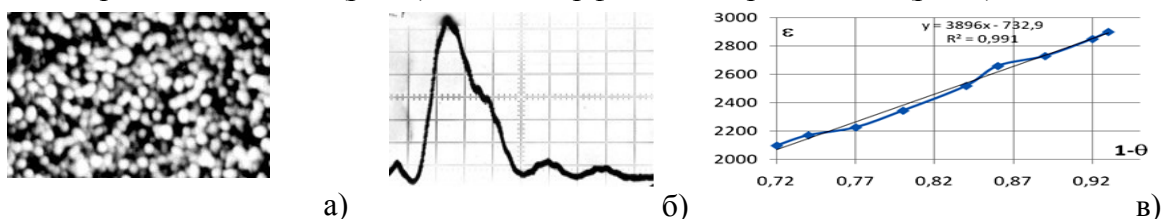


Рис. 1. Акустическое изображение зеренной структуры (а – строение пьезокерамики ЦТС-19 на глубине ~ 32 мкм (размер по горизонтали 250 мкм); б) экспериментальная кривая для ЦТС-22 (масштаб по горизонтали 5,2 мкм/ дел., по вертикали $-0,3$ В/ дел., $\Delta Z_N = 10,09$ мкм, $v_R = 2,29 \cdot 10^3$ м/с); в) корреляция диэлектрической проницаемости (ϵ) и относительной плотности ($1-\theta$) для одного из типов ЦТС- керамики

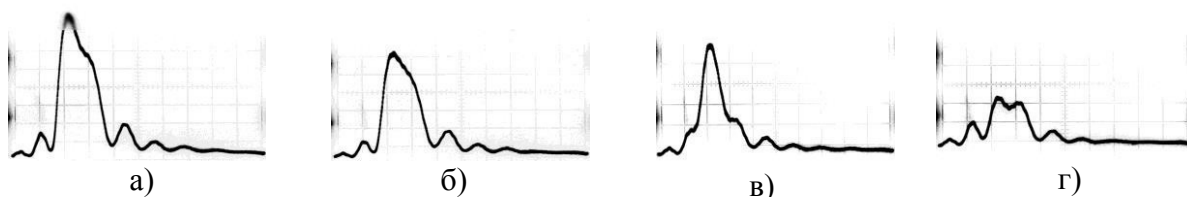


Рис. 2. Трансформация $V(Z)$ -кривой при изменении режима термообработки и временной выдержке $Ge \langle 111 \rangle$ ($v_R = 2,87 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 13,25$ мкм, $(\Delta V/V\%)_{\max} = 68\%$, масштаб по вертикали 1 дел.= 0,25 В, по горизонтали – 1 дел.= 11 мкм)

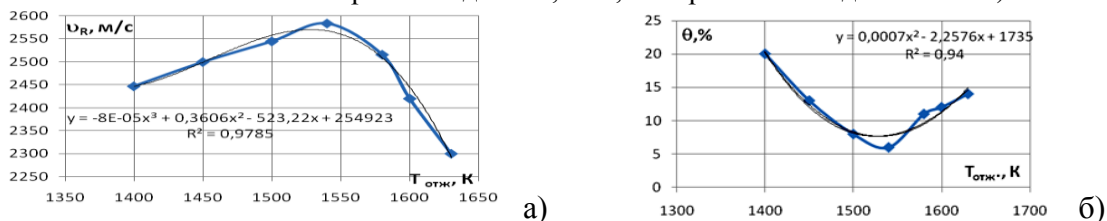


Рис.3. (а) - зависимость v_R от $T_{отж}$ ЦТС-22, полученная АМД-методом; (б) - кривая изменения пористости в зависимости от температур отжига для ЦТС- 22

Таким образом, продемонстрировано, что методы акустической спектроскопии обеспечивают экспрессный анализ состояния кристаллических и аморфных материалов.

Литература

1. Окадзаки К. Технология пьезоэлектрических диэлектриков // М., Энергия., 1976, 336 с.
2. Скороход В.В. Физико-механические свойства пористых материалов // Киев., Наук. дум., 1977, 120с.
3. Weglein R.D., Wilson R.F. Acoustic microscopy of material and surface layers // J. Appl. Phys., 1984. v.55. №9. p.3261-3275.
4. Kustov A.I., Migel I.A. Investigation of physical-mechanical characteristics of glasses by acoustic waves // Glass Physics and Chemistry, 1996 - v.22 - № 3, p. 245-247.
5. Кустов А.И., Мигель И.А. Оценка уровня свойств межзеренных границ и изучение структуры поверхностей раздела в металлических материалах методами акустомикроскопической дефектоскопии // Материаловедение, №2 (155), 2010, с.9 – 14.
6. Кустов А.И., Мигель И.А. Анализ поведения дефектных структур, возникающих в твердотельных материалах, АМД-методами. Фундаментальные проблемы современного материаловедения., Т.13., №4., 2016., с. 490 - 496.
7. Морозов А.И., Проклов В.В., Станковский Б.А. Пьезоэлектрические преобразователи для радиоэлектронных устройств. М.: Радио и связь., 1981., 197 с.

УДК 534:853.085.332

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ХАРАКТЕР РЕЛАКСАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛАХ МЕТОДАМИ АКУСТОМИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТΟΣКОПИИ

В.М. Зеленев¹, А.И. Кустов², И.А. Мигель³

¹Доктор физ.-мат. наук, профессор, akvor@yandex.ru

²Канд. техн. наук, доцент, akvor@yandex.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, vuaik@mail.ru

^{1,2}Воронежский государственный педагогический университет

³Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии им. профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, Воронеж, Российская Федерация

В работе представлены результаты изучения влияния механических и термических воздействий на параметры металлических материалов. С помощью инновационных АМД-методов исследований получены зависимости характеристик релаксационных процессов от параметров воздействий.

Ключевые слова: акустические волны, методы акустической микроскопии, релаксация

Актуальной современной задачей является задача прогнозирования хода релаксационного процесса, определения его параметров и их динамики. Её эффективное решение возможно с помощью современных методы исследования материалов - АМД-методов [1]. Они позволяют надежно выявлять корреляционные связи рассчитанных с помощью характерных $V(Z)$ -кривых [2] прочностных характеристик материалов со структурными особенностями изображений, полученных в режиме акустической визуализации [3].

На рис.1а демонстрируется акустическое изображение структуры одного из типов стали. Оно позволяет рассчитать по размеру зерна значение условного предела текучести материала [4]. На рис.1б - зависимость затухания ($\Delta V/V\%$) акустических волн в стали 15Х2НМФА от глубины зондирования (h). Используя метод $V(Z)$ -кривых [4] рассчитывали величину скорости v_R поверхностных акустических волн (ПАВ). На следующем этапе традиционными методами находили предел пропорциональности ($\sigma_{пц}$), условный предел текучести ($\sigma_{0,2}$), предел прочности (σ_B). Эти расчеты производили на базе полученной экспериментально кривой $\sigma - \varepsilon$, вариант области предельной прочности которой представлен на рис.1 в. После введения соответствующих ограничений и счета функции «Поиск решения» MS Excel получали оптимальные значения искомых вели-

чин (ε , % = 19,64394, $\sigma_B = 311,184 \cdot 10^6$ Па), которые в пределах погрешности совпадают со стандартными значениями [5].

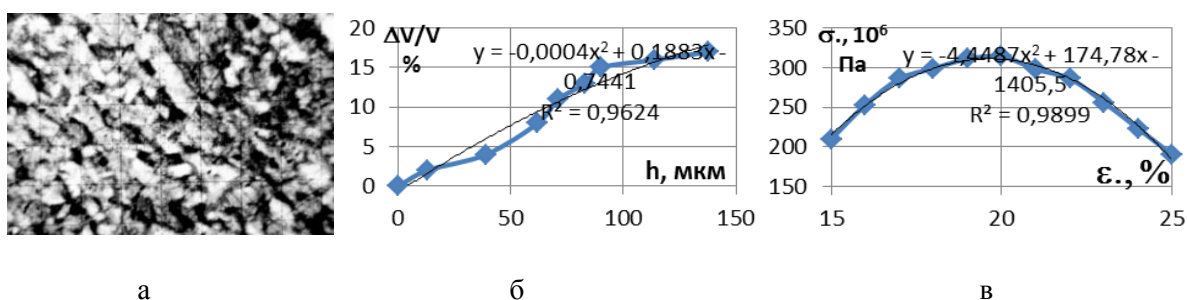


Рис. 1. Измерение акустических характеристик: а - акустическое изображение структуры стали (масштаб: 20 мкм/дел., Z = - 17 мкм; сталь 10X12H2BMФ); б - зависимость затухания ($\Delta V/V\%$) акустических волн в стали 15X2HMФА от глубины зондирования (h); в – участок кривой σ - ε для одного из сортов стали

В качестве альтернативных физических методов определения искомых параметров материалов были выбраны АМД-методы. Они позволили рассчитать для сталей значения упругих модулей E и G , величину размера зерна и условного предела текучести по скорости поверхностных акустических волн (ПАВ). Значения упругих модулей ($E = 226 \cdot 10^9$ Па и $G = 88,3 \cdot 10^9$ Па) совпали в пределах погрешности со значениями, приводимыми в известных работах [6].

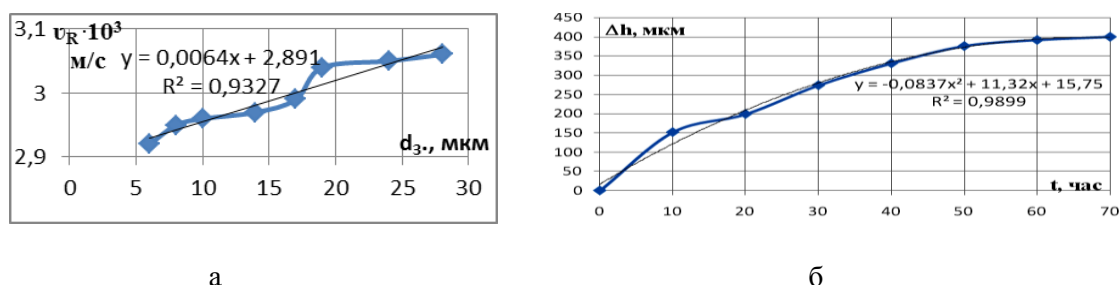


Рис. 2. а) Зависимость скорости ПАВ от размера зерна (ст. 38ХМЮА); б) зависимость толщины слоя с измененными свойствами от времени азотирования в стали (40ХНМА)

На рис.2 – результаты измерений скорости ПАВ в стали после её азотирования и расчет глубины азотирования в зависимости от времени процесса. Представленные экспериментальные результаты подтверждают эффективность АМД-методов при расчете параметров релаксационных процессов и анализе влияния на них внешних воздействий.

Литература

1. Weaver J.M.R., Plett C., Somekh M.G., Briggs G.A.D. Acoustic microscopy of Solid Materials // Metallography . 1985 . V.17 . P. 3-34.
2. Кустов А.И., Мигель И.А. Выработка критериев оценки деформации поверхности твердотельных материалов АМД-методами // Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки. - Тамбов, 2013.– Т. 18.-Вып.4.Часть 2. – 612 с. (с.1875-1877).
3. Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов // Фунд. пробл. совр.материаловед., том 11, №4/2., 2014. – с. 592 -598.
4. Кустов А.И. Мигель И.А. Изменение акустических характеристик материалов как явление, сопровождающее их пластичность и разрушение // Вестник Тамбовского университета. Сер. Ест. и техн. науки. – Тамбов, 2016. – Т.21. – Вып.3. – 1464 с. (с. 1097-1101).
5. Физические величины: справочник / А.П.Бабичев, Н.А. Бабушкина, и др.; п/р И.С.Григорьева и Е.З. Мейлихова. – М.; Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
6. AddaY.,et. al. La diffusion dans les solides. Paris:Press Univers. de France, 1966, vol.2., p. 87-95.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕГРАДАЦИИ ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МАТЕРИАЛОВ В ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ПРОЦЕССАХ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МЕТОДАМИ АКУСТОМИКРОСКОПИЧЕСКОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ

В.М. Зеленов¹, А.И. Кустов², И.А. Мигель³

¹Доктор физ.-мат. наук, профессор, akvor@yandex.ru

²Канд. техн. наук, доцент, akvor@yandex.ru

³Канд. физ.-мат. наук, доцент, vuaik@mail.ru

^{1,2}Воронежский государственный педагогический университет,

²Военный Учебно-Научный Центр ВВС Военно-Воздушной Академии им. Профессора Н.Е.Жуковского и Ю.А.Гагарина, Воронеж, Российская Федерация

В работе продемонстрирована эффективность методов акустомикроскопической дефектоскопии или АМД-методов для исследования процесса деградации физических параметров материалов. Характеристики измеряются как в непрерывном режиме, так и на длительных временных промежутках, что обеспечивает выявление предельных состояний материалов.

Ключевые слова: анализ деградации, акустомикроскопическая дефектоскопия, физические параметры.

Накопление определенного уровня одного или нескольких параметров материала может приводить к катастрофическому разрушению. Поэтому, актуальной является проблема мониторинга трансформации свойств. О переходе в предельное состояние (ПС) говорят в том случае, если материал под влиянием внешних факторов необратимо изменяет параметры физико-механических свойств, и происходит это за счет активизации структурной характеристики, не являвшейся ранее существенной [1]. Решить задачи, направленные на разработку способов определения количественных характеристик ПС, позволяют методы акустомикроскопической дефектоскопии [2]. С их помощью можно формировать акустические изображения на различной глубине или анализировать специфические интерференционные кривые, полученные в акустических волнах (АВ). Пример акустического изображения для стали представлен на рис.1а.

Целью исследований было изучение изменений характеристик АВ ($\Delta V/V\%$ и v_R) в процессе деградации физических параметров материалов. Качество акустических изображений связано с коэффициентами отражения и трансформации АВ. Поэтому, на акустических снимках различные по степени деформации и кристаллографической ориентации зерна (см. рис.1а) за счет акустического контраста проявляются как отдельные образования.

В ходе исследований производилась характеристика областей, образовавшихся при деформационных воздействиях, для чего применялся метод $V(Z)$ -кривых. С его помощью для каждого материала, рассчитывали значения скорости v_R поверхностных акустических волн (ПАВ), чувствительную к параметрам ПС. Величина v_R , а также высота главного максимума $V(Z)$ -кривых – информативные характеристики объекта, позволяющие рассчитывать как значения упругих модулей E и G , так и плотности, пористости. По форме $V(Z)$ -кривых рассчитывали и значения предела текучести $\sigma_{0,2}$ [2].

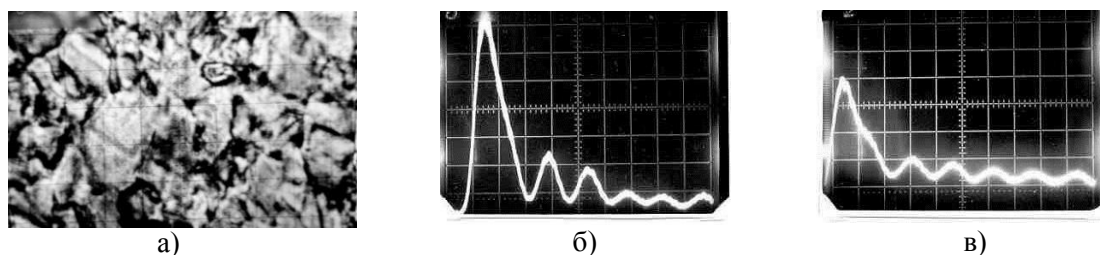


Рис.1. Акустомикроскопическая визуализация структуры стали со степенью деформации 50%, проявленной за счет градиента акустического контраста (шлиф перпендикулярен плоскости прокатки; H_2O , $Z = -14$ мкм, масштаб 40 мкм/дел.) – а); трансформация (б и в) $V(Z)$ -кривой стали 30XГСМЛ ($v_R = 3,18 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 14,68$ мкм, $(\Delta V/V\%)_{\max} = 37\%$, при выдержке после цементации (при 780°C), 120 часов, масштаб по вертикали 1 дел.=0,25 В, по горизонтали – 1 дел.=12,2 мкм)

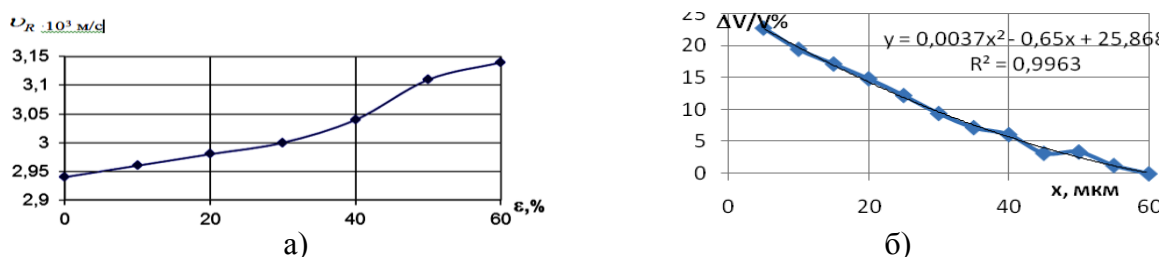


Рис. 2. Зависимость v_R от степени деформации (а), для стали 30XГСМЛ ($v_R = 3,18 \cdot 10^3$ м/с, $\Delta Z_N = 14,68$ мкм; изменение $(\Delta V/V\%)_{\max}$ в никеле (Н0) после деформационного воздействия (б)

При деформации объектов (из меди М1) наблюдали зависимость величины суммарной деформации и величины коэффициента поглощения АВ в образцах от времени (рис.3 а и б).

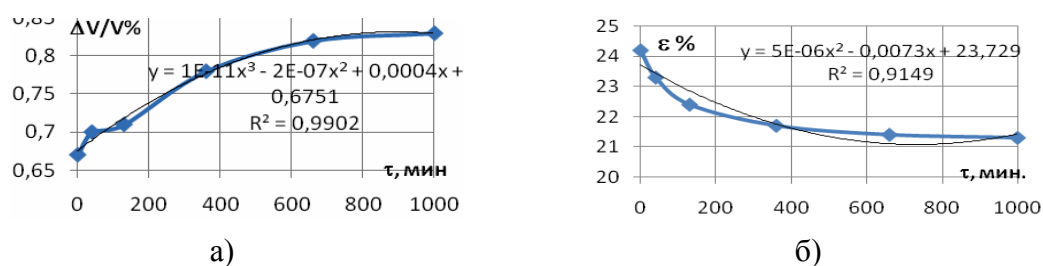


Рис.3. Изменение коэффициента поглощения АВ Cu-провода от времени после деформации со скоростью 7,7 %/мин.) и зависимость суммарной деформации при разрыве от времени (Cu – проволока; $\varnothing=1,1$ мм, $l=70$ мм; закалка от 380°C до -50°C)

Экспериментально подтверждена эффективность АМД-методов при исследовании процессов деградации физических параметров материалов.

Литература

- Ирвин, Д.Ж. Основы теории роста трещин и разрушения / Д.Ж Ирвин, П.Парис // Разрушение. Т.3. / под ред. Г. Либовиц. – М.: Мир, 1976. – С. 17–66.
- Кустов А.И., Мигель И.А. Определение параметров упрочнения или восстановления свойств поверхности материалов с помощью инновационных методов физического эксперимента – АМД-методов // ФПСМ, том 11, №4/2., 2014. – с. 592 -598.

**АКУСТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВОЙНИКОВЫХ ГРАНИЦ С ТОЧЕЧНЫМИ ДЕФЕКТАМИ В МАРТЕНСИТНОЙ ФАЗЕ
МОНОКРИСТАЛЛОВ Ni-Fe-Ga**

К.В. Сапожников¹, В.И. Николаев², В.М. Крымов³, С.Б. Кустов⁴

¹Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., k.sapozhnikov@mail.ioffe.ru

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

²Канд. физ.-мат. наук, в.н.с., зав.лаб., nkvlad@inbox.ru

³Канд. физ.-мат. наук, с.н.с., V.Krymov@mail.ioffe.ru

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

⁴Канд. физ.-мат. наук, профессор, Sergey.Kustov@uib.es

Департамент физики, Университет Балеарских островов, Пальма, Испания

Упругие и неупругие свойства мартенситной фазы сплава $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$, подвергнутого различной термической обработке, исследованы на ультразвуковых частотах около 100 кГц в диапазонах температур 12 - 370 К и амплитуд колебательной деформации 10^{-7} - 10^{-4} . Обнаружено сильное влияние термообработки на все исследованные свойства, обусловленное закреплением двойниковых границ подвижными точечными дефектами. Выявлены температурные стадии закрепления двойниковых границ, которые можно связать с дивакансиями и моновакансиями.

Ключевые слова: сплав Ni-Fe-Ga, мартенсит, внутреннее трение, модуль Юнга, двойниковые границы, вакансии.

Ni-Fe-Ga alloys belong to a family of functional ferromagnetic shape memory alloys. Thermal treatment along with composition changes are the simplest means of controlling the functional properties of Ni-Fe-Ga alloys. Changes in the degree of atomic order and precipitation of γ phase are usually considered as factors determining the properties of Ni-Fe-Ga alloys, while the role of point defects, in particular, quenched-in vacancies, is either ignored or analyzed in terms of their impact on the ordering process. However, point defects are among the main factors affecting the mobility of linear and planar defects and thereby the functional properties of alloys. Recently, we have found that quenching of $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$ single crystals from an annealing temperature to the martensitic phase leads to a phenomenon of hyperstabilization of the martensitic phase that has been explained by sweeping of quenched-in point defects by moving interphase boundaries during reverse transformation [1]. It has been also shown that the concentration of vacancies in a Ni-Fe-Ga alloy changes upon thermal treatment in very broad limits and reaches up to 2500 ppm in samples quenched from high temperatures [2].

This work is devoted to study of the elastic (effective Young's modulus) and anelastic (linear and non-linear internal friction, Young's modulus defect, anelastic strain) properties of $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$ alloy, subjected to different heat treatments, by means of resonant piezoelectric composite oscillator technique at frequencies around 100 kHz, temperatures of 12-370 K and strain amplitudes between 10^{-7} and 10^{-4} . Samples were cut from rod-shaped $\text{Ni}_{55}\text{Fe}_{18}\text{Ga}_{27}$ single crystals with $[100]_A$ orientation along the rod. After annealing for 20 min. at 970 K, the samples were subjected to three different heat treatments: 1) slow cooling in the air; 2) direct quenching into room-temperature water; 3) step-quenching (quenching into oil at 390 K followed by quenching into room-temperature water). The samples cooled in air were characterized by the forward and reverse martensitic transformation temperatures about 330 and 340 K, respectively, and the Curie temperature of $T_c = 290$ K. The samples directly quenched into water were in a hyperstabilized state, where a small fraction of martensite exhibited reverse transformation near 400 K, while the main fraction required overheating up to a temperature about 580 K [1]. The magnetic transformation after quenching becomes smeared and shifts to

$T_c \approx 270$ K. The martensitic phase of the alloy, as analyzed by TEM, presents at room temperature a mixture of 7-layered (14M) and non-modulated (2M) structures.

It has been shown that elastic and anelastic properties of the Ni-Fe-Ga alloy depend crucially on the thermal treatment because of strong pinning of twin boundaries by quenched-in point defects. The amplitude dependence of the internal friction, Young's modulus defect and amplitude of reversible anelastic strain demonstrates stages corresponding to motion of twin boundaries inside extended point defect atmospheres, breaking the twin boundaries through the atmospheres and their oscillations outside the atmospheres [3]. It is concluded that vacancies form atmospheres near twin boundaries, the density of which (but not their extension) strongly depend on the concentration of vacancies. Two stages are revealed in the temperature dependences of the elastic and anelastic properties of the alloy that can be associated with pinning/depinning of twin boundaries by/from different point defects, most probably divacancies and monovacancies. Experimental data evidence that point defect diffusion is defect-assisted, proceeding largely within lattice regions adjacent to twin boundaries over the entire temperature range under study. Studying the effect of temperature on the amplitude dependence of anelastic properties of the alloy enables us to follow the evolution of the point defect distribution in atmospheres around twin boundaries.

This work was supported by Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project no. 3.1421.2017/4.6.

Литература

1. Kustov S. Mechanical spectroscopy of hyperstabilized martensites / S.B. Kustov, R. Santamarta, E. Cesari, K. Sapozhnikov, V. Nikolaev, V. Fedorov, V. Krymov, J. Van Humbeeck // *Solid State Phenom.* – 2012. - V. 184. - P. 355–360.
2. Unzueta I. Experimental observation of vacancy-assisted martensitic transformation shift in Ni-Fe-Ga alloys / I. Unzueta, D. Alonso de R-Lorente, E. Cesari, V. Sánchez-Alarcos, V. Recarte, J.I. Pérez-Landazábal, J.A. García, F. Plazaola // *Phys. Rev. Lett.* - 2019. - V. 122. - P. 165701 (1-7).
3. Сапожников К.В. Влияние термической обработки на упругие и неупругие свойства монокристаллов сплава $Ni_{55}Fe_{18}Ga_{27}$ / К.В. Сапожников, В.И. Николаев, В.М. Крымов, С.Б. Кустов // *Письма в ЖТФ* - 2019. - Т. 45. - В. 6. - С. 43-46.

Научное издание

**РЕЛАКСАЦИОННЫЕ ЯВЛЕНИЯ
В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ**

МАТЕРИАЛЫ XXIV МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(г. Воронеж, 24-27 сентября 2019 г.)

В авторской редакции

Подписано в печать 06. 09. 2019.
Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.
Усл. печ. л.12,8. Тираж 350 экз. Зак. № 90.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394026 Воронеж, Московский пр., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ
394026 Воронеж, Московский пр., 14