Международный семинар
"Фазовые переходы и
неоднородные состояния в оксидах"
International Workshop PTISO22

Программа и сборник тезисов

4-8 июля 2022 года
Казань, Россия

Казань – 2022

Программа и сборник тезисов: Международный семинар "Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах" International Workshop PTISO22. 4-8 июля 2022 года. Казань, Россия. – Казань: 2022 год. - 100 страниц.

В этой книге приводится программа и полный список тезисов приглашенных и устных докладов, а также постеров, которые будут представлены на Международном семинаре "Фазовые переходы и неоднородные состояния в оксидах" International Workshop PTISO22. Семинар пройдет в Казани (Россия) с 4 по 8 июля 2022 года.

Организаторы:

Министерство науки и образования РФ
Научный совет РАН по физике конденсированных сред
Казанский Федеральный Университет
Казанский физико-технический институт им.
Е.К. Завойского - ОСП ФИЦ КазНЦ РАН
ООО «Персона Грата»

Председатели оргкомитета Международного семинара:

Кукушкин И.В., академик РАН, ИФТТ РАН
Сигов А.С., академик РАН, РТУ «МИРЭА»

Зам. председателей оргкомитета Международного семинара:

Мамин Р.Ф., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН
Таюрский Д.А., КФУ

Главный ученый секретарь Международного семинара:

Зиганшина С.А., ФИЦ КазНЦ РАН

Программный комитет:

Сигов А.С., академик РАН, РТУ «МИРЭА» (председатель)
Мамин Р.Ф., с.н.с., КФТИ - ФИЦ КазНЦ РАН (зам. председателя)
Кведер В.В., академик РАН, ИФТТ РАН
Кукушкин И.В., академик РАН, ИФТТ РАН
Пудалов В.М., член-корреспондент РАН, ФИАН
Таюрский Д.А., профессор, КФУ

Сопредседатели:

Калачев А.А., ФИЦ КазНЦ РАН
Таюрский Д.А., КФУ

Заместители председателей:

Мамин Р.Ф., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН
Хантимеров С.М., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

Локальный организационный комитет:

Гаврилова Т.П., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН
Гафуров М.Р., КФУ
Зиганшина С.А., ФИЦ КазНЦ РАН
Вавилова Е.Л., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН
Камашев А.А., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН
Юсупов Р.В., КФУ
Шапошникова Т.С., КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН

ПРОГРАММА

Воскресенье, 3 июля

16.00 – 18.00 – Регистрация (Ногай)

Понедельник, 4 июля

8.00 – 9.00 – Регистрация («Ногай»)

9.00 – 9.20 Открытие («Ногай»)

Председатели: Кведер В.В., Сигов А.С., Таюрский Д.А., Калачев А.А.

Устные заседания

9.20 – 10.50 Пленарное заседание Председатель: **Сигов А.С.** 1. Пудалов В.М. «Квазидвумерный сверхпроводник с ферромагнитными слоями $EuRbFe_4As_4$» (Пленарный) – 45 минут 2. Рязанов В.В. «Совместное влияния сверхпроводящего и магнитного эффектов близости вблизи интерфейсов сверхпроводник - нормальный металл и нормальный металл - ферромагнетик в гибридных джозефсоновских структурах» (Пленарный) – 45 минут
10.50 – 11.30 - Кофе-брейк
11.20 – 12.50 Устное заседание Председатель: **Пудалов В.М.** 1. Андрияхина Е.С. «Взаимодействие неелевского скирмиона и пирловского вихря» (Приглашенный) – 40 минут 2. Ахматханов А.Р. «Управление наклоном заряженных доменных стенок в монокристаллах ниобата лития» - 30 минут 3. Зотов А.В. «Исследование мемристивных свойств халькогенидных структур» - 20 минут
12.50 – 14.30 обед
14.30 – 16.00 Устное заседание Председатель: **Воротилов К.А.** 1. Командин Г.А. «Электродинамика тонких проводящих и диэлектрических пленок в терагерцовом и инфракрасном диапазонах» (Приглашенный) - 40 минут

2. Павлов Н.С. «Аномальная кислородная металлическая зона в потенциальном сверхпроводнике $KCa_2Fe_4As_4O_2$» - 30 минут
3. Слободчиков А.А., «Электронная структура и минимальные модели для плоского и гофрированного монослоев CuO: *первопринципное* исследование» - 20 минут

16.00 – 16.30 Кофе-брейк

16.30 – 18.00
Устное заседание
Председатель: **Мельников А.С.**

1. Некрасов И.А. «Универсальность обратного магнитокалорического эффекта вблизи магнитной трикритической точки в металлах» (Приглашенный) – 40 минут
2. Гумарова И.И. «Ab initio исследование электронных и магнитных свойств гетероструктур на основе оксидов переходных металлов» - 30 минут
3. Загидуллина А.Э. «Ab initio исследование электронных свойств гетероструктур на основе сегнетоэлектриков» - 20 минут

18.40 – 21.00 - Welcome party

Вторник, 5 июля

9.00 – 10.40
Устное заседание
Председатель: **Вахрушев С.Б.**

1. Шур В.Я. «Заряженные доменные стенки в одноосных сегнетоэлектриках» (Приглашенный) - 40 минут
2. Юрлов В.В. – 20 минут
3. Гамзатов А.Г. «Влияние размера гранул на частотную стабильность магнитокалорического эффекта в манганитах в циклических магнитных полях» - 20 минут

10.40 – 11.10 Кофе-брейк

11.10 – 13.00
Устное заседание
Председатель: **Некрасов И.А.**

1. Мельников А.С. «Индуцированная сверхпроводимость в низкоразмерных системах» (Приглашенный) – 40 минут
2. Гуртовой В.Л. «Квантовые состояния Al-AlO_x-Ti-Pt дифференциального двухконтурного интерферометра» - 30 минут

3. Таркаева Е.В. «Индуцированная электрическим импульсом сверхпроводимость в метастабильном состоянии 1T−$TaS_{2-x}Se_x$» - 20 минут
4. Могилюк Т. И. «Second harmonics of magnetic quantum oscillations in layered metals» - 20 минут

13.00 – 14.30 обед

14.30 – 16.00
Устное заседание
Председатель: **Юсупов Р.В.**

1. Делимова Л.А. «Перенос носителей заряда и поляризация в структурах M/PZT/M» (Приглашенный) - 40 минут
2. Еремина Р.М. «Магнитные и диэлектрические свойства перовскита Sr_2MnTiO_6» - 30 минут
3. Вавилова Е.Л. «Упорядоченное состояние внутренне-двухкомпонентного магнитоэлектрического материала Li_2ZrCuO_4 по данным ^7Li ЯМР» - 20 минут

16.00 – 18.00
Стендовая секция
Председатель: **Юсупов Р.В., Камашев А.А.**

Среда, 6 июля

9.00 -10.00
Устное заседание
Председатель: **Рязанов В.В.**

1. Кунцевич А.Ю. «Двумерная сверхпроводимость в слоистых материалах» (Рязанов В.В.) (Приглашенный) – 40 минут
2. Ичкитидзе Л.П. «Влияние фрактальных размеров бесконечных нормальных кластеров на резистивность керамических сверхпроводников» - 20 минут

10.00 – 10.30 Кофе-брейк

10.30 – 11.40
Устное заседание
Председатель: **Рязанов В.В.**

1. Пятаков А.П. «Двумерные мультиферроики» (Приглашенный)) – 40 минут
2. Чепак А.К. «Фаза Гриффитса в замороженной двухкомпонентной системе» - 20 минут

11.40 – 18.30 ЭКСКУРСИЯ

Четверг, 7 июля

9.00 -10.40
Устное заседание
Председатель: **Шур В.Я.**

1. Вахрушев С.Б. «Критическая динамика и нанодоменные и модулированные структуры в твердых растворах антисегнетоэлектриков и релаксоров» (Приглашенный) – 40 минут
2. Дубовский Л.Б. «Модель Хаббарда во внешнем магнитном поле в Гинзбург-Ландау приближении» - 30 минут
3. Гудин С.А. «Электросопротивление гранулированной керамики $La_{0.8}Ag_{0.1}MnO_3$ при приложении давления и магнитного поля» - 30 минут

10.40-11.10 Кофе- брейк

11.10 -12.50
Устное заседание
Председатель: **Камашев А.А.**

1. Гольцман Г. Н. «Сверхпроводниковый однофотонный детектор - ключевой элемент квантового вычислителя на фотонах и ионах, схем квантовых коммуникаций и квантовых сенсоров» (Приглашенный) – 40 минут
2. Аликин Д.О. «Зависящая от поляризации проводимость границ зёрен в тонких плёнках феррита висмута» - 20 минут
3. Сидельников М.С. «Структура магнитного потока в монокристаллах Fe_2GeTe_3» - 20 минут

13.00 – 14.30 обед

14.30 – 16.00
Устное заседание
Председатель: **Кунцевич А.Ю.**

1. Чуприк А.А. «Разработка сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти на основе тонких пленок HfO_2» (Приглашенный) – 40 минут
2. Мамин Р.Ф. «Гетероструктуры сегнетоэлектрики/диэлектрик» - 30 минут
3. Евсин Д.В. «Первопринципные расчеты магнитных свойств одноосного гелимагнетика $CrNb_3S_6$» - 20 минут

16.00 – 16.20 Кофе- брейк

16.20 – 18.00
Устное заседание
Председатель: **Делимова Л.А.**

1. Воротилов К.А. «Молекулярная самосборка композитных наноструктур для устройств микро- и наноэлектроники» (Приглашенный) - 40 минут
2. Некрасов И.А. «Влияние формы агломератов на электрофизические свойства нанокомпозитов металл-диэлектрик» - 30 минут
3. Гимазов И.И. «Рассеяние носителей тока на нематических флуктуациях в железосодержащих сверхпроводниках» - 20 минут

18.30 – 22.00 Банкет

Пятница, 8 июля

10.00 – 11.40
Устное заседание
Председатель: **Гольцман Г.Н.**

1. Калачев А.А. «Перспективные схемы генерации однофотонных состояний на основе нелинейных оптических эффектов» (Приглашенный) – 40 минут
2. Овсянников Г.А. «Спиновый ток в гетероструктуре иридат/манганит» - 30 минут
3. Камашев А.А. «Контроль за вектором намагниченности ферромагнитного слоя в двухслойных гетероструктурах ферромагнетик/сегнетоэлектрик» - 20 минут
4. Кузенко Д.В. «Активация оптического отклика в твердотельных квантовых структурах» - 20 минут

12.00-12.20 Закрытие Семинара

Стендовая сессия
(5 июля)

1	Абрамов А.	Связь структурных и функциональных свойств в $LuFeO_3$ легированном Sc
2	Абишев Н.М.	Исследование поля деформаций в монокристаллических сегнетоэластиках $LaAlO_3$ с микроскопически неоднородной доменной структурой, активированных редкоземельными ионами, методом оптической спектроскопии высокого разрешения
3	Барабанова Е.В.	Фазовые переходы в твердых растворах $Na(Nb_{0.9}Me_{0.1})O_3$ (Me=Bi, Fe)
4	Быков А.А.	Сверхпроводимость на границе несверхпроводящих La_2CuO_4 и $La_{1.56}Sr_{0.44}CuO_4$
5	Гимадеева Л.В.	Эффект сохранения полярного состояния выше температуры фазового перехода в керамике $BaTiO_3$
6	Гусева О.С.	Диэлектрические свойства керамики $Ca_{0.3}Ba_{0.7}Nb_2O_6$, модифицированной $SrTiO_3$, $KTaO_3$ и $LiTaO_3$
7	Али Майс	Температурные зависимости релаксационных процессов керамики ниобата натрия
8	Жуманазаров А.П.	Электронное строение пленок из фуллеренов C_{58}
9	Паймеров С.К.	Электронное строение и оптическое поглощение фуллеренов как сильно коррелированных систем на примере изомера №181 фуллерена C_{96}
10	Матвеева А.Н.	Особенности магнетизма в $Dy_{1-x}Ho_xMnO_3$
11	Россоленко А.Н.	Свойства перколяционных каналов в планарных мемристивных структурах на основе эпитаксиальных пленок оксидных соединений $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ и $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-y}$
12	Курявый В.Г.	СКВИД магнитометрия фазовых переходов в антиферромагнитную фазу в синтезированных в плазме нанодисперсных порошках CoF_2 и Co_3O_4
13	Шарифуллина Я. И.	Исследование гетероструктур на основе HfO_2
14	Южаков В.В.	Эволюция доменной структуры монокристаллов ортованадата кальция в однородном электрическом поле
15	Сафина В.А.	Осаждение пленок $BiFeO_3$ из химического раствора

		с послойным контролем покрытия и структуры
16	Гудина С.В.	Эффективный g-фактор в квантовых ямах InGaAs/InAlAs с высоким содержанием InAs
17	Гарифуллин И.А.	Сверхпроводящий спиновый клапан
18	Гарифьянов Н.Н.	Фотосопротивление гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$
19	Леонтьев А.В.	Фотосопротивление пленочной гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$
20	Недопёкин О.В.	*Ab initio* исследование гетероструктур для приложений спинтроники
21	Салихов Т.М.	Исследование намагниченности в двухслойных системах ферромагнетик/сегнетоэлектрик на основе магнитооптического эффекта Керра
22	Павлов Д.П.	Исследованя поведения сопротивления гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$
23	Чибирев А.О.	Проводимость пленочной гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$
24	Валидов А.А.	Создание гетероструктур Fe/Nb и $Fe/Al_2O_3/Nb$ на монокристаллических подложках MgO
25	Гарипов Р.Р.	Электропроводность композиционных материалов на основе полимеров, легированных углеродными нанотрубками
26	Шапошникова Т.С.	Влияние дефектов на электронные свойства гетероструктуры $LaMnO_3/BaTiO_3$
27	Шапошникова Т.С.	Электрическая поляризация в малых магнитных частицах с магнитоэлектрической связью

СБОРНИК ТЕЗИСОВ

Квазидвумерный сверхпроводник с ферромагнитными слоями

Пудалов В.М., Власенко В.А., Перваков К.С.,

Садаков А.В., Усольцев А. С.

Центр высокотемпературной сверхпроводимости и квантовых материалов им. В.Л. Гинзбурга, ФИАН, Москва, Россия
(E-mail: pudalov@lebedev.ru)

Новый сверхпроводник на основе железа (FBS) - стехиометрическое соединение EuRbFe4As4 - привлекает внимание исследователей ввиду необычного сосуществования сверхпроводящего спаривания и магнитного упорядочения. При температуре ниже T_c=36K в нем устанавливается сверхпроводящее состояние, а при еще более низкой температуре (T_m=15K) в сверхпроводящей фазе происходит магнитный переход в подрешетке атомов Eu. Загадочным является то, что в установлении дальнего магнитного порядка и в сверхпроводимости участвуют одни и те же электроны 3d-оболочки железа.

Кристаллическая решетка EuRbFe4As4 имеет ярко выраженную слоистую структуру, в которой “проводящие” слои FeAs отстоят друг от друга на большое расстояние ~0.6нм. Двумерные слои FeAs разделены плоскостями атомов Eu с большим магнитным моментом 4f-электронов (7μ_B на атом). Магнитные моменты Eu упорядочены в плоскости ферромагнитно, а вектора намагниченности отдельных слоев ориентированы хаотично, образуя при высоких температурах 3D-парамагнитное состояние. При температуре $T_m \approx 15$K отдельные ферромагнитные слои упорядочиваются в геликоидальную структуру, в которой вектор намагниченности поворачивается на 90° от слоя к слою и объемный кристалл переходит в антиферромагнитное состояние. В результате этого, при температурах <15K кристалл состоит из чередующихся сверхпроводящих и ферромагнитных слоев. В докладе будут представлены результаты измерения зонной структуры (ARPES), магнитного состояния Eu (ResPES), а также сверхпроводящего параметра порядка. Установлено, что как и в большинстве FBS, основной вклад в плотность состояний на уровне Ферми и в сверхпроводящий конденсат вносят электроны 3d-орбиталей железа. С помощью ARPES и андреевской спектроскопии обнаружены и идентифицированы три энергетических щели в сверхпроводящем спектре. Все щели плавно изменяются с температурой, без каких-либо особенностей вблизи температуры магнитного перехода $T=T_m$, однако, плотность сверхпроводящего конденсата испытывает излом в окрестности T_m.

ЛИТЕРАТУРА

1. T. K. Kim , K. S. Pervakov, D. V. Evtushinsky, et al., Phys. Rev. B **103**, 174517 (2021).
2. V. S. Stolyarov, K. S. Pervakov, A. S. Astrakhantseva, et al., J. Phys. Chem. Lett. **11**, 9393 (2020).
3. Т. Ким, К. Перваков, В. Власенко, et al., УФН (2022). *10.3367/UFNr.2021.05.039018*

Совместное влияния сверхпроводящего и магнитного эффектов близости вблизи интерфейсов сверхпроводник - нормальный металл и нормальный металл - ферромагнетик в гибридных джозефсоновских структурах

Рязанов В. В.

ИФТТ РАН, Черноголовка, 142432, Московская область, Россия
(E-mail: ryazanov@issp.ac.ru)

В докладе будет представлен обзор недавних работ лаборатории сверхпроводимости ИФТТ РАН по реализации и исследованию устройств сверхпроводящей электроники и спинтроники на основе сверхпроводников (S), ферромагнетиков (F) и нормальных металлов (N). Одним из основных направлений является реализация слоистых джозефсоновских SFS и спин-вентильных FSF переключателей для логических устройств сверхпроводниковой цифровой электроники, основанных на сосуществовании сверхпроводимости и магнетизма вблизи SF-интерфейсов [1,2]. Другое направление сверхпроводящей спинтроники связано с изучением влияния сверхпроводников на спектры магнонов и ферромагнитный резонанс в слоистых SF-системах [3,4]. Технологически более сложные субмикронные многотерминальные джозефсоновские структуры использованы для реализации сверхпроводящих триодов, управляемых инжекцией неполяризованных и спин-поляризованных носителей []. Продемонстрирована возможности контролирования состояний переносящих сверхпроводящий ток через джозефсоновские барьеры в гибридных S-F/N-S структурах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Karelina L.N., Hovhannisyan R. A., Golovchanskiy I. A. et al., J. Appl. Phys. **130**, 173901 (2021).
2. Карелина Л,Н., Больгинов В.В., Эркенов Ш.А. и др., Письма в ЖЭТФ **112**, 743 (2020).
3. Golovchanskiy I.A., Abramov N.N., Stolyarov V.S. et al., Phys. Rev. Appl. **16**, 034029 (2021).
4. Golovchanskiy I.A., Abramov N.N., Stolyarov V.S. et al., Journ. Appl. Phys. **127**, 093903 (2020).
5. Golikova T.E.**,** Wolf M.J., Beckmann D. et al., Superconductor Science and Technology **34,** 095001 (2021).

Взаимодействие неелевского скирмиона и пирловского вихря

Андрияхина Е. С.[1,2], **Бурмистров И. С.**[2,3]

[1]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)*
Москва, 141700, Россия (E-mail: andriyakhina.es@phystech.edu)
[2]*Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау (РАН)*
Черноголовка, 142432, Россия (E-mail: esandriyakhina@itp.ac.ru)
[3]*Международная лаборатория физики конденсированного состояния, «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)*
Москва, 101000, Россия

Гибридные структуры сверхпроводник-ферромагнетик, содержащие вихри и скирмионы, представляют собой новую область взаимодействия между сверхпроводимостью и магнетизмом. Мы изучаем взаимодействие неелевского скирмиона и пирловского вихря в тонких гетероструктурах (рис. 1) за счет полей рассеяния [1].

Нами был найден мейсснеровский ток в сверхпроводящей плёнке, индуцируемый присутствием скирмиона, а также изучена энергия взаимодействия пирловского вихря и скирмиона за счёт полей рассеяния.

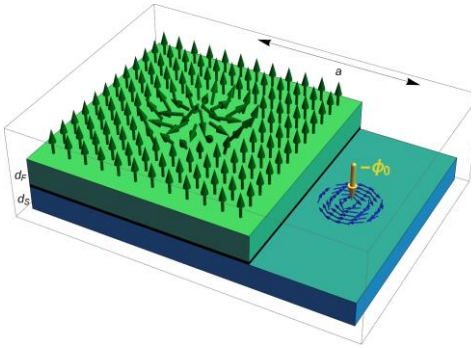


Рис. 1. Эскиз структуры ферромагнетик (зеленый) - сверхпроводник (синий). В ферромагнитном слое находится скирмион типа Нееля, в сверхпроводящем слое на расстоянии a от центра скирмиона находится пирловский вихрь.

Исследование этой энергии приводит к наблюдению интересного «кирального» эффекта, т.е. зависимости взаимного расположение скирмиона и вихря от знака постоянной Дзялошинского-Мории. Рассмотрено обратное влияние вихря на скирмион. Было показано, что магнитное поле вихря стабилизирует скирмион, увеличивая его радиус [1]. Более того, скирмион в такой гетероструктуре может образоваться даже в отсутствии антисимметричного вклада от взаимодействия Дзялошинского-Мории, которое стабилизирует скирмион в изолированных плёнках.

Наша теория находится в качественном согласии с результатами недавней экспериментальной работы [2], в которой впервые была доказана возможность спонтанного рождения пары вихрь-антивихрь в тонкой сверхпроводящей пленке в присутствии скирмиона.

ЛИТЕРАТУРА

1. Andriyakhina E.S., and Burmistrov I.S., Physical Review B, **103**, 174519 (2021),
2. Petrović A.P et al., Physical Review Letters, **126**, 117205, (2021)

Управление наклоном заряженных доменных стенок в монокристаллах ниобата лития

Ахматханов А.Р., Есин А.А., Шур В.Я.

[1]*Институт Естественных Наук и Математики, Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: andrey.akhmatkhanov@urfu.ru)*

В последнее время в физике сегнетоэлектриков наблюдается смещение интереса научного сообщества от доменов к доменным стенкам, что связано с возможностью их применения в качестве реконфигурируемых элементов в наноэлектронных устройствах [1,2]. Такие применения основаны на том, что свойства доменных стенок существенно отличаются от свойств объема сегнетоэлектрика. В частности, было показано, что проводимость заряженных доменных стенок (ЗДС) на несколько порядков выше, чем проводимость монодоменного образца [3]. Использование ЗДС в устройствах наноэлектроники требует разработки трех технологических операций: (1) контролируемого создания, (2) изменения геометрии, и (3) удаления.

В данной работе представлено экспериментальное исследование формирования ЗДС в монокристаллах ниобата лития конгруэнтного состава в процессе переключения поляризации с использованием жидких и твердотельных электродов, а также их комбинации [4]. Показано, что принципиальную роль при создании ЗДС играет тип электрода на Z- полярной поверхности. Установлено, что ЗДС может быть сформирована с использованием двух альтернативных методов: (1) прямым переключением поляризации с жидким электродом на Z+ полярной поверхности и твердотельным электродом на Z- поверхности, (2) обратным переключением с твердотельным электродом на Z+ поверхности и жидким электродом на Z- поверхности. Полученная структура ЗДС исследовалась в объеме материала методами микроскопии генерации второй гармоники. Для обоих методов создания ЗДС формировалась при прорастании домена от Z+ полярной поверхности покрытой твердотельным или жидким электродом к Z- полярной поверхности, покрытой твердотельным электродом. Показано, что наклон созданной ЗДС можно уменьшить до нуля (получить нейтральную доменную стенку) путем приложения импульса поля обратной полярности. В результате, углом наклона доменной стенки можно обратимо управлять в диапазоне от 0,2 до 1,2 градусов, что соответствует переходу от почти изолирующего состояния к высокопроводящему. Когда наклон доменной стенки превышал величину 1,2 градуса происходило формирование новых зубцов на ЗДС. Показано, что созданная ЗДС может быть использована как проводящий наноканал для локального электролиза, что открывает новые возможности для развития методов сегнетоэлектрической литографии.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ (рег.№ 2968), при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (Проект 075-15-2021-677) и гранта Российского Научного Фонда (грант 19-12-00210).

ЛИТЕРАТУРА

1. McConville J.P.V., Lu H., Wang B. et al, Adv. Func. Mat. **30**, 2000109 (2020).
2. Sharma P., Zhang Q., Sando D. et al., Sci. Adv. **3**, e1700512 (2017).
3. Shur V.Ya., Baturin I.S., Akhmatkhanov A.R. et al., Appl. Phys. Lett. **103**, 102905 (2013).
4. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Shur V.Ya., Appl. Phys. Lett. **9**, 092901 (2019)

Исследование мемристивных свойств халькогенидных структур.

Зотов А.В., Ильин А.И., Трофимов О.В., Волков В.Т., Тулин В.А.

Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН, Черноголовка, 142432, Россия (E-mail: taba@iptm.ru*)*

Важным направлением в современном материаловедении является синтез адаптивных систем с возможностями обработки информации, аналогичными возможностям биологических нейронных систем. Последние разработки касаются материалов, функционально сходных с мемристором [1], проводимость которого зависит от предыдущей активности. Эта особенность аналогична синаптической пластичности: способность нейронов изменять свои синаптические связи в результате накопленного опыта — основа обучения и формирования памяти. Для нейроморфных применений наиболее важным является возможность управлять пластичностью структур. В качестве таких приборов предлагается использовать мемристоры, которые демонстрируют большой потенциал для их применения в качестве аналоговых синапсов и нейронов в нейроморфных цепях.

Нашей группой исследовались мемристивные свойства флеек кристаллов Bi_2Se_3, полученных шелушением из кристалла. Bi_2Se_3 – слоистый материал, в котором каждые 5 слоёв Bi-Se-Bi-Se-Bi формируют, т.н. квинтипулу (quintuple) толщиной около 1нм, сами квинтипулы связываются между собой слабой Ван-дер-Вальсовой связью, благодаря чему материал легко шелушится вдоль этой связи. Исследовавшиеся структуры представляли из себя флейки Bi_2Se_3, перенесённые на подложку SiO_2 и напылёнными (электронной литографией) металлическими контактами. Использовалось два типа материалов контактов (золото и медь) и два вида напыления контактов к образцу (оба электрода сверху или флейка лежит между верхним и нижним электродом).

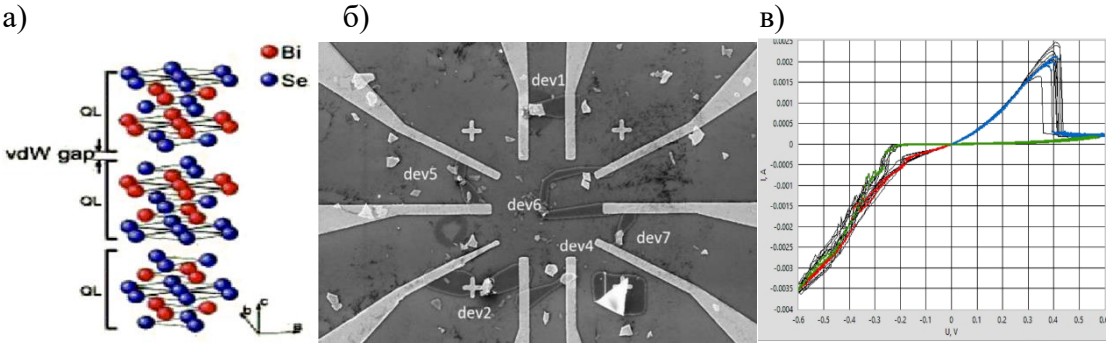


Рис. 1. а) – кристалл Bi_2Se_3; б) изображение образцов в РЭМ; в) мемристивные ВАХ образцов

Результаты электрический измерений продемонстрировали мемристивные эффекты у части образцов (с медным электродом), подобные наблюдавшимся в [2], что позволяет полагать перспективным применение Bi_2Se_3 в нейроморфных цепях либо в качестве элемента памяти с непрерывным множеством уровней.

ЛИТЕРАТУРА

1. Yang J.J., D.B. Strukov Nat. Nanotechnology **8**, 13, (2013)
2. Zotov A.V. et al., Chaos, Solitons & Fractals **143**, 110542 (2021)

Электродинамика тонких проводящих и диэлектрических пленок в терагерцовом и инфракрасном диапазонах.

Командин Г. А.[1]

[1]*Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской Академии Наук*
Москва, 119991, Россия (E-mail: gakomandin@mail.ru)

Разработка современных многофункциональных микроэлектронных приборов ставит задачу контроля за электродинамическими и оптическими характеристиками диэлектрических и проводящих слоев [1]. Помимо механической надежности и долговечности критическим фактором является возможность работы на максимальных частотах. Учитывая, что микроэлектронных устройств приблизились к терагерцовой области частот, становится очевидным, что дисперсия функции диэлектрического отклика в ТГц –ИК диапазоне является определяющей в формировании транспортных, емкостных и диссипативных свойств тонкопленочных слоев.

В работе рассмотрен комплексный экспериментально-аналитический метод всестороннего изучения свойств проводящих и диэлектрических тонких пленок и установления взаимосвязи между их морфологическими и электродинамическими характеристиками. Для определения исчерпывающего набора параметров колебательного спектра исследуемой пленки необходимо определить полный набор параметров подложек, поскольку для точного анализа требуется учитывать, как амплитудные, так и фазовые изменения электромагнитных волн при взаимодействии с многослойными образцами. В результате изучения материалов подложек – сапфира и тонкой пленки платины – получены данные о механизмах поглощения электромагнитных волн и определены параметры моделей, описывающих их поглощение – классического осциллятора и Друдевской проводимости. Были проанализировали все основные механизмы взаимодействия ТГц и ИК излучения с осаженными на различные подложки пленками пористого органосиликатного стекла и определены величины вкладов в диэлектрическую проницаемость от кремний-кислородного каркаса, терминальных групп и захваченной пленками воды [2].

Изучены оптические характеристики и частотная зависимость проводимости тонких пленок перовскита с нестехиометрией по кислороду – никелата лантана ($LaNiO_{3-\square}$ – LNO) в ТГц и ИК диапазонах. Показано, что при сравнительно высоких величинах концентрации свободных носителей и их плазменной частоты пленки LNO могут применяться в качестве прозрачных электродов в оптоэлектронных приборах ТГц диапазона [3]. Для всех исследованных пленок определен полный набор дисперсионных параметров полос поглощения формирующих диэлектрическую проницаемость, включая диэлектрический вклад каждой из полос.

Благодарности. Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам МИРЭА Воротилову К. А., Серегину Д. С. И Вишневскому А.С., а также сотрудникам ФТИ РАН им. К.А. Валиева Руденко К.В. и Мяконьких А.В. за продуктивную совместную работу над проектом РФФИ 18-29-27010 МК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Komandin G.A., Nozdrin V.S. et.al., J. Phys. D: Appl. Phys. 55, 025303 (2021).
2. Nozdrin V.S, Komandin G.A., Spektor I.E. et al., J. Appl. Phys. 131, 025305 (2022).
3. Maex K., Baklanov M.R., Shamiriyan D. et.al., J. Appl. Phys. 93, 8793 (2003).

Аномальная кислородная металлическая зона в потенциальном сверхпроводнике $KCa_2Fe_4As_4O_2$

Павлов Н. С.[1,2], **Перваков К. С.**[2], **Некрасов И. А.**[1,2]

[1]*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, Россия (E-mail: pavlovns@gmail.com)*

[2]*Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, Россия*

В 2016 году был обнаружен новый класс самодопированных сверхпроводников в системах со фтором в 1144 ($KCa_2Fe_4As_4$ [1,2]) и в 12442 ($KCa_2Fe_4As_4F_2$ [3]). Кристаллическая структура 12442 систем состоит из частей родительских классов железосодержащих сверхпроводников 122 (KFe_2As_2) и 1111 (CaFeAsF). Данные соединения являются слоистыми и квазидвумерными. В работе исследованы электронная структура, магнетизм и поверхность Ферми дырочного самодопированного потенциального сверхпроводника на основе железа $KCa_2Fe_4As_4O_2$ (12442) в рамках теории функционала электронной плотности DFT/GGA [4]. Расчеты DFT были выполнены в рамках полнопотенциального кода, использующего линеаризованные плоские волны (FP-LAPW), WIEN2k [5] в приближении обобщенного градиента Perdew-Burke-Ernzerhof (GGA). Разбиение k-точек в зоне Бриллюэна составляло 16x16x16.

Для $KCa_2Fe_4As_4O_2$ было обнаружено, что кроме Fe-3d состояний на уровень Ферми выходят O-2p состояния (Рис. 1), т.е. довольно аномальное поведение для O-2p. Обычно в оксидах переходных металлов состояния O-2p полностью заняты. Результаты показали, что в данном соединении слой CaO отдает часть электронов слою FeAs, таким образом возникает нехватка электронов на O-2p (0.5 дырки/O). Состояния O-2p формируют дополнительный лист поверхности Ферми пропеллерной формы вокруг Г-точки и модифицирует листы поверхности Ферми Fe-3d состояний за счет гибридизации. Для демонстрации аномальности металлической O-2p зоны в работе было проведено сопоставление с системами того же семейства $KCa_2Fe_4As_4F_2$ и $RbGd_2Fe_4As_4O_2$. Для определения величины самодопирования ионов Fe было выполнено проектирование на базис функций Ваннье (Fe-3d, As-4p) и было получено, что в $KCa_2Fe_4As_4O_2$ находится 0.75 дырки на ионе Fe. Так же установлено, что основное магнитное состояние $KCa_2Fe_4As_4O_2$ представляет собой шахматное антиферромагнитное состояние.

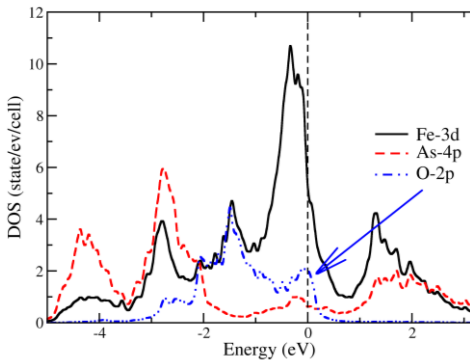


Рис. 1. Плотность Fe-3d, As-4p, O-2p состояний спроектированных на функции Ваннье.

Работа выполнена при частичной поддержке РНФ (грант №21-12-00394).

ЛИТЕРАТУРА

1. Iyo A. et al., Journal of the American Chemical Society **138**, 3410 (2016).
2. Mou D. et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 277001, (2016).
3. Wang Z.C. et al., Journal of the American Chemical Society **138**, 7856 (2016).
4. Pavlov N.S., Pervakov K.S., Nekrasov I.A., arXiv: 2205.07007.
5. Blaha P., Schwarz K., Tran F., Laskowski R., Madsen G.K., Marks L.D., The Journal of Chemical Physics **152**, 074101 (2020).

Электронная структура и минимальные модели для плоского и гофрированного монослоев CuO: *первопринципное* исследование

Слободчиков А.А.[1], **Некрасов И.А.**[1]

[1]*Институт электрофизики УрО РАН, Екатеринбург, 620016, Россия*
(E-mail: slobodchikov@iep.uran.ru)

Среди всех двумерных кристаллов монослои оксидов особенно интересны, потому как к степеням свободы, имеющимся в трехмерном материале (заряд, спин, решетка), добавляются квантовые ограничения. Следовательно, можно ожидать наличия широкого спектра разнообразных электронных и магнитных свойств с фундаментальной точки зрения и возможность их прикладного применения.

Оксиды меди стоят особняком среди прочих соединений переходных металлов. Прежде всего они привлекают большое внимание из-за их широкого прикладного применения – в высокотемпературной сверхпроводимости [1], в качестве нанесенных катализаторов [2], фотоэлементов [3].

Мы изучили электронные свойства плоского и гофрированного монослоев CuO при помощи первопринципных расчетов, основанных на теории функционала плотности (DFT) в рамках обобщенного градиентного приближения (GGA).

Используя формализм функций Ванье был предложен ряд минимальных моделей для рассматриваемых систем. Для них были получены зонные структуры, величины одноэлектронных энергий и интегралов перескоков. Кроме того, мы изучили влияние микроискажений кристаллической решетки на электронную структуру плоского и гофрированного монослоев CuO и определили критические значения микроискажений, при которых происходит топологический переход Лифшица.

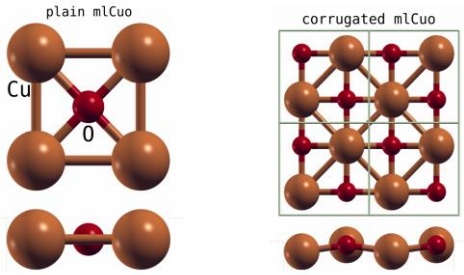


Рис. 1. Кристаллическая структура для плоского CuO (слева) и гофрированного CuO (суперячейка 2x2x1) (справа).

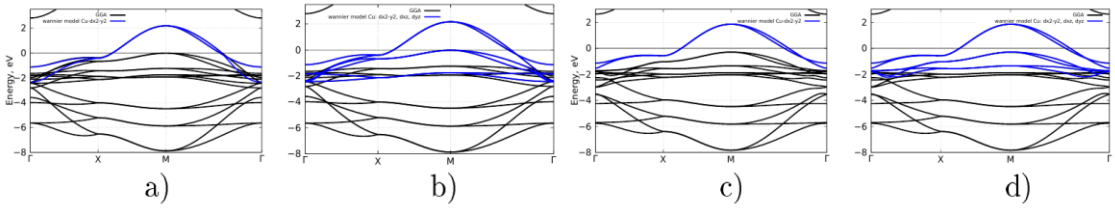


Рис. 2. Сравнение зонных структур GGA для плоского CuO с проектированными орбиталями Ванье Cu-d_{x2-y2} (a), Cu-d_{x2-y2}, d_{xz}, d_{yz} (b); то же для гофрированного CuO (c – d). Ноль соотвествует уровню Ферми.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ruiz E. et al., Phys. Rev. B **56**, 7189–96 (1997).
2. Reitz J.B. et al., J. Am. Chem. Soc. **120**, 11467–78 (1998).

Универсальность обратного магнитокалорического эффекта вблизи магнитной трикритической точки в металлах

П.А. Игошев[1,2], И. А. Некрасов[3], Н. С. Павлов[3]

[1]Институт физики металлов имени М.Н. Михеева, 620041, С. Ковалевской, 19, Екатеринбург, Россия
[2]Уральский федеральный университет, 620002, ул. Мира, 19, Екатеринбург, Россия
[3]Институт электрофизики УрО РАН, 620016, ул. Амундсена, 106, Екатеринбург, Россия

Продемонстрирована универсальность обратного магнитокалорического эффекта для магнитного фазового перехода первого рода в металлических системах в рамках теории Ландау. Эта универсальность является следствием фазового расслоения, сопровождающего любой магнитный фазовый переход первого рода в металлических системах. Строго показано, что магнитоупорядоченная фаза, участвующая в фазовом расслоении имеет отрицательную магнитную восприимчивость в окрестности фазового перехода. Таким образом, энтропия упорядоченной фазы увеличивается при приложении магнитного поля и обеспечивает отрицательную величину изменения магнитной энтропии ΔS при магнитокалорическом эффекте. Для иллюстрации этих общих выводов подробно анализируется температурный профиль $\Delta S(T)$ для среднеполевого решения модели Хаббарда. Для того, чтобы гарантировать наличие магнитного фазового перехода первого рода ферромагнетик-парамагнетик, затравочный электронный спектр выбран для гранецентрированной кубической решетки бесконечной размерности, содержащий сингулярность Ван Хове на дне полосы, благоприятствующий ферромагнитному порядку при малом параметре кулоновского взаимодействия. Возможность управления знаком ΔS путем изменения как температуры, так и плотности носителей заряда в магнитокалорическом материале представляется перспективной с точки зрения интерпретации многих экспериментальных данных по намагниченности в состоянии с фазовым расслоением, а также с точки зрения возможных технологических решений.

Ab initio исследование электронных свойств гетероструктуры $LaMnO_3/BaTiO_3$

Гумарова И.И.[1], Мамин Р. Ф.[1]

[1]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН*
Казань, 420029, Россия
Казань, 420008, Россия (E-mail: i.piyanzina@gmail.ru)

Известно, что величина намагниченности в гетероструктуре $LaAlO_3/SrTiO_3$ очень мала и составляет порядка 0.2 μ_B/Ti [1]. Недавно для усиления интерфейсного магнетизма было предложено использовать магнитные изоляторы в составе гетероструктур для индуцирования спин-поляризованного двумерного электронного газа (2DEG) на интерфейсе [2,3]. Еще более перспективным здесь является манипулирование им с помощью электрического поля, т. е. реализация обратного магнитоэлектрического эффекта с помощью сегнетоэлектриков в составе гетероструктуры. Было предложено использовать антиферромагнетик (AFM) в качестве источника магнетизма, и сегнетоэлектрик - для манипулирования интерфейсными состояниями.

В настоящей работе в качестве модельной системы была исследована гетероструктура $LaMnO_3/BaTiO_3$ (LMO/BTO) вдоль направления [001], в составе которой есть антиферромагнетик A-типа и сегнетоэлектрик. Основываясь на расчетах теории функционала плотности (DFT), были исследованы возможности появления спин-поляризованного 2DEG в гетероструктуре LMO/BTO. Было исследовано влияние толщины сегнетоэлектрического слоя и поляризации на электронные и магнитные состояния интерфейса гетероструктуры. Для этого были произведены расчеты по определению спин-поляризованных спектров плотности состояний гетероструктуры BTO/LMO без наложенной поляризации (P_0) и с смоделированной сегнетоэлектрической поляризацией, направленной к интерфейсу (P_{down}) и к поверхности (P_{up}). Наконец, было исследовано влияние кислородных вакансий, расположенных в разных слоях, на электронные и магнитные свойства.

Было продемонстрировано, что система LMO/BTO без наложенной поляризации остается полупроводником вплоть до 6 верхних слоев BTO, с пренебрежимо малой шириной запрещенной зоны равной ~0.2 эВ, которая медленно убывает, асимптотически приближаясь к нулю. Было показано, что сочетание сегнетоэлектрической поляризации и антиферромагнетизма может влиять на спин-поляризованные состояния 2DEG, в частности, наложенная поляризация с диполями, направленными к поверхности гетероструктуры, может изменить полупроводниковое состояние на проводящее с вкладом от интерфейсного слоя MnO_2. Кроме того, было показано, что проводящее состояние на интерфейсе может быть вызвано наличием кислородных вакансий, а также, что возникновение кислородных вакансий наиболее вероятно в слоях BaO и в интерфейсном слое MnO_2.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда в соответствии с исследовательским проектом № 21-12-00179.

ЛИТЕРАТУРА

1. Piyanzina I.I., Eyert V., Lysogorskiy Yu.V. et al., Journal of Physics: Condensed Matter **31**, 29 (2019).
2. Kabanov V.V., Piyanzina I.I., Lysogorskiy Yu.V. et al., Mater.Res.Express **7**, 5 (2020).

3. Weng Y., Niu W., Huang X. et al., Phys. Rev. B **103**, 214101 (2021).

Ab initio исследование электронных свойств гетероструктур на основе сегнетоэлектриков

Загидуллина А.Э.[1], Гумарова И.И.[1,2], Евсеев А.А.[1], Мамин Р.Ф.[2]

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия (e-mail: zanalina060200@gmail.com)*

[2]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Казань, 420029, Россия*

Способность сегнетоэлектриков изменять ориентацию поляризации посредством электрического поля делает их уникальным материалом для приложений микроэлектроники. Кроме этого, они обладают рядом других выдающихся свойств, которые могут расширить сферу применения в наноразмерных электронных устройствах: например, наличие высокой диэлектрической проницаемости, диэлектрической нелинейности, пьезо- и пироактивностти, линейных и квадратичных электрооптических эффектов.

Недавно было предложено использовать сегнетоэлектрики в качестве компонентов электрооптических (ЭО) модуляторов [1]. Так, $BaTiO_3$ (BTO) является многообещающим материалом благодаря своему большому эффективному коэффициенту Поккельса, особенно в эпитаксиальной форме. Его также можно интегрировать на кремниевую подложку с помощью буферного слоя $SrTiO_3$. Эти две характеристики делают эпитаксиальный BTO идеальным для использования в приложениях кремниевой фотоники следующего поколения. Методы эпитаксиальной интеграции $BaTiO_3$ на Si широко исследовались А. Демковым и соавт. [1]. Кроме того, А. Демков с сотрудниками также экспериментально исследовали эффект Поккельса в пленках $BaTiO_3$, выращенных на Si [2]. Однако, теоретические исследования для гетероструктуры BTO/Si пока не проводились. Тем не менее, анализ из первых принципов линейного электрооптического (ЭО) или эффекта Поккельса в объемном ромбоэдрическом $BaTiO_3$ был недавно опубликован в [3].

Основной задачей настоящей работы является проведение *ab initio* расчетов для гетероструктуры BTO/Si. В результате расчетов зонной структуры была продемонстрирована возможность создания проводящего состояния в гетероструктуре BTO/Si, было исследовано влияние толщины слоя сегнетоэлектрика на структурные искажения (смещение атомов Ti извне) и на проводящие свойства (распределение проводимости по слоям). Влияние поляризации на электронные состояния было продемонстрировано с помощью анализа плотности состояний для двух направлений сегнетоэлектрической поляризации (к поверхности и к интерфейсу). Наконец, были рассчитаны энергии образования кислородных вакансий, расположенных в разных слоях гетероструктуры, рассчитаны спектры плотности состояний, проанализировано влияние на проводящие свойства.

ЛИТЕРАТУРА

1. W. Guo, A.B. Posadas, and A.A. Demkov, *J. Vac. Sci. Technol. A* **39**, 030804 (2021).
2. A.A. Demkov et al., *Physica status solidi (b)*, 2000497 (2021).
3. T. Paoletta and A.A. Demkov, *Phys. Rev. B* **103**, 014303 (2021).

Заряженные доменные стенки в одноосных сегнетоэлектриках

Шур В.Я.

[1]*Институт Естественных Наук и Математики, Уральский Федеральный Университет, Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail: vladimir.shur@urfu.ru)*

Рассмотрена история открытия и основные этапы изучения заряженных доменных стенок (ЗДС) в сегнетоэлектриках. Представлены первые наблюдения ЗДС в кристаллах сегнетоэлектриков, теоретические предсказания формирования электронных и дырочных ЗДС с металлической проводимостью [1,2] и первое экспериментальное подтверждение аномального увеличения проводимости в результате создания ЗДС в кристаллах SbSI [3,4].

Представлены результаты экспериментального изучения различных вариантов формирования заряженных доменных стенок. (1) При фазовом переходе в германате свинца $Pb_5Ge_3O_{11}$ со слоями роста [5], а также в ниобате лития $LiNbO_3$ и танталате лития $LiTaO_3$ с градиентом состава [6]. (2) При переключении поляризации в однородном поле в кристаллах $LiNbO_3$ [7] и при локальном переключении в монокристаллических тонких пленках $LiNbO_3$ на изолирующей подложке LNOI [8]. (3) При локальном переключении на неполярном срезе кристаллов $LiNbO_3$ [9] и монокристаллических тонких пленках LNOI [8].

Отмечается, что особый интерес к исследованию ЗДС был стимулирован публикацией [10], в которой была сформулирована возможность контролируемого создания и перемещения проводящих доменных стенок нанометровой толщины для новых устройств и технологий. На примере стехиометрического $LiNbO_3$ при измерениях в широком диапазоне температур было показано, что после образования ЗДС проводимость сначала увеличивается, а затем экспоненциально уменьшается [11,12]. Изучена перестройка ЗДС под действием пироэлектрического поля при охлаждении после фазового перехода и внешнего поля. Предложена модель формирования ЗДС с повышенной проводимостью в одноосных сегнетоэлектриках [13].

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ (рег.№ 2968), при финансовой поддержке министерства науки и высшего образования РФ (Проект 075-15-2021-677).

ЛИТЕРАТУРА

1. Guro G.M., Ivanchik I.I., Kovtonyuk N.F., Sov. Phys. Solid State **11**, 1956 (1969).
2. Vul B.M., Guro G.M., Ivanchik I.I., Ferroelectrics **6**, 29 (1973).
3. Adonin A.A., Grekov A.A., Sov. Phys. Solid State **16**, 566 (1974).
4. Grekov A.A., Adonin A.A., Protsenko N.P., Ferroelectrics **13**, 483 (1976).
5. Shur V.Ya., Rumyantsev E.L., Subbotin A.L., Ferroelectrics **140**, 305 (1993).
6. Pryakhina V.I., Alikin D.O.,…, Shur V.Ya., Ferroelectrics **476**, 109 (2015).
7. Shur V.Ya., Rumyantsev E.L., Nikolaeva E.V., et al., Appl. Phys. Lett. **77**, 3636 (2000).
8. Slautin B.N., Turygin A.P.,…, Shur V.Ya., Appl. Phys. Lett. **116**, 152904 (2020).
9. Shur V.Ya., Pelegova E.V., Turygin A.P., et al., J. Appl. Phys. 129, 044103 (2021).
10. Seidel J., Martin L.W., He Q. et al., Nature Materials **8**, 229 (2009).
11. Shur V.Ya., Baturin I.S., Akhmatkhanov A.R. et al., Appl. Phys. Lett. **103**, 102905 (2013).
12. Esin A.A., Akhmatkhanov A.R., Baturin I.S., Shur V.Ya., Ferroelectrics **476**, 109 (2015).

13. Eliseev E.A., Morozovska A.N., …, Shur V.Ya., Phys. Rev. B **83**, 235313 (2011).

Влияние размера гранул на частотную стабильность магнитокалорического эффекта в манганитах в циклических магнитных полях

Гамзатов А. Г., Алиев А. М.

Институт физики им. Х.И. Амирханова ДФИЦ РАН, 367003, Махачкала, Россия

(E-mail: gamzatov_adler@mail.ru)

Технология магнитного охлаждения, основанная на магнитокалорическом эффекте (МКЭ), является одним из типичных применений магнитных материалов в энергосбережении и инновационных технологиях. В последние годы были получены несколько новых типов магнитокалорических материалов с гигантскими значениями МКЭ, которые в значительной степени способствовали развитию технологии магнитного охлаждения при комнатной температуре. Манганиты являются яркими представителями материалов с гигантскими значениями МКЭ. Существует два способа определения магнитокалорических свойств материалов: косвенные методы и прямые методы. В данной работе исследования МКЭ проводились прямым методом модуляции магнитного поля. До настоящего времени почти все прямые методы исследования МКЭ проводились или при квазистационарных полях, или при разовых циклах вкл/выкл магнитного поля. Однако, в магнитных холодильных машинах магнитный материал будет подвергаться циклическому воздействию магнитного поля с рабочими частотами (4-10 герц). Поэтому материалы для технологии магнитного охлаждения не могут считаться подходящими, пока не будут проверены их магнитокалорические свойства в циклических магнитных полях. Магнитокалорические свойства материалов в циклических и постоянных магнитных полях могут существенно отличаться в зависимости от типа фазового перехода, фазовой, структурной и микроструктурной неоднородности.

В данной работе приводятся результаты исследования влияние частоты (до 20 Гц) циклического магнитного поля (0.62 Тл) на величину адиабатического изменения температуры ΔT_{ad} в манганитах $La_{0.7}Ca_{0.3}MnO_3$, $La_{0.75}Ag_{0.125}MnO_3$ и $Sm_{0.6}Sr_{0.4}MnO_3$.

Обнаружено значительное уменьшение величины МКЭ с ростом частоты магнитного поля для образцов La0.75Ag0.125MnO3 и Sm0.6Sr0.4MnO3, которые на наш взгляд имеют разную природу. Как правило смещение ТС в сторону низких температур с ростом частоты магнитного поля и сильное подавление величины МКЭ для образца Sm0.6Sr0.4MnO3, в котором наблюдается магнитоструктурный фазовый переходов, связано в основном с процессами зародышеобразования и роста основной фазы. Для образца La0.75Ag0.125MnO3, в котором наблюдается фазовый переход второго рода природа смещения ТС (в данном случае в сторону высоких температур) и сильное подавление эффекта с ростом частоты магнитного поля однозначна неясна и требует дополнительных исследований. Но можно предположить, что это связано с микроструктурой образца и размерами гранул. В отличие от образцов La0.7Ca0.3MnO3 и Sm0.6Sr0.4MnO3, где средний размер гранул больше 1 мкм, средний размер гранул для образца La0.75Ag0.125MnO3 составляет менее 100 нм. В динамических процессах межгранульные границы выступают как дополнительный канал тепловой диссипации, поэтому мы наблюдаем сильную частотную зависимость для образца La0.75Ag0.125MnO3 с фазовым переходом второго рода.Исследование выполнено при

финансовой поддержке РФФИ и ГФЕН Китая в рамках научного проекта № 21-58-53046.

Индуцированная сверхпроводимость в низкоразмерных системах

А. А. Копасов[1], А. С. Мельников[1]

[1]*Институт физики микроструктур РАН*
603950 Нижний Новгород, ГСП-105, Россия (E-mail: melnikov@ipmras.ru)

Доклад посвящен теории индуцированной сверхпроводимости в различных низкоразмерных системах (2D электронный газ, слои графена, тонкие пленки или проволоки нормального металла, топологические изоляторы), активно исследуемых в последние годы в большом количестве экспериментальных работ. Мы рассматриваем два возможных механизма наведения сверхпроводящих корреляций в низкоразмерной системе: (1) корреляции, вызванные туннелированием электронов между нормальной и сверхпроводящей подсистемами, (2) корреляции, вызванные взаимодействием электронов через границу раздела подсистем. Показано, что щель в спектре возбуждений низкоразмерной системы, наведенная за счет эффекта близости с массивным сверхпроводящим электродом, а также транспортные и электродинамические характеристики низкоразмерной системы существенно определяются характеристиками туннельной связи со сверхпроводником и особенностями взаимодействия электронов на интерфейсе. В частности, исследовано влияние нелокальности электрон-электронного взаимодействия на температурную зависимость сверхтекучей плотности 2D электронного газа, которая, в свою очередь, определяет особенности мейсснеровского отклика структуры. В рамках микроскопического рассмотрения мы показываем, что взаимодействие электронов в различных подсистемах может приводить к появлению сверхпроводящих корреляций нечетных по мацубаровской частоте, которые дают парамагнитный вклад в электродинамический отклик и серию пиков в плотности состояний на низких энергиях. Наши результаты могут дать объяснение экспериментальным наблюдениям возвратного температурного поведения индуцированного диамагнитного отклика гибридных структур нормальный металл – сверхпроводник. Также мы обсуждаем влияние упомянутых выше механизмов формирования индуцированных сверхпроводящих корреляций на обратный эффект близости.

Работа выполнялась при финансовой поддержке Российского Научного Фонда (проект РНФ 20-12-00053).

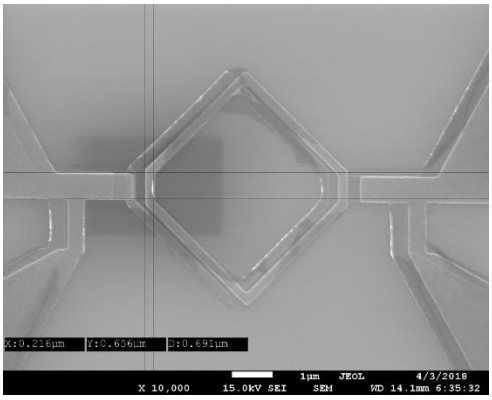
Квантовые состояния Al-AlOx-Ti-Pt дифференциального двухконтурного интерферометра

Гуртовой В. Л.[1,2], Шишкин А. Г.[3], Яковлев Д. С.[2], Лубсанов В. Б.[3]

[1]*Институт проблем технологии микроэлектроники РАН, Черноголовка, 142432, Россия*
[2]*Российский квантовый центр, Сколково, 143025, Россия*
[3]*Московский физико-технический институт, Долгопрудный, 141700, Россия (E-mail: Gurtovoi@iptm.ru)*

Недавно был разработан сверхпроводящий дифференциальный двухконтурный интерферометр (ДДИ) [1] для высокочувствительного детектирования магнитного потока и состояний квантовых систем. Обычно, ДДИ состоит из двух алюминиевых контуров, которые слабо связаны специальным образом двумя джозефсоновскими переходами. В ДДИ изменения критического тока, вызванного внешним магнитным полем, происходят в виде скачков при изменении четности (n_1+n_2) суммы квантовых чисел углового момента импульса отдельных контуров [1].

В этой работе мы исследуем ДДИ из сверхпроводников с различными T_c, а именно, Al (T_c=1.3 K) и Ti(40nm)-Pt(5nm) двухслойки (T_c=0.39 K). Это позволяет изучать работу ДДИ в широком диапазоне температур, когда квантовое число Al контура равно нулю, а поведение ДДИ определяется изменением квантового числа контура с меньшим T_c. ДДИ был изготовлен теневым напылением через нависающую маску, изготовленную электронно-лучевой литографией, Al(25 nm), затем окислением Al для формирования туннельного окисла AlO_x джозефсоновских переходов с размерами 300×300 нм^2 и Ti(40nm)-Pt(5nm) двухслойки. Типичная структура ДДИ (4×4 μm^2) показана на Рис. 1а после lift-off процесса удаления нависающей маски.



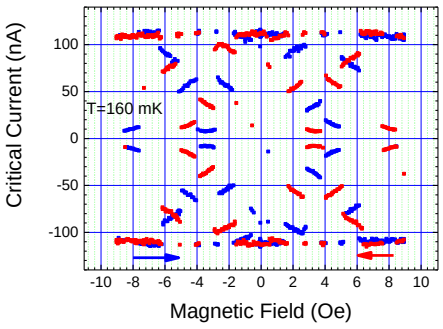


Рис.1. а) ДДИ структура (4×4 μm2), б) квантовые состояния критического тока ДДИ для магнитного поля с противоположным направлением сканирования.

На рис. 1б показаны скачки критического тока ДДИ, соответствующие изменению квантовых состояний контуров ДДИ. Мы также будем обсуждать временную эволюцию квантовых состояний Ti-Pt контура (рис. 1с) при постоянном токе смещения и магнитном потоке около Ф0/2, когда Al контур является референсным при его квантовом числе равном нулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gurtovoi V.L., Antonov V.N., Nikulov A.V. et al., Nano Letters **17**, 6516 (2017).

Индуцированная электрическим импульсом сверхпроводимость в метастабильном состоянии 1T – $TaS_{2-x}Se_x$

Таркаева Е.В.[1], Щуплецов А.В.[1,2], Банников М.И.[1,2], Гаврилкин С.Ю.[2], Моргун Л.А.[2], Кунцевич А.Ю.[1,2]

[1]*Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики Москва, 101000, Россия (E-mail:evtarkaeva@edu.hse.ru)*

[2]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) Москва, 119991, Россия*

В соединении слоистого материала дисульфида тантала наблюдаются состояния с волной зарядовой плотности, а также метастабильное “скрытое” состояние [1]. Переход в это состояние может быть произведен оптическим или электрическим импульсом, что открывает возможности для *in-situ* управления свойствами в мемристивных приложениях.

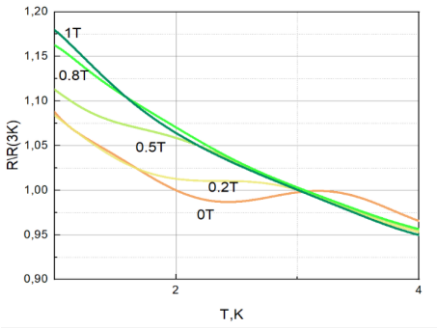


Рис. 1. Зависимость нормированного сопротивления переключенного образца от температуры в разных магнитных полях

В данной работе производилось переключение тонких (~ 100-200 нм) чешуек соединения 1T-дисульфида тантала, легированного малым количеством Se (номинальная мольная доля селена x = 0% и 3.2%). При медленном квазистационарном охлаждении наблюдался переход из состояния с почти соразмерной волной зарядовой плотности в состояние с соразмерной волной зарядовой плотности, типичный для данного материала [2]. При переключении части образца коротким импульсом тока происходил переход в скрытое состояние, как для x = 0, так и для x = 3.2%, характеризующееся малым значением и слабой температурной зависимостью сопротивления при низких температурах. Показано, что переход происходит локально, вблизи электродов, к которым прикладывался импульс на в области размерами несколько микрон.

При самых низких температурах T < 3K для x = 0 ни в наших, ни в предыдущих исследованиях не наблюдалось отклонений от слабой температурной зависимости. В то же время для x = 3.2% наблюдались признаки того, что переключенное состояние является частично сверхпроводящим (Рис. 1).

Обнаруженная сверхпроводимость в селен-замещенном соединении, по всей видимости, связана с увеличенной плотностью состояний на уровне Ферми. Возможность управляемого включения сверхпроводящих элементов перспективна для сверхпроводящей микроэлектроники.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Stojchevska, I. Vaskivskyi, T. Mertelj, P. Kusar, D. Svetin, S. Brazovskii, D. Mihailovic, Ultrafast switching to a stable hidden quantum state in an electronic crystal. *Science* **344**, 177–180 (2014).
2. Y. Liu, R. Ang, W. J. Lu, W. H. Song, L. J. Li, Y. P. Sun, Appl. Phys. Lett. **102,** 192602 (2013)
.

Second harmonics of magnetic quantum oscillations in layered metals

Mogilyuk T. I.[1], **Grigoriev P. D.**[2, 3]

[1]*NRC Kurchatov Institute, Russia, 123098, Moscow, Ploshchad' Akademika Kurchatova st.,*
[2]*Landau Institute for Theoretical Physics, Russia, 142432, Moscow Region, Chernogolovka, Akademika Semenova av., 1A*
[3]*National University of Science and Technology MISiS, Russia, 101000, Moscow*
(E-mail: 5taras@mail.ru)

We find expressions for the second harmonics of magentic quantum oscillations of interlayer magnetoconductivity and magnetization in quasi-two-dimensional metals. The expressions obtained are useful, since in some experiments with quasi-two-dimensional metals, the second harmonic of magnetic quantum oscillations is also observed. We analyze the effect of magnetic oscillations of the real part of electron self-energy part ReΣ on the shape of the quantum magnetization oscillations and on the magnetoresistance of quasi-two-dimensional conductors. In the limit of strong quantum oscillations, which is possible only in two-dimensional or quasi-two-dimensional metals, the real part of electron self-energy function ReΣ also oscillates strongly. Usually it is neglected, taking into account only its imaginary part ImΣ, since it is assumed that ReΣ only shifts the chemical potential and does not affect the observed properties. However, ReΣ cannot be neglected if it also oscillates. As our calculations show, ReΣ oscillations affect the observed properties, since they shift the chemical potential relative to the Landau level even on average over the period of quantum oscillations.

Oscillations of ReΣ affect the shape of the quantum magnetization oscillations [1,2], which is used to experimentally determine the regime of quantum oscillations: constant chemical potential or a constant electron density [3,4]. Also, these oscillations change the monotonic part in a strong field by a coefficient of the order of 2 [5,6], the angular dependence and the shape of the quantum oscillations of the magnetoresistance [7,8]. Therefore, despite attempts in organic metals to achieve a constant electron density regime, the shape of the magnetization oscillations remained consistent with the constant chemical potential [3,4]. This question is not only of great practical importance for the analysis of numerous experiments, but also of substantial interest for the development of the theory of magnetic quantum oscillations.

T. I. M. acknowledges the RFBR grant 21-52-12027.

ЛИТЕРАТУРА

1. Krumin A.E., Ilyin U.I., and Dimza V.I. Ferroelectrics **22**, 695 (1978).
2. Grigoriev P. D., JETP **92**, 1090 (2001).
3. Champel T. and Mineev V. P., Phys. Rev. B **66**, 195111 (2002).
4. Wosnitza J., Fermi Surfaces of Low-Dimensional Organic Metals and Superconductors, (Springer-Verlag, Berlin, 1996).
5. Wiegers S. A. J., Specht M., Lévy L. P., Simmons M. Y., Ritchie D. A., Cavanna A., B. Etienne, Martinez G., and Wyder P., Phys. Rev. Lett. **79**, 3238 (1997).
6. Grigoriev A. D., Grigoriev P. D., Low Temp. Phys., **40**, 367 (2014).
7. Grigoriev P. D., Mogilyuk T. I., Phys. Rev. B, **90**, 115138 (2014).
8. Grigoriev P. D., Mogilyuk T. I., Phys. Rev. B, **95**, 195130 (2017).
9. Grigoriev P. D., Mogilyuk T. I., J. Phys.: Conf. Ser., **1038**, 012123 (2018).

Перенос носителей заряда и поляризация в структурах M/PZT/M

Юферев В. С., Делимова Л. А.

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург, 194021, Россия
(E-mail: ladel@mail.ioffe.ru)

Для анализа протекания тока через сегнетоэлектрическую (СЭ) M/PZT/M структуру предложен подход, общепринятый в полупроводниках, но практически не используемый в сегнетоэлектриках, а именно, основанный на рассмотрении транспорта носителей в диффузионно-дрейфовом приближении. Полагается, что электроны, генерируемые кислородными вакансиями, перемещаются в электрическом поле прыжками между центрами Ti^{+3} с некоторой эффективной скоростью. Распределение поляризации в пленке PZT описывается с разной степенью усложнения - от постоянной по величине вне дефектных слоев до определяющейся уравнением, следующим из теории Ландау-Гинзбурга. Показано, что при достаточно большой остаточной поляризации под действием деполяризующего электрического поля у одного из контактов формируется обогащенный электронами слой пространственного заряда (СПЗ), который является причиной появления на вольтамперных характеристиках пиков тока, не связанных с переключением доменов.

Указанные пики наблюдаются как в эпитаксиальных, так и поликристаллических пленках PZT со столбчатой структурой зерен и их непроводящими границами только при совпадении направлений смещения и поляризации, когда обогащенный электронами СПЗ образуется у катода (см. рис. 1). При моделировании учитывалась нестационарная процедура измерения тока с приложением ступенек напряжения с длительностью 0.2-2 сек. В результате удалось оценить основные параметры структуры: подвижность электрона, плотность кислородных вакансий, диэлектрическую константу, толщину дефектного слоя, высоту барьера [1-2]. Необходимо отметить, что измеренные пики тока можно использовать как диагностический метод контроля технологии роста СЭ пленок, поскольку наблюдение пиков тока означает, что, по меньшей мере, вектор поляризации сохраняется по всей толщине пленки.

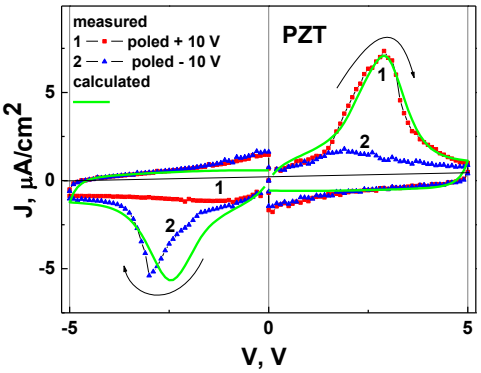


Рис. 1. *J-V* характеристики, измеренные в эпитаксиальной PZT пленке при (кривые 1) положительной и отрицательной (кривые 2) предварительной поляризации и вычисленные для совпадения направлений смещения и поляризации (твердая линия).

Предложенная модель была использована также для анализа плоских заряженных “tail-to-tail” и “head-to-head” доменных стенок и их реакции на приложенное внешнее напряжение [3].

ЛИТЕРАТУРА

1. Delimova L.A., Yuferev V.S. J. Appl. Phys.**124** 184102 (2018).
2. Delimova L.A., Yuferev V.S. J. Phys.: Conf. Ser. **1400**, 055003 (2019).
3. Yuferev V., Delimova L. 2021 IEEE ISAF http://dx.doi.org/10.1109/ISAF51943.2021.9477331

Магнитные и диэлектрические свойства перовскита Sr_2MnTiO_6

Р.М. Еремина[1,2*], Д.В. Попов[1], И.В. Яцык[1,2], А.В. Шестаков[1], Р.Г. Батулин[2], Т.И. Чупахина[3]

[1]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, Казань, 420029, Россия*

[2]*Институт Физики, Казанский Федеральный Универститет, Казань, 420008, Россия*

[3]*Институт химии твердого тела УО РАН, Екатеринбург, 620990, Россия*

[*]*e-mail: REremina@yandex.ru*

Слоистые оксиды на основе перовскита широко исследуются в последнее время благодаря их интересным электронным и магнитным свойствам, включая колоссальное магнитосопротивление, переход металл-изолятор, гигантский магнитоэлектрический эффект и поведение мультиферроика [1]. Свойства этих соединений сильно зависят от состава, количества слоев, дефицита кислорода и т. д. Перовскиты находят свое применение при изготовлении различных устройств. Перовскит Sr_2MnTiO_6 вызывает особый интерес, так как обладает высоким значением диэлектрической константы ε' со значением 125000 для частоты 1 кГц и температуры 700К [2].

Целью данной работы является исследование магнитных и диэлектрических свойств керамики Sr_2MnTiO_6. Температурные зависимости намагниченности измерялись в режимах охлаждения без внешнего магнитного поля (ZFC) и охлаждения во внешнем магнитном поле (FC) в диапазоне 2-300К на приборе PMMS-9 в Казанском федеральном университете в магнитных полях 500 Э, 1000 Э и 10000 Э. Линейная часть обратной магнитной восприимчивости аппроксимировалась по закону Кюри-Вейсса выше 100К. Установлено, что температура Кюри-Вейса отрицательна -400К, что указывает на антиферромагнитный характер изотропных обменных взаимодействий между спинами ионов марганца в соединении Sr_2MnTiO_6, температура упорядочения составила 39К.

Экспериментальный эффективный магнитный момент, полученный из параметра Кюри, составил $\mu_{eff} = 4.27\mu_B$, рассчитанный по формуле $\mu_{eff} = \sqrt{\frac{3k \cdot C}{N_A}}$. Первоначально, теоретический эффективный магнитный момент был рассчитан, исходя из предположения, что вклад дают только спины Mn^{4+} с S=3/2. Расчетное значение эффективного магнитного момента $\mu_{eff} = 3.87\mu_B$ меньше значения, полученного в эксперименте. Мы полагаем, что в образце присутствуют ионы марганца двух различных валентностей Mn^{4+} с S=3/2 и Mn^{3+} с S=2. Используя формулу $\mu_{eff}^{Theory} = g \cdot (\Sigma[N \cdot S(S+1)])1/2$, мы оценили концентрацию ионов Mn^{3+} и Mn^{4+} как 0,35 и 0,65, соответственно.

Были измерены спектры ЭПР при температурах 4,5 - 600 К на спектрометре Bruker EMX plus. Во всем диапазоне температур в спектре ЭПР наблюдается одна линия, кроме интервала от 40-44К. В интервале температур 44-44К наблюдались две линии ЭПР с эффективными значениями g-фактора $g_1 \sim 2$ и $g_2 \sim 12$, что обусловлено фазовым расслоением в Sr_2MnTiO_6. Мы связываем наблюдение второй линии с $g_2 \sim 12$ не с наличием примесей в образце, а с образованием коррелированных областей марганца одной валентности при переходе в парамагнитное состояние областей, где преобладает марганец другой валентности в узком температурном интервале. Проведены измерения диэлектрических констант в зависимости от частоты. Результаты обсуждаются.

Данная работа выполнена при поддержке гранта РНФ-22-42-02014.

1. Chowki, S., et al.: AIP Conference Proceedings. **1731**, 090040 (2016).
2. Álvarez-Serrano, I, et al.: Journal of the American Ceramic Society **93**, 2311 (2010).

Упорядоченное состояние внутренне-двухкомпонентного магнитоэлектрического материала Li_2ZrCuO_4 по данным ^7Li ЯМР

Вавилова Е. Л.[1], **Москвин А. С.**[2]

[1]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН*
Казань, 420029, Россия (E-mail: Jenia.Vavilova@gmail.com)
[2]*Уральский федеральный университет,*
Екатеринбург, 620083, Россия

Li_2ZrCuO_4 представляет собой магнитоэлектрический внутренне-двухкомпонентный материал, в котором фрустрированная квази-одномерная квантовая магнитная подрешетка Cu^{2+} со спином S = 1/2 связана с фрустрированной трехмерной псевдоспиновой квантовой изинговской электрической подрешеткой Li_I^+. [1]. В настоящей работе представлены результаты экспериментального и теоретического исследования формы низкотемпературных линий ЯМР ^7Li в ориентированных поликристаллических образцах. Возникновение несоразмерного спин-спирального порядка ниже $T_N \approx 6$ K приводит к резкому изменению спектра ЯМР ^7Li. Предложенная модель взаимодействия несоразмерных спиновых и стеклообразно упорядоченных электрических псевдоспиновых подрешеток позволяет последовательно описать формы линий ЯМР ^7Li [2]. Показано, что своеобразная форма линий ЯМР определяется специфическим, зависящим от образца, распределением ионов Li_I в стеклообразной упорядоченной электрической подрешетке. Спин-флоп переход происходит при 3,5 Тл, что приводит к трансформации спектра. Это позволяет сделать предположение о спиновой структуре в спин-флоп фазе.

Е.В. благодарит финансирование темы госзадания Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанского научного центра РАН

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Vavilova et al., Europhys. Lett. **88**, 27001 (2009).
2. A.S.Moskvin et al., Phys.Rev.B **87**, 054405 (2013)

Двумерная сверхпроводимость в слоистых материалах

Кунцевич А. Ю.[1]

[1]*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук*
Москва, 119991, Россия
(E-mail: alexkun*@lebedev.ru*)

Традиционно двумерные системы реализовывались на интерфейсах полупроводников и в полупроводниковых гетероструктурах, для которых свойственны крайне малые концентрации электронов и плотности состояний, а как следствие — сверхпроводимость в двумерных системах не реализовывалась. При малых концентрациях (10^{10}-10^{12} см$^{-2}$) преимуществом традиционных двумерных систем является возможность *in-situ* управления концентрацией и, как следствие, свойствами. Ультра-тонкие металлические сверхпроводящие пленки, как традиционные объекты с двумерной сверхпроводимостью, обладают слишком высокой 2D концентрацией (10^{14}-10^{15} см$^{-2}$) и не могут быть управляемыми. Первой полупроводниковой системой с управляемой квази-двумерной сверхпроводимостью можно считать интерфейс $SrTiO_3$ с электролитическим затвором [1].

Впоследствии также реализовывалась наведенная сверхпроводимость в классических двумерных полупроводниковых материалах[2], а также двумерных слоистых материалах(например графен[3] или поверхности топологического изолятора) и нанопроволоках[4].

Большинство исследований собственной двумерной сверхпроводимости в настоящее время приходится на слоистые материалы, толщиной от одного монослоя. Наиболее ярким примером следует считать взаимозакрученный бислой графена, в котором был реализован такой дизайн зонной структуры, что при определенных значениях концентраций электронов на уровне Ферми реализуется крайне высокая плотность состояний[5].

В докладе будет дан обзор современного состояния двумерной сверхпроводимости в слоистых материалах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ueno K., Nakamura S., Shimotani H.,et al, Nature Materials **7**, 855–858 (2008).
2. Oostinga, J. B., Maier L., et al, Phys. Rev. X 3, 21007 (2013).
3. Han Z., Allain A., Arjmandi-Tash H.,et al, Nature Physics **10**, 380–386 (2014).
4. Mourik, V. et al. Science **25**, 1003–1007 (2012).
5. Cao Y., Fatemi V.,et al, Nature **556**, 43–50 (2018).

Влияние фрактальных размеров бесконечных нормальных кластеров на резистивность керамических сверхпроводников

Ичкитидзе Л. П.[1, 2], **Белодедов М. В.**[3], **Селищев С. В.**[1], **Телышев Д. В.**[1, 2]

[1]*НИУ Московский институт электронной техник (МИЭТ), Москва, Зеленоград, 124498, Россия, E-mail: ichkitidze@bms.zone*
[2]*Первый Московский государственный медицинский университет им. И. М. Сеченова, Москва 119435, Россия*
[2]*Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва, 105005, Россия*

Керамические высокотемпературные (ВТСП) материалы имеют гранулярную структуру и в пространстве между гранулами образуются неоднородности в виде пор. Они соединяются, становятся открытыми порами и на их основе формируются каналы, так называемые бесконечные нормальные кластеры (БНК). В настоящей работе исследуются фрактальную размерность БНК, связь между ней и сосотоянием резистивности в керамических ВТСП материале системы Bi-2223 и дается оценка магниточувствительности образцов различных размеров.

Исследовано удельное сопротивление массивных и толстопленочных образцов керамического ВТСП материала системы Bi-2223. Они имели размеры: массивные (использовался пресс) – 6,0×1,5×0,5 мм^3, толстослойные (пресс не использовался) – 3,0×1,5×0,1 мм^3. Их параметры составляли: критическая температура ~ 105 К, критическая плотность тока ≈ 1-2 А/см^2. Были получены экспериментальные параметры: тока и напряжения, значения дифференциального сопротивления при различных фрактальных размерностях.

Для каждого типа образцов были определены фрактальные размерности границ между нормальной и сверхпроводящей фазами. Нормальные фазы рассматривались как неоднородности в виде БНК. Путём анализа микрофотографий исследуемых образцов были получены фрактальные размерности БНК для объемных (≈ 1,47) и толстослойных (≈ 1,73) образцов. Удельное сопротивление исследованных образцов хорошо описывает ранее предложенная модель перколяционной проводящей структуры, благодаря наличию фрактальных кластеров нормальной фазы в керамическом ВТСП-материале [1].

Показано, что на резистивное состояние керамических ВТСП-образцов системы Bi-2223 существенное влияет неоднородности в виде БНК. Было показано также, что фрактальное состояние увеличивает удельное сопротивление образца в широком диапазоне тока как при высоких, так и при низких значениях относительно критического тока, а также его дифференциальное сопротивление. Все эти факторы способствуют повышению вольт-тесловской магниточувствительности толстопленочных ВТСП-образцов и разработке на их основе магниторезистивных датчиков сверхслабого магнитного поля. Полученные результаты рекомендован использовать для создания датчика магнитного поля с пороговой магниточувствительности – ≤0,01 нТл.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (№ 075-03-2020-216 от 27.12.2019).

ЛИТЕРАТУРА

1. Kuzmin Yu.I. Tech. Phys. Lett. **30(6)**, 457 (2004).

Двумерные мультиферроики

Пятаков А.П.

Московский Государственный Университет им. М.В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия
(E-mail: pyatakov@physics.msu.ru)

В последние годы в ведущих научных журналах Nature, Science и др. появились сообщения об обнаружении двумерных магнитных материалов и мультиферроиков [1–6]. Их появление открывает новые широкие перспективы: особенности электронных и механических свойств двумерных материалов позволяют усиливать взаимодействия между тремя подсистемами мультиферроика: магнитной, сегнетоэлектрической и механической. Так, в двойных слоях CrI_3 баланс между антиферромагнитным и ферромагнитным состояниями может смещаться под действием электрического поля [4], а повышенная гибкость материалах позволяет ожидать сильных механоиндуцированных эффектов в магнитной и сегнетоэлектрической подсистемах [5].

Для графеноподобных материалов характерна дополнительная степень свободы электрона – долинная, которая позволяет еще увеличить разнообразие наблюдаемых эффектов и взаимодействий. Так в двойном слое VS_2 долинная поляризация исполняет роль связующего звена между сегнетоэлектрическим и антиферромагнитным упорядочением [6]. Усиление взаимосвязи между различными подсистемами кристалла имеет не только фундаментальный интерес, но и практическую значимость, в виду широкого распространения магнитной записи информации, и перспективами применений магнитоэлектрических материалов в спиновой электронике и стрейнтронике.

Работа поддержана грантом Министерства Образования №220-2583-7444

ЛИТЕРАТУРА

[1] Huang B., Clark G., Navarro-Moratalla E.et al, Nature, **546**, 270 (2017).

[2] Jiang S., Shan J., and Mak K. F., Nat. Mater. **17**, 406 (2018).

[3] Thiel L., Wang Z.,. Tschudin M. A et al, Science, **364**, 973 (2019).

[4] Deng Y., Yu Y., Song Y., Zhang J. et al, Nature **563**, 94 (2018).

[5] Edström A., Amoroso D., Picozzi S. et al, Phys. Rev. Lett. **128**, 177202 (2022).

[6] Liu X., Pyatakov A. P., and Ren W., Phys. Rev. Lett. **125**, 247601 (2020).

Фаза Гриффитса в замороженном двухкомпонентном магнетике

Чепак А.К.[1,2], Афремов ЛЛ.[2]

[1]*Институт химии ДВО РАН, просп. 159-летия Владивостока, Владивосток, 690022*
[2]*Дальневосточный федеральный университет, ул. Суханова, 8, Владивосток 690950, Россия*
Владивосток, 690035, Россия (E-mail: chepak.ak@mail.ru)

В этой работе мы рассмотрели замороженную ферромагнитную модель Изинга для исследования концентрационного фазового перехода. Было показано на примере кристаллической ГЦК, что случайное замещение магнитных атомов на немагнитные приводит к переходу в парамагнитное состояние даже при температурах $T=0$. При этом немагнитное разбавление приводит к появлению промежуточной фазы. В результате изучения зависимостей магнитных характеристик от концентрации магнитных атомов в различных магнитных полях нами удалось потвердеть наличие фазы Гриффитса.

Наличие фазового перехода определялось по поведению магнитной восприимчивости и намагниченности при изменении концентрации магнитных атомов. На Рис. 1 можно наблюдать аномальное поведение магнитной восприимчивости, проявляющееся в двух максимумах, интерпретируемое нами как проявление двух последовательных фазовых переходов. Подобные аномалии наблюдаются в реальные системах [1-3]. Таким образом мы считаем, что высококонцентрационный пик $p_{c,h}$ соответствует переходу из ферромагнитной фазы в фазу Гриффитса, а низкоконцентрационными $p_{c,l}$ из фазы Гриффитса в парамагнитную фазу. В области между $p_{c,h}$ и $p_{c,l}$ наблюдается состояние, обусловленное кластерами различного размера (смесь кластерного и спинового стекла).

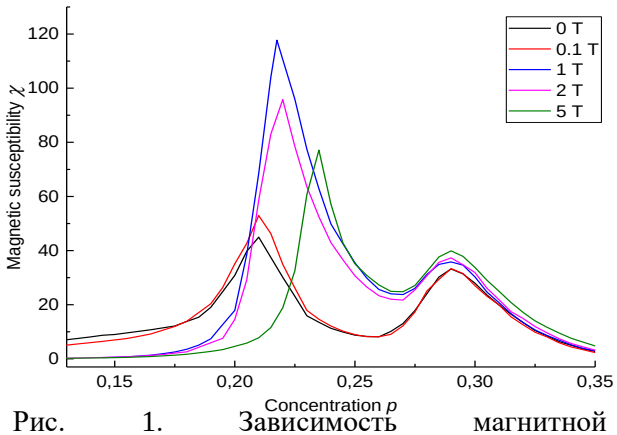


Рис. 1. Зависимость магнитной восприимчивости от концентрации магнитных атомов в различных магнитных полях.

Тот факт, что положение $p_{c,h}$ не изменяется при увеличении магнитного поля, указывает на то, что переход из ферромагнитного состояния действительно сопровождается образование крупных кластеров, слабо подверженных магнитному полю. Низкоконцентрационными пик $p_{c,l}$ ограничивает фазу Гриффитса от парамагнитного состояния. Очевидно, что парамагнетизм будет определятся изолированными друг относительно друга мелкими кластерами, на которые влияние магнитного поля будет максимальным

ЛИТЕРАТУРА

1. Xin Y. et al. Journal of Alloys and Compounds 893, 162222 (2022).
2. Anand K. et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 528, 167697(2021).
3. Silva Jr R. S. et al. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 546, 168851(2022).

Критическая динамика и формирование нанонеоднородных структур в твердых растворах антисегнетоэлектриков и релаксоров

Вахрушев С. Б.[1], Петрухно К. А.[1,2], Раевский И. П.[3]

[1]*Физико-Технический Институт им. А.Ф.Иоффе РАН*
Санкт-Петербург, 194021, Политехническая ул. 26, Россия
(E-mail: s.vakhrushev@ioffe.mail.ru)
[2]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,*
Санкт-Петербург, 195251, Россия
[3]*Южный Федеральный Университет,*
Ростов на Дону, 344090, Россия

Одними из наиболее перспективных и широко исследуемых диэлектрических материалов, используемых являются твердые растворы антисегнетоэлектрик/сегнетоэлектрик (АСЭ/СЭ) и релаксор/сегнетоэлектрик (антисегнетоэлектрик). В последние годы интерес к таким системам сместился от морфотропных композиций к составам в области малых концентраций СЭ. Одним из важных моментов является то, что в таких системах формируются нанодоменные или, в боле общем случае нанонеоднородные структуры (модулированные, несоразмерные, нанодвойниковые). Можно предположить, что именно такая нанонеоднородносить служит причиной чрезвычайной податливости таких материалов относительно внешних воздействий. Так, приложение слабых относительно поля переключения АСЭ фазы электрических полей приводит в твердом растворе ЦТС(2.4%) к сдвигу температуры СЭ,АСЭ перехода на несколько десятков градусов, что делает материал перспективным для электрокалорических применений. Помимо этого, охлаждение кристалла в таких полях позволяет получать регулярную структуру антисегнетоэлектрических доменов и доменных стенок.

Нами было проведено систематическое исследование процессов микроскопической перестройки структуры в и критической динамики твердых растворах $PbZr_{1-x}Ti_xO$ при $x \leq 0.06$. Была выявлена определяющая роль процессов межмодового взаимодействия в формировании несоразмерных и модулированных структур. Измерения в монодоменном в СЭ фазе образце подтвердили роль флексоэлектрического эффекта в формировании АСЭ структур. Нами впервые было показано, что смягчение антиферродисторсионной моды в М-точке зоны Бриллюэна неизбежно приводит к ее связи с поперечными акустическими колебаниями, что способствует возникновению модулированной фазы. Возникающий при этом фазовый переход оказывается несобственным антисегнетоэлектрическим, а с учетом конденсации мягкой моды в центре зоны Бриллюэна результирующая фаза может быть охарактеризована как несобственния ферриэлектрическая.

Проведенные нами исследования твердого раствора PMN/PSN выявили существование аналогичного межмодового взаимодействия в районе М-точки приводящего к формированию нанодвойниковой (с субмикронными размерами когерентных структурных двойников) АСЭ структуры, ранее не наблюдавшейся.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00328, https://rscf.ru/project/22-12-00328/

Модель Хаббарда во внешнем магнитном поле в приближении Гинзбурга-Ландау

Дубовский Л. Б., Бурмистров С.Н.

НИЦ «Курчатовский институт», Москва 123182, Россия
(E-mail: ldubovskii@mail.ru)

Традиционная электронная теория металлов исходит из слабо взаимодействующих электронов, движущихся в периодическом кристаллическом поле [1] и описываемых стандартной зонной теорией. Согласно зонной теории металлов различные оксиды переходных металлов должны быть проводниками, поскольку имеют нечетное число электронов на элементарную ячейку. Характерной системой такого рода является оксид никеля NiO. Однако, на примере оксида никеля выяснили, что такие соединения фактически ведут себя как изоляторы. Мотт [2] предсказал, что эту аномалию можно объяснить включением кулоновского взаимодействия между электронами и предложил модель для NiO в качестве примера изолятора. Такое поведение получило название моттовского изолятора. Изоляторы Мотта возникают, когда отталкивающий кулоновский потенциал между электронами достаточно велик, чтобы создать энергетическую щель.

Наиболее простой подход к этой проблеме представляет собой модель Хаббарда 1963 г. [3]. Существенный результат модели Хаббарда состоит в том, что зоны проводимости, возникающие в стандартной электронной теории металлов, при половинном заполнении оказываются расщепленными на две подзоны (зоны Хаббарда). При этом нижняя подзона оказывается полностью заполненной электронами проводимости, а верхняя оказывается полностью пустой. Между этими двумя подзонами возникает энергетическая щель.

В данной работе изучается зона Хаббарда во внешнем магнитном поле. Ее анализ проводится феноменологически в рамках теории Гинзбурга-Ландау с параметром порядка, описывающим электроны с противоположными спинами (ср. [4]). Рассмотрение проведено для случая близком к половинному заполнению нижней зоны Хаббарда, находящейся в металлическом состоянии. Возникающие уравнения, которые являются уравнениями Паули для противоположных спинов и к тому же нелинейными в результате взаимодействия электронов с различными спинами, удается аналитически решить в ряде важных случаев. Определено критическое магнитное поле, при котором рассматриваемый металл переходит в состояние изолятора как в случае парамагнитного эффекта спинов, так и в случае эффекта орбитального движения электронов проводимости. Найдено поверхностное натяжение между исходным металлом и возникающим изолятором аналогично [4]. Проанализирована возможность возникновения волны спиновой плотности электронов во внешнем статическом магнитном поле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрикосов А.А. Основы теории металлов. М.: Наука, 1987.
2. Mott N.F. Proc. Phys. Soc. A **62**, 416 (1949).
3. Hubbard J. Proc. Roy. Soc. A **276**, 238 (1963).
4. Дубовский Л.Б. Письма ЖЭТФ **99**, 25 (2014).
5. Dubovskii L.B. J. Low. Temp. Phys. **182**, 192 (2016); Physica B **536**, 469 (2018).

Исследование электросопротивления гранулированной керамики $La_{0.8}Ag_{0.1}MnO_3$ при приложении гидростатического давления до 8.5 ГПа

Гудин С.А.[1*], Гамзатов А.Г.[2], Арсланов Т.Р.[2]

[1]*Институт физики металлов имени М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108, Россия* ([*]*e-mail:* gudin@imp.uran.ru)

[2]*Институт физики ДФИЦ РАН, Махачкала, 367015, Россия*

Работа продолжает исследования проводимости манганитов, обладающих эффектом колоссального магнитосопротивления [1] - [7]. В гранулированном керамическом манганите $La_{0.8}Ag_{0.1}MnO_3$ исследовано влияние высокого гидростатического давления до 8.5 ГПа на транспортные свойства вблизи температуры перехода ферромагнетик-парамагнетик (максимума магнитосопротивления). Обнаружено [8], что поведение удельного сопротивления в условиях высокого давления аналогично поведению удельного сопротивления в внешнем магнитном поле. С ростом приложенного давления температура перехода от металлического типа проводимости к полупроводниковому T_{MI} монотонно возрастает с барическим коэффициентом dT_C/dP=4.54 К/ГПа в интервале давлений 0-4.84 ГПа. Для температуры 296 К на логарифмической зависимости удельного сопротивления от приложенного давления $\ln(\rho(P))$ обнаружена аномалия в виде излома линейного хода барической зависимости сопротивления при P_C=3.85 ГПа. Рассматриваемые сосуществующие два механизма рассеяния, необходимые для интерпретации полученной температурно-барической зависимости сопротивления, мы связываем с гранулированным состоянием исследуемого манганита. Один механизм связан с изменением собственного сопротивления зерна гранулы под действием гидростатического давления. Второй механизм связан с изменением сопротивления приграничного слоя гранулы под действием гидростатического давления. Прохождение тока через межгранульные контакты влияет слабо на рассматриваемые процессы. Показано, что обнаруженный переход в точке P_C из одного линейного изменения барического хода удельного сопротивления в другое (построенный в логарифмическом масштабе) однозначно связан с существованием в керамическом образце двух процессов рассеяния, - внутризернового и приграничного. Вблизи P_C оба процесса рассеяния вносят сравнимые по величине вклады в удельное сопротивление. Для давлений меньше 3.85 ГПа преобладает вклад в сопротивление от механизмов рассеяния в приграничных слоях зерен, а для высоких давлений преобладает вклад от области однородного зерна.

Авторы выражают благодарность профессору V. Markovich (Ben-Gurion University of the Negev) а также К.И. Кугелю за внимание к работе и полезные комментарии.

Работа выполнена при частичной поддержке проектов РФФИ (№№ 20-58-54006). Гудиным С.А. работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ «Квант» No. АААА-А18-118020190095-4

1. С.А.Гудин, М.И.Куркин, и др., ЖЭТФ, **148** (5), 1005 (2015)
2. С.А.Гудин, Н.И.Солин, и др., ФТТ, **60** (6), 1067, (2018)
3. А.Г.Гамзатов, Т.А.Гаджимурадов, и др. ЖЭТФ, **149** (1), 172, (2016)
4. С.А.Гудин, Н.И.Солин ЖЭТФ, **157** (4), 648, (2020)
5. С.А.Гудин, Н.И.Солин ФТТ, **62** (5), 669 (2020)
6. А. Г.Гамзатов, Т. А. Гаджимурадов, Женвен Ли, и др. ЖЭТФ **149** (1), 172 (2016)
7. A.G.Gamzatov, A.B. Batdalov, I.K. Kamilov, et al. Appl. Phys. Lett. **102**, 032404 (2013)
8. А.Г.Гамзатов, С.А.Гудин, Т.Р.Арсланов, М.Н.Маркелова, А.Р.Кауль Письма в ЖЭТФ **115,** N4, 218, 2022

Сверхпроводниковый однофотонный детектор - ключевой элемент квантового вычислителя на фотонах и ионах, схем квантовых коммуникаций и квантовых сенсоров

Гольцман Г.Н. [1,2]

[1]*Московский педагогический государственный университет, Москва, Россия*
[2]*Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Москва, Россия*

Фундаментальные исследования 90х годов локального неравновесного состояния в токонесущем сверхпроводящем нанопроводе при поглощении фотона привели нас к прорывной технологии счета фотонов – сверхпроводниковому однофотонному детектору SNSPD. В 2004 году нами была основана компания «Сверхпроводниковые нанотехнологии» (ООО Сконтел) – спин-офф МПГУ, которая успешно коммерциализирует многоканальные однофотонные приемные системы на базе SNSPD. Благодаря самой высокой квантовой эффективности в ИК диапазоне, быстрому счету фотонов, отсутствию шумов и малому джиттеру SNSPD стал востребован на глобальном рынке квантовых технологий, для разработки квантовых вычислителей на фотонах, сетей квантовых коммуникаций и разнообразных квантовых сенсоров. Более 350 исследовательских институтов, университетов, больших и малых коммерческих компаний по всему миру используют нашу продукцию.

В настоящее время изучается множество физических систем для реализации кубитов, включая сверхпроводящие цепи, захваченные ионы и нейтральные атомы, квантовые точки, центры окраски в твердом теле и фотоны. Сверхпроводниковые однофотонные детекторы являются необходимой компонентной базой для двух из них: для квантового вычислителя на фотонах и на ионах. Если сначала остановиться на первом, то здесь важно, что Knill, Laflamme и Milburn (KLM) предложили концепцию линейных оптических квантовых вычислений (LOQC), позволяющую создавать недетерминированные вентили с использованием источников фотонов, линейных оптических элементов и однофотонных детекторов. Несмотря на то, что реализация KLM-протокола возможна в свободном пространстве, необходимость в большом количестве оптических компонентов и их точной конфигурации требует более сложных решений. Благодаря ряду преимуществ, таких как масштабируемость, небольшая занимаемая площадь, отсутствие необходимости в оптической юстировке, а также малое энергопотребление и совместимость с CMOS технологией, квантовые фотонные интегральные схемы (QPICs) успешно решают эту задачу. В нашей презентации мы поговорим о принципах работы, истории развития, а также последних успехах наиболее многообещающего подхода к реализации QPICs на основе гибридных нанофотонно-сверхпроводниковых устройств. В этом случае нанопроволока NbN помещается поверх нанофотонного волновода из Si3N4, что увеличивает эффективную длину взаимодействия. По этой причине можно добиться почти полного поглощения фотонов и уменьшить площадь покрытия детектора. Это сокращает мертвое время устройства и увеличивает эффективность детектора. Наш подход полностью масштабируем и, наряду с большим количеством устройств, интегрированных в один чип, может быть адаптирован, например, и к среднему ИК-диапазону, где технология счета фотонов на рынке пока отсутствует. Что касается квантового вычислителя на ионах, то применение SNSPD детектора началось в самые последние годы и открыло возможности полностью перейти на поверхностные ловушки ионов.

Зависящая от поляризации проводимость границ зёрен в тонких плёнках феррита висмута

Д.О. Аликин[1], Е. Фомичев[2], А.С. Абрамов[1], Д.С. Чезганов[1], В.Я. Шур[1], Е.В. Araujo[3], А. Л. Холкин[1,4]

[1]*Уральский федеральный университет, Екатеринбург, 620026, Россия (E-mail: denis.alikin@urfu.ru)*
[2]*Charles University in Prague, Prague, Czech Republic*
[3]*Federal Institute of Education, Science and Technology of São Paulo, Votuporanga, Brazil*
[4]*University of Aveiro, Portugal*

Транспорт заряда вдоль интерфейсов в сложных оксидах привлекает повышенное внимание, потому что он создаёт новые функциональные возможности для применений в мемристивных устройствах сегнетоэлектрической памяти и для изменений свойств материалов за счёт инжекции проводящих интерфейсов [1]. В докладе обсуждается явление проводимости границ зёрен в тонких поликристаллических плёнках феррита висмута и его влияние на макроскопические свойства, токи утечки и диэлектрические потери [2]. При помощи методов сканирующей микроскопии проводимости нами было обнаружено, что проводимость по границам зёрен в тонких плёнках феррита висмута напрямую зависит от локализации поляризационного заряда. Поляризация в материале самоорганизованно выстраивается таким образом, что формируются кластеры, состоящие из нескольких зёрен, с преимущественным направление спонтанной поляризации, при этом границы зёрен, разделяющие кластеры обладают проводимостью на несколько порядков превышающую объёмную (Рисунок 1). Увеличенная проводимость границ зёрен также сопровождается увеличением механических напряжений, что было зафиксировано методом дифракции обратнорассеянных электронов. Возникновение повышенной проводимости объяснено локализацией заряженных дефектов на границах зёрен при повышенной температуре в процессе охлаждения плёнки после синтеза, что подтверждается в экспериментах по локальному переключению поляризации. Изменение доменной структуры при комнатной температуре не приводит к уменьшению величины проводимости по границам зёрен, что также указывает на принципиальную роль сегрегации заряженных дефектов на границах зёрен в увеличении токов утечки поликристаллических плёнок.

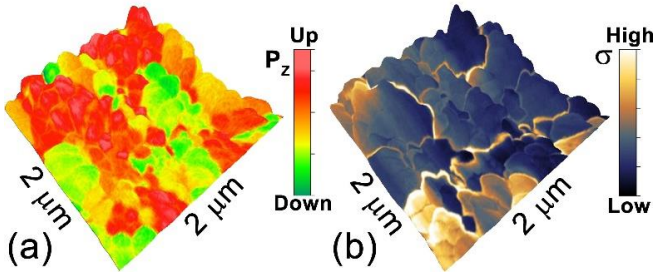


Рисунок 1. (a) Доменная структура и (b) электронная проводимость в тонких поликристаллических плёнках феррита висмута.

ЛИТЕРАТУРА

1. G. F. Nataf, M. Guennou, J. M. Gregg, D. Meier, J. Hlinka, E. K. H. Salje, J. Kreisel, Nat. Rev. Phys. **2**, 634 (2020)

2. D. Alikin, Y. Fomichov, S. P. Reis, A. Abramov, D. Chezganov, V. Shur, E. Eliseev, S. V. Kalinin, A. Morozovska, E. B. Araujo, A. Kholkin, Appl. Mater. Today **20,** 100740 (2020).

Структура магнитного потока в монокристаллах Fe_3GeTe_2

Сидельников М.С.[1], **Колесников Н.Н.**[1], **Винников Л.Я.**[1]

[1]*Институт физики твёрдого тела РАН, ИФТТ РАН, Черноголовка Моск. обл. 142432 Россия (E-mail :vinnik@issp.ac.ru)*

Слоистый магнитный полуметалл Fe_3GeTe_2 интенсивно исследуется различными методами при изучении структуры магнитного потока, в частности, методом сканирующей тунельной микроскопии [1]. Однако при исследовании доменной структуры ферромагнитных материалов этот метод ограничен малой площадью сканирования. В настоящей работе приводятся результаты исследования доменной структуры монокристаллов Fe_3GeTe_2 методом высокоразрешающей низкотемпературной методики декорирования магнитными наночастицами [2] практически на всей поверхности базисной плоскости исследуемого монокристалла. Также существенно, что методика декорирования пригодна для ферромагнетиков с температурой Кюри (T_c) ниже комнатной, так как для Fe_3GeTe_2 $T_c \approx 220$ К. На рис.1 представлена доменная структура на поверхности базисной плоскости тонкого монокристалла Fe_3GeTe_2 разной толщины. Заметно уменьшение размера доменов на участке (слева) толщиной порядка сотни нанометров.

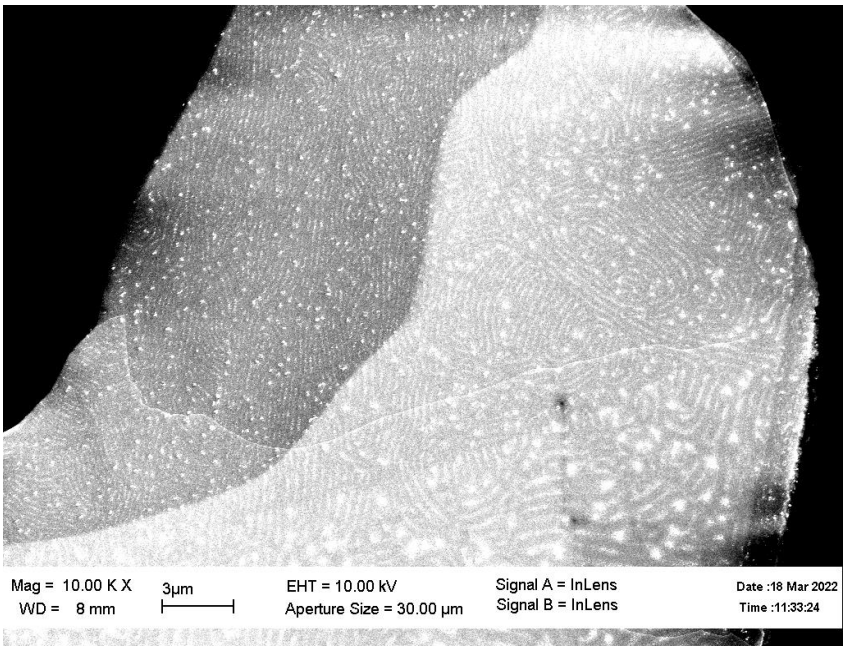


Рис. 2. Доменная структура монокристалла Fe_3GeTe_2 при температуре декорирования 8 К в магнитном поле 20 Э.

На участках монокристалла толщиной порядка десятка микрон наблюдалась лабиринтная доменная структура, характерная для одноосных ферромагнетиков с ветвлением доменов с ростом толщины.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.D. Nguen, J. Lee, T. Berlijn et al., Phys. Rev. B. **97**, 014425 (2018).
2. Винников Л.Я, Вещунов И.С., Сидельников М.С. и др., ПТЭ **4**, 141 (2019).

Разработка сегнетоэлектрической энергонезависимой памяти на основе тонких пленок HfO_2

Кондратюк Е.В., Михеев В.В., Чуприк А. А.

Московский физико-технический институт
Долгопрудный, 141700, Россия
(E-mail: chouprik.aa@mipt.ru)

Обнаружение сегнетоэлектрических свойств в тонких пленок оксида гафния [1] открыло возможности для реализации и внедрения энергонезависимой сегнетоэлектрической памяти с произвольным доступом (FeRAM), поскольку пленки HfO_2 идеально совместимы с современной кремниевой технологией микроэлектроники. Память FeRAM на основе HfO_2 обладает рядом отличных технических характеристик, а именно, демонстрирует идеальную масштабируемость ячеек, низкое энергопотребление, высокую скорость переключения и рекордный ресурс. Однако коммерциализация сегнетоэлектрических свойств тонких пленок HfO_2 всё ещё затруднена, что связано с ограниченным временем хранения состояния. Между тем, стандарты микроэлектроники требуют минимального времени долговременного хранения информации 10 лет.

В настоящее время вопросы хранения состояния являются наиболее важными и актуальными задачами в области применения сегнетоэлектрического оксида гафния. В частности, в этом направлении должны быть решены две основные проблемы. Во-первых, с помощью инженерии материалов и границ раздела должна быть разработана многослойная структура материалов, отвечающая всем отраслевым требованиям (включая хорошее время удерживания). Ряд научных групп сосредоточены на этой цели. Однако оценка и сравнение результатов инжиниринга материала сами по себе являются важной отдельной задачей, так как до сих пор отсутствует унифицированный тест на время хранения состояния. Действительно, особенностью этого технического показателя является то, что его нельзя измерить напрямую, поскольку для измерения фактических потерь состояния потребуется 10 лет. Поэтому второй актуальной задачей является разработка надежного метода долгосрочного прогнозирования считываемой поляризации по времени хранения информации.

В этой работе мы представляем физическую модель хранения состояния и физически обоснованный способ расчёта, который позволяет предсказывать потерю считываемой поляризации с течением времени. Они разработаны на основе нелинейной модели импринта [2] с учетом особенностей HfO_2. В частности, модель помимо инжекции заряда и его захвата ловушками, расположенными на границе раздела с электродами, учитывает вклад миграции мобильного заряда в функциональном сегнетоэлектрическом слое. Кроме того, модель учитывает, что пленка состоит из двух типов доменов, в которых скорость инжекции заряда различна. Помимо перечисленных факторов, будучи дополненной экспериментальными данными и соответствующей моделью кинетики переключения поляризации, модель хранения состояния позволяет прогнозировать считываемую поляризацию для различных рабочих частот микросхемы памяти. Для конденсаторов на основе $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ с малыми утечками модель хранения состояния находится в хорошем соответствии с экспериментальными результатами.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (№ 20-19-00370).

ЛИТЕРАТУРА

1. Boscke T. S., Muller J., Brauhaus D et al., Appl. Phys. Lett. **99**, 102903 (2011).

2. Tagantsev A. K., Stolichnov I., Setter N. J. Appl. Phys. **96**, 6616 (2004).

Гетероструктуры сегнетоэлектрики/диэлектрик

Мамин Р.Ф.

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: mamin@kfti.knc.ru)

Охтомо и Хвангом был обнаружен электронный газ высокой подвижности на интерфейсе между $LaAlO_3$ и $SrTiO_3$ [1]. Позже было показано, что эта гетероструктура обладает ферромагнитными свойствами [2] и переходит в сверхпроводящее состояние при температурах ниже 300 мК [3]. В нашей группе мы исследовали гетероструктуры на основе сегнетоэлектрических и диэлектриков оксидов со структурой типа $BaTiO_3/LaMnO_3$ и $BaTiO_3/La_2CuO_4$. С помощью расчётов из первых принципов были промоделированы электронные и магнитные свойства этих гетероструктур. Было показано, что в обеих гетероструктурах $BaTiO_3/LaMnO_3$ и $BaTiO_3/La_2CuO_4$ в области интерфейса исчезает запрещенная зона и система переходит в состояние с ненулевой плотностью состояний на уровни Ферми. Были получены образцы гетероструктур $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$, в том числе реализованные пленочной структуре, когда и сегнетоэлектрик $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ и манганит $LaMnO_3$ были последовательно нанесены на подложку MgO. Экспериментально измерены сопротивление образцов и показано возникновение квазидвумерной проводимости на интерфейсе гетероструктуры.

В образцах гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$ электрическое сопротивление значительно уменьшается с температурой при температурах ниже максимума при 160-230 K, указывая на металлический характер поведения проводимости интерфейса этой гетероструктуры. Температура максимума зависит от термоциклирования во внешнем магнитном поле, и она увеличивается с увеличением количества циклов. Сильное влияние внешнего магнитного поля на сопротивление гетероструктуры свидетельствует о том, что в области интерфейса существует неоднородный магнитный порядок, который постепенно переходит к однородному порядку при приложении магнитного поля при термоциклировании.

При исследовании гетероструктур $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$, как пленочных, так и на основе монокристалла $LaMnO_3$, был обнаружен своеобразный эффект отрицательной фотопроводимости гетероструктуры во время однородного освещения гетероструктуры со стороны сегнетоэлектрической пленки светом различного спектрального состава. Эффект состоит в том, что при освещении сегнетоэлектрической пленки сопротивление гетероструктуры, измеренное вдоль интерфейса, увеличивается. Величина эффекта зависит от спектрального состава света, наибольший эффект наблюдается при освещении зеленым светом. Также обнаружено кумулятивные эффект при последовательном добавлении освещения различного спектрального состава к сегнетоэлектрической плёнке [4].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00179.

1. A. Ohtomo, H. Ywang, *Nature* **427**, 6973 (2004).
2. S. Thiel, G. Hammerl, A. Schmehl et al., *Science* **313**, 5759 (2006).
3. N. Reyren, S. Thiel, A. D. Caviglia, et al., *Science* **317**, 1196 (2007).
4. А. В. Леонтьев, А. О. Чибирев, и др., Письма в ЖЭТФ, том 114, вып. 12, с. 818 – 823 (2021).

.

Первопринципные расчеты магнитных свойств одноосного гелимагнетика $CrNb_3S_6$

Д.В. Евсин[1], В.О. Борзилов[1], М.В. Мамонова[1], П.В. Прудников[1]

[1]*Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского*
Омск, 644077, Россия (E-mail:evsindv@stud.omsu.ru)

Магнитные кристаллы со слоистой структурой, в которых наблюдается периодическое киральное гелимагнитное упорядочение, интересны в качестве материалов для устройств спинтроники [1]. К ним относится гелимагнетик $CrNb_3S_6$, обладающий кристаллографической киральностью и одноосным взаимодействием Дзялошинского-Мория [2]. Экспериментальные исследования показали зависимость периода кирального гелимагнетика от внешнего магнитного поля при постоянной температуре, а именно переход к состоянию киральной солитонной решетки в тонких сколах [3]. В данной работе исследуются магнитные свойства гелимагнетика $CrNb_3S_6$ путём первопринципных расчётов с применением пакета VASP [4].

Кристаллическая структура исследуемой системы $CrNb_3S_6$ представлена на рис. 1. В расчётах использовалась 40-атомная ячейка с постоянной решетки a = 10,84892 а.е. [5]; количество k-точек сетки Монкхорста-Пака принималось равным 4; энергия обрезания - 500 эВ; вектор распространения спиновой спирали $q = 0{,}5a$ направлен вдоль оси z.

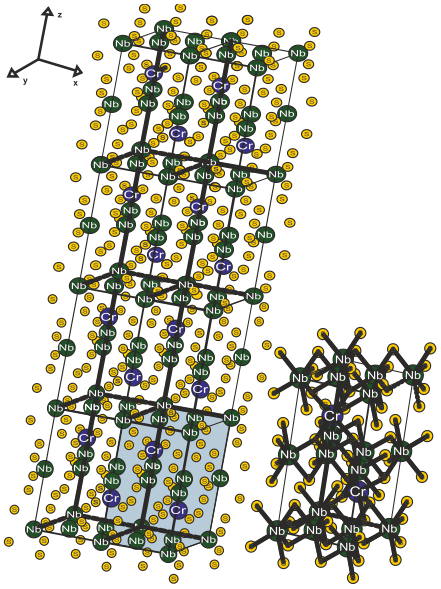


Рис. 1. Кристаллическая структура одноосоного гелимагнетика $CrNb_3S_6$.

В ходе расчетов были получены следующие значения проекций намагниченности магнитных моментов двух атомов хрома:
$\mu_x(Cr_1) = 2{,}755\ \mu_B$, $\mu_y(Cr_1) = -0{,}486\ \mu_B$,
$\mu_x(Cr_2) = 2{,}757\ \mu_B$, $\mu_y(Cr_2) = -0{,}488\ \mu_B$,
$\mu_x(Cr_3) = -0{,}486\ \mu_B$, $\mu_y(Cr_3) = 2{,}756\ \mu_B$,
$\mu_x(Cr_4) = -0{,}481\ \mu_B$, $\mu_y(Cr_4) = 2{,}755\ \mu_B$,
Также было получено значение полной энергии системы $E_{tot} = -301.813\ \mu_B$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (договор 0741-2020-0002). Для выполнения расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН».

ЛИТЕРАТУРА

1. Togawa Y., Kousaka Y., Inoue K., Kishine K., J. Phys. Soc. Jpn. **85**, 112001 (2016).
2. Song D., Wang L., Wang W. ... et al, Phys. Rev. B. **102**, 64432 (2020).
3. Togawa Y., Kishine J., Nosov P. A. ... et al, Phys. Rev. L. **122**, 017204 (2019).
4. Kresse G., Marsman M., Furthmuller J., VASP the GUIDE, Wien:Universitat Wien, (2016).
5. Ghimire N.J., Marsman M., Furthmuller J. ... et al, Phys. Rev. B. **87**, 104403 (2013).

Молекулярная самосборка пористых и композитных наноструктур для устройств микро- и наноэлектроники

Воротилов К.А.

МИРЭА- Российский технологический университет (РТУ МИРЭА),
Москва, 117454, Российская Федерация
(E-mail: vorotilov@mirea.ru)

В докладе рассмотрены методы формирования, свойства и применения в технологиях микро- и наноэлектроники тонких пленок пористых диэлектрических и сегнетоэлектрических материалов и композитов. Рассмотрены различные типы диэлектрических материалов с нанометровым размером пор и различной конфигурацией пористой структуры, сформированных методом молекулярной самосборки и их применение в качестве изолирующего диэлектрика с низкой диэлектрической проницаемостью в технологических процессах производства интегральных схем. Матричный материал представляет из себя неорганически-органический гибрид, в котором наряду с кремний-кислородным каркасом присутствуют мостиковые органические группы для упрочнения каркаса и терминальные метильные группы для гидрофобизации поверхности пор [1]. Обсуждается роль поверхности раздела двух фаз в процессах транспорта носителей заряда и других электрических свойств подобных структур [2,3].

В докладе рассмотрены также методы формирования пористых пленок PZT с использованием в качестве структурообразующих компонентов молекул поливинилпиролидинона, обрывающих цепочки поликонденсационных связей с формированием пор, а также неионогенных поверхностно-активных веществ, образующих в растворе мицеллы, взаимодействие которых приводит к созданию органических шаблонов различной конфигурации [4]. Рассмотрены основные структурные характеристики, механизмы формирования, роль границ раздела и свойства формируемых пленок. Сформированная пористая сегнетоэлектрическая пленка может служить шаблоном для заполнения пор другим материалом для создания композитной структуры. Заполнение пор осуществлено методом атомно-слоевого осаждения с использованием самолимитированной химической реакции, что обеспечивает высокую конформность воспроизведения рельефа. Рассмотрены свойства композитных структур PZT/TiO_2. Среди перспективных применений пористой керамики и композитов: пьезоэлектрические МЭМС, пироэлектрические детекторы, технологии памяти, газовые сенсоры и пр.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ № 19-29-03058, а также Министерства науки и высшего образования РФ (0706-2020-0022).

ЛИТЕРАТУРА

1. Vishnevskiy A. et al, Materials 13, 04484 (2020).
2. Sandeep S. et al, Nanomaterials 12, 1600 (2022).
3. Perevalov T.V. et al, Journal of Electronic Materials 51, 2521 (2022).
4. Atanova A. et al, Journal of the American Ceramic Society 105, 2 (2021).

Влияние формы агломераций наночастиц на диэлектрическую проницаемость нанокомпозитов металл-диэлектрик в микроволновом диапазоне.

Некрасов И.А.[1,2], Баранов Д.К.[1,2], Бекетов И.В.[1,2], Багазеев А.А.[1,2], Малкин А.И.[3], Князев Н.С.[3]

[1]ИЭФ УрО РАН, Екатеринбург, Россия (E-mail: nekrasov@iep.uran.ru)
[2]Кафедра электрофизики ФТИ УрФУ, Екатеринбург, Россия
[3]ИРИТ-РТФ УрФУ, Екатеринбург, Россия

Для нанокомпозитов типа металл-диэлектрик (наночастицы 75нм Al или TI в диэлектрической матрице эпоксидной смолы) методом линии передачи получены комплексные коэффициенты отражения и пропускания S_{11} и S_{21} в диапазоне 8-12 ГГц. На основе этих данных методом NRW вычислены комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости в данном диапазоне частот. Теоретически комплексные диэлектрическая и магнитная проницаемости были получены в рамках приближения эффективной среды. На основе обобщенного уравнения Бруггемана для эффективной диэлектрической проницаемости нанокомпозита показано, что с ростом объемной доли нанопорошка в композите геометрический характер агломератов наночастиц изменяется от нитевидных до практически сферических. Полученные теоретические данные хорошо согласуются с результатами СВЧ экспериментов и данными оптической и электронной микроскопии.

Рассеяние носителей тока на нематических флуктуациях в железосодержащих сверхпроводниках

Гимазов И. И.[1], **Таланов Ю. И.**[1], **Лядов Н. М.**[1], **Чареев Д. А.**[2], **Васильев А. Н.**[3]

[1]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Казань, 420029, Россия (E-mail: gimazov@kfti.knc.ru*)

[2] *Институт экспериментальной минералогии РАН, ул. Академика Осипьяна, д.4, Черноголовка, 142432, Россия*

[3]*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, д.1, Москва, 119991, Россия.*

Характерной особенностью фазовой диаграммы железосодержащих сверхпроводников является наличие обширной области нематического упорядоченного состояния. В пниктидах железа она располагается между линией структурного перехода от высокотемпературной тетрагональной фазы к низкотемпературной орторомбической $T_s(x)$ (x – концентрация примеси) и границей антиферромагнитно упорядоченного состояния $T_m(x)$ [1]. Ещё шире область нематического упорядочения на фазовой плоскости селенида железа FeSe, где она простирается от температуры структурного перехода ($T_s(x)$~90K) до перехода в сверхпроводящее состояние ($T_c(x)$~9K) [2]. С помощью оптической спектроскопии с высоким временным разрешением были обнаружены флуктуации нематического параметра порядка в широкой области температур $T>T_c$ [3].

Нематическое упорядочение приводит к нарушению симметрии C_4 с переходом к C_2. Это отражается в анизотропии сопротивления в базисной плоскости кристаллов FeSe (другими словами, - в анизотропии скорости рассеяния носителей тока) [4].

Что касается нематических флуктуаций, то их можно обнаружить только высокочастотными методами (например, - оптическим [3]). В измерениях сопротивления $R(T)$ на постоянном токе они не проявляют себя как дополнительные центры рассеяния. Однако, используя метод регистрации микроволнового поглощения (МВП) на частоте порядка 10^{10} Гц удается детектировать их наличие в некоторой области температур, где время их жизни сравнимо с периодом электромагнитных колебаний [5].

Замена части селена в FeSe на теллур приводит к повышению критической температуры в полтора раза из-за возникновения химического давления [6]. Но в соединении $FeTe_{1-x}Se_x$ не происходит переход в стационарное нематически упорядоченное состояние. А вопрос о наличии в них нематических флуктуаций остается открытым.

Проведенное нами с помощью измерения МВП исследование, результаты которого представлены в настоящей работе, показали, что такие флуктуации присутствуют в $FeTe_{1-x}Se_x$ и влияют на рассеяние носителей тока в широкой области температур, от ~50K до ~200K. Это явно видно на сравнении температурной зависимости амплитуды МВП и $R(T)$, полученной в измерениях на постоянном токе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kasahara S., Shi H. J., Hashimoto K., et al., Nature 486, 382 (2012).
2. Wang P. S., Sun S. S., Cui Y., et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 237001 (2016).
3. Chih-Wei Luo, Po Cheng, Shun-Hung Wang, et al., npj Quantum Materials **2**:32 (2017).
4. Tanatar M. A., Böhmer A. E., Timmons E. I., et al., **117,** 127001 (2016).
5. Гимазов И. И., Лядов Н. М., Чареев Д. А. и др. ЖЭТФ, **156**, 98 (2019).

6. Chiheng Dong, Hangdong Wang, Zujuan Li, et al., Phys. Rev. B **84**, 224506 (2011).

Перспективные схемы генерации однофотонных состояний на основе нелинейных оптических эффектов

Калачев А. А.

ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420111, Россия
(E-mail: a.a.kalachev@mail.ru)

Доклад посвящен проблеме создания эффективных источников однофотонных и перепутанных двухфотонных состояний электромагнитного поля, широко используемых в современной квантовой оптике и квантовых оптических технологиях. Основное внимание уделяется источникам, основанным на явлениях спонтанного параметрического рассеяния света и спонтанного четырёхволнового смешения в кольцевых микрорезонаторах. В частности, обсуждаются принципы получения чистых однофотонных состояний [1] и методы генерации однофотонных кубитов в частотном представлении [2, 3]. Представлены результаты моделирования таких источников в системах кольцевых микрорезонаторов на основе нитрида кремния или ниобата лития. Кроме того, рассматриваются перспективные схемы генерации однофотонных кубитов и кудитов в представлении орбитального углового момента [3], которые можно использовать для реализации квантового хеширования и квантовой цифровой подписи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chuprina I.N., Perminov N.S., Tarankova D.Yu., Kalachev A.A. Laser Phys. Lett., **15**, 105104 (2018).
2. Chuprina I.N., Kalachev A.A. Phys. Rev. A, **100**, 043843 (2019).
3. Dudalov A.S., Kalachev A.A. (in preparation)
4. Turaykhanov D.A., Akat'ev D.O., Vasiliev A.V., Ablayev F.M., Kalachev A.A. Phys. Rev. A, **104**, 052606 (2021).

Спиновый ток в гетероструктуре иридат/манганит

Овсянников Г.А.[1], Константинян К.И.[1], Калачев Е.А.[2], Климов А.А.[1,2], Шадрин А.В.[1,3], Шмаков В.А.[1]

[1]*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук Моховая 11-7, 125009, Москва, Россия(E-mail:* gena@hitech.cplire.ru).

[2] *Российский технологический университет - МИРЭА, проспект Вернадского 78, 119454, Москва, Россия.*

[3]*Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Долгопрудный 141701, Россия.*

Эпитаксиальные плёнки иридата стронция $SrIrO_3$ и манганита $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ нанометровой толщины осаждались на монокристаллические подложки галата неодима (110) $NdGaO_3$ (NGO). Рост эпитаксиальных плёнок осуществлялся методом магнетронного напыления при температурах подложки 770-800˚C в смеси газов Ar и O_2 с общим давлением 0.3-0.5 mBar [1].

Параметр спинового затухания Гильберта α и уширение линии, вызванной неоднородностями ΔH_0 удается определить, используя выражение $\Delta H(F)=4\pi\alpha F/\gamma+\Delta H_0$ При напылении $SrIrO_3$. поверх пленки $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ α, увеличивается с $2.0\ 10^{-4}$ до значения $\alpha = 6.7\ 10^{-4}$. Величина реальной части спиновой проводимости определяется из следующего выражения

$$\mathrm{Re}\, g^{\uparrow\downarrow} = \frac{4\pi M_0 d_F}{g_0 \mu_B}\left(\alpha_{SIO/LSMO} - \alpha_{LSMO}\right)$$

Подставляя экспериментальные значения параметров для $SrIrO_3$/ $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ гетероструктуры, получаем $\mathrm{Re}\, g^{\uparrow\downarrow} = (6.0\pm0.5)\cdot10^{19}\ \mathrm{m}^{-2}$. Отметим, что $\mathrm{Re}\, g^{\uparrow\downarrow} = 1.3\ 10^{18}\ \mathrm{m}^{-2}$ было получено в [2] для гетероструктуры $SrIrO_3$/ $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$, изготовленной методом лазерной абляции. Согласно данным [3] при изменении толщины $SrIrO_3$ пленки от 10 до 40 nm $\mathrm{Re}\, g^{\uparrow\downarrow}$ гетероструктуры меняется от 1.3 до 3.6 10^{19} m^{-2} соответственно, что близко к нашему значению.

Как показано в теоретически в [4] $\mathrm{Re}\, g^{\uparrow\downarrow}$ в основном определяется параметрами нормального металла: удельным сопротивлением и длиной спиновой диффузии и не зависит от границы. $\mathrm{Re}\, g^{\uparrow\downarrow} \approx h/(e^2 \rho_{SIO}\lambda_{SIO}) = 6\ 10^{19}\ \mathrm{m}^{-2}$ для параметров в эксперименте. В то же время $\mathrm{Im}\, g^{\uparrow\downarrow}$ зависит от электронных свойств границы раздела между ферромагнетиком и нормальным металлом при этом величина спин-орбитального взаимодействия на границе играет определяющую роль [4].

Величина спинового угла Холла θ_{SH} , определенная из измерений спинового магнитосопротивления гетероструктур $SrIrO_3/La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$ и пленок $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$, на порядок превышает значение θ_{SH} для гетероструктуры Pt/ $La_{0.7}Sr_{0.3}MnO_3$.

Исследования проводились с использованием оборудования Уникальной научной установки #352529 "Криоинтеграл" (соглашение МОН № 075-15-2021-667).

ЛИТЕРАТУРА

1. G.A. Ovsyannikov et al., Phys. Rev B, **102**: 14440 (2020).
2. S. Crossley, et al., Phys. Rev B., **100,** 115163 (2019).
3. X. Huang et al., Adv. Mater., 20082 (2021).
4. J. Dubowik, et al., Physical Review Applied **13**, 054011 (2020).

Контроль за вектором намагниченности ферромагнитного слоя в двухслойных гетероструктурах ферромагнетик/сегнетоэлектрик

Камашев А.А., Леонтьев А.В., Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф.

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: kamandi@mail.ru)

Наши исследования направлены на создание сверхпроводящего спинового клапана на сегнетоэлектрической подложке. Управление сверхпроводящим током в такой системе будет происходить под действием электрического поля. Для этого очень важно отладить технологию контролю за направлением вектора намагниченности ферромагнитного слоя в двухслойной гетероструктуре ферромагнетик/сегнетоэлектрик. Это необходимо для изменения взаимной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев в полной структуре сверхпроводящего спинового клапана. Взаимное изменение направления векторов намагниченностей ферромагнитных слоев под действием электрического поля позволит контролировать температуру перехода в сверхпроводящее состояние в спиновом клапане.

Здесь мы исследовали двухслойные структуры ферромагнетик/сегнетоэлектрик. В качестве ферромагнитных материалов использовались железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co). Выбор данных материалов обусловлен, во-первых, использованием этих материалов в подобных исследованиях, во-вторых, их доступностью для применения для наших задач. В качестве сегнетоэлектрических подложек были использованы нелинейные кристаллы ниобата лития ($LiNbO_3$) различных срезов. Использовались подложки Z-cut, 41°Y-cut с хорошо отполированной поверхностью, то есть с минимальной шероховатостью.

Были приготовлены различные образцы двухслойных систем ферромагнетик/сегнетоэлектрик с варьируемыми толщинами ферромагнитных слоев в пределах от 5 до 10 нм на поверхности сегнетоэлектрической подложки ниобата лития различных срезов. Далее была проведена магнитная характеризация всех образцов при помощи магнитополяриметрического комплекса на основе магнитооптического эффекта Керра. Для всех серий образцов удалось пронаблюдать магнитные петли гистерезиса с насыщением в поле 50-100 Э, в зависимости от ферромагнитного материала.

Методом эффекта Керра удалось зарегистрировать изменение ориентации намагниченности ферромагнитного слоя при приложении внешнего электрического напряжения от 10 до 50 В. Исследования двухслойных структур ферромагнетик/сегнетоэлектрик с использованием сегнетоэлектрической подложки ниобата лития среза 41°Y-cut продолжаются.

Согласно нашим результатам, можно утверждать, что удается изменять направление вектора намагниченности ферромагнитного слоя в двухслойной системе ферромагнетик/сегнетоэлектрик под действием электрического поля.

Исследования поддержаны грантом РНФ № 21-72-10178.

Связь структурных и функциональных свойств в $LuFeO_3$ легированном Sc

Турыгин А.П.[1], Аликин Д.О.[1], Ушаков А.Д.[1], Абрамов А.С.[1], Жалудкевич А.[2], Pakalniškis A.[3], Kareiva A.[3], Карпинский Д.[2]

[1]*Институт естественных наук и математики УрФУ, Екатеринбург, Россия*
[2]*ГО "НПЦ НАН Беларуси по материаловедению", Минск, Беларусь*
[3]*Институт химии Вильнюсского университета, Вильнюс, Литва*
(E-mail: alexander.abramov@urfu.ru)

Мультиферроики в последнее десятилетие являются предметом повышенного интереса со стороны исследователей в области новых функциональных материалов. Недавно обнаруженные ферриты серии $REFeO_3$ (RE=Lu, Yb) с гексагональной структурой, относящиеся к мультиферроикам, имеют сегнетоэлектрические и магнитные свойства при комнатной температуре [1,2]. Мультиферроики серии $REFeO_3$ (RE=Lu, Yb) характеризуется орторомбическим типом искажений с центросимметричной кристаллической структурой [3]. Такие составы являются мультиферроиками второго типа с незначительной величиной магнитоэлектрического взаимодействия, так как их сегнетоэлектрические свойства обусловлены магнитным упорядочением [4]. Подобное взаимодействие между магнитными и сегнетоэлектрическими доменами представляет значительный интерес для создания нового класса устройств магнитных датчиков, устройств памяти и накопления энергии [5]. Для стабилизации полярной гексагональной фазы в таких составах используют различные схемы химического замещения исходного соединения $LuFeO_3$.

В работе исследовались твердые растворы на основе $LuFeO_3$, легированные Sc и изготовленные методом твердофазного синтеза и золь-гель методом. Показано, что макроскопически однофазные керамики $LuFeO_3$ на локальном уровне имеют отклонения в фазовом составе и степени легирования. Впервые визуализирована доменная структура керамик на основе $LuFeO_3$ и показано, что максимальные значения пьезоэлектрического отклика наблюдаются вблизи 75% замещения Lu ионами Sc. Измеренные диэлектрические характеристики в $LuFeO_3$, легированном Sc, показали размытый пик вблизи температур 200-240°C. Анализ максимума диэлектрической проницаемости при помощи модифицированного закона Кюри-Вейса указывает на наличие релаксорно-подобного состояния, что может быть обусловлено фазовой гетерогенностью керамики. Также было обнаружено, что при комнатной температуре керамики обладают прыжковой проводимостью с энергией активации ~ 0.36 eV, а при повышении температуры свыше 200-240°C происходит изменение характера проводимости на омическую.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ № 21-52-04011 и БРФФИ №Т21RM-040)

ЛИТЕРАТУРА

1. Dong S., Liu J.-M., Cheong S.-W., Ren Z., Adv. Phys., **64**, 519-626 (2015).
2. Jeong Y.K., Lee J.-H., Ahn S.-J., Jang H.M., Chem. Mater., **24**, 2426–2428 (2012).
3. Wang W., Zhao J., Wang W. et al., Phys. Rev. Lett., **110**, 237601 (2013).
4. Chowdhury U., Goswami S., Bhattacharya D. et al., Appl. Phys. Lett., **105**, 052911 (2014).
5. Spaldin N.A., Ramesh R., Nat. Mater., **18**, 203–212 (2019).

Исследование поля деформаций в монокристаллических сегнетоэластиках $LaAlO_3$ с микроскопически неоднородной доменной структурой, активированных редкоземельными ионами, методом оптической спектроскопии высокого разрешения

Абишев Н. М.[1], Болдырев К. Н.[2], Малкин Б. З.[1], Мумджи И. Э.[1], Никитин С. И.[1], Попова М. Н.[2]

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия*
[2]*Институт спектроскопии РАН, Троицк, Москва, 420029, Россия*
(E-mail:abishevnm@gmail.com)

Структурный фазовый переход в кристаллах $LaAlO_3$ из кубической фазы *Pm*-3*m* в ромбоэдрическую *R*-3*c* при температуре 514 C^o индуцируется трехкратно вырожденной мягкой модой в вершине *R* зоны Бриллэна, соответствующей поворотам кислородных октаэдров вокруг одной из осей симметрии 3-го порядка кубической решетки. Нормальные координаты мягкой моды линейно связаны с деформациями сдвига в трех взаимно перпендикулярных кристаллографических плоскостях, и фазовый переход сопровождается образованием неоднородной доменной структуры, содержащей четыре типа доменов-двойников с осями симметрии вдоль четырех тригональных осей. Упаковка доменов в объеме кубической фазы и конкуренция деформаций сдвига противоположных знаков на границах соприкасающихся доменов индуцируют в доменах поля случайных деформаций. В настоящей работе выполнено исследование случайных деформаций в мульти-доменных образцах $LaAlO_3$ на основе измерений и анализа оптических спектров высокого разрешения примесных некрамерсовских редкоземельных ионов (Ho^{3+}, Tm^{3+}, 0.5 вес.%), замещающих ионы La^{3+} в позициях с точечной группой симметрии D_3. Тригональное кристаллическое поле (КП) расщепляет 4*f*-мультиплеты на синглеты и дублеты. Низкосимметричные деформации расщепляют некрамерсовские дублеты и обусловливают специфические особенности профилей наблюдаемых спектральных линий, соответствующих переходам синглет-дублет и дублет-дублет, в частности, аномально сильное уширение на крыльях линии и двух- или трехкомпонентная тонкая структура. Проведена идентификация спектральных линий с использованием данных селективной лазерной спектроскопии, определены параметры КП, в рамках модели обменных зарядов вычислены параметры электрон-деформационного взаимодействия [1,2]. Профили спектральных линий успешно воспроизведены усреднением распределений интенсивности излучательных переходов между электронно-ядерными подуровнями участвующих в переходе электронных уровней энергии с введенной в данной работе функцией распределения двух компонент тензора деформации, конкурирующих на границах доменов. Результаты работы могут быть использованы для контроля процессов монодоменизации сегнетоластиков и развития методов томографии дефектов в кристаллах.

Работа Н.М. Абишева была поддержана грантом РФФИ №19-32-90044.

ЛИТЕРАТУРА

1. Boldyrev K.N., Abishev N.M., Mumdzi I.E. et al., Phys. Rev. B **103**, 054103 (2021).
2. Boldyrev K.N., Abishev N.M., Mumdzi I.E. et al.,. Opt. Mater. X **14C**, 100155 (2022).

Фазовые переходы в твердых растворах $Na(Nb_{0.9}Me_{0.1})O_3$ (Me=Bi, Fe)

Оспельников Н.М., Барабанова Е.В.

Тверской государственный университет
Тверь, 170002, Россия (E-mail: Barabanova.EV@tversu.ru)

Одной из актуальных задач современного материаловедения является поиск новых функциональных материалов с особыми электрическими свойствами. Твердые растворы на основе ниобата натрия являются одной из наиболее распространенных систем для создания сегнетоэлектрических керамик. При этом используется как изовалентное, так и гетеровалентное замещение ионов натрия и ниобия.

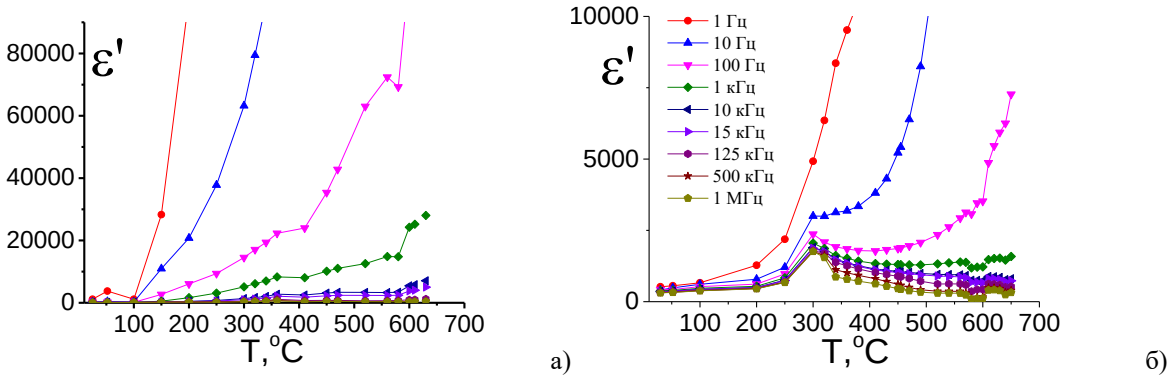


Рис. 1. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости для керамики $NaNb_{0,9}Fe_{0,1}O_3$ (а) и $NaNb_{0,9}Bi_{0,1}O_3$ (б).

В данной работе рассмотрено получение и диэлектрические свойства твердых растворов на основе ниобата натрия с замещением ионов ниобия ионами железа и висмута. Легирование производилось в количестве 10 мол. %. Керамика была получена по традиционной керамической технологии при температуре спекания 1100 °С.

Диэлектрическая проницаемость исследовалась в частотном диапазоне 1 Гц – 1 МГц и диапазоне температур от комнатной до 650 °С. Как можно видеть на рисунке 1 в керамике $NaNb_{0,9}Fe_{0,1}O_3$ максимум диэлектрической проницаемости наблюдается при 630 °С, т.е. практически при температуре Кюри чистого ниобата натрия. При уменьшении частоты диэлектрическая проницаемость в высокотемпературной области возрастает настолько, что максимум исчезает. В случае легирования висмутом величина диэлектрической проницаемости на порядок меньше, а ее максимум наблюдается при гораздо более низкой температуре – 300 °С. Но на низких частотах также максимум не наблюдается.

Замещение ниобия железом приводит к более высоким значениям диэлектрической проницаемости керамики, чем в случае замещения висмутом.

Характер зависимости 1/ε(T) позволяет отнести фазовый переход в данных системах к фазовому переходу 1 рода.

Сверхпроводимость на границе несверхпроводящих La_2CuO_4 и $La_{1.56}Sr_{0.44}CuO_4$

А.А. Быков[1], К.Ю. Терентьев[1], Д.М. Гокхфельд[2]

[1]*ПИЯФ им. Константинова НИЦ КИ Гатчина,* 188300, *Россия (E-mail: redi87@bk.ru*)
[2]*Институт Физики им. Киренского, Красноярск,* 660036, *Россия*

Критический ток ВТСП определяется пиннингом, то есть закреплением вихрей Абрикосова на микроструктурных дефектах. На сегодняшний день разрабатываются различные типы внедренных центров пиннинга, в данной работе рассматривается возможность организовать центры пиннинга с помощью управляемой диффузии допанта. Композиты, полученные отжигом несверхпроводящих La_2CuO_4 и $La_{1.56}Sr_{0.44}CuO_4$ исследовались методами энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, сканирующей электронной микроскопии [1], малоуглового рассеяния нейтронов [2], измерений намагниченности и проводимости [3]. В результате диффузии стронция при отжиге на границах гранул возникает сверхпроводимость, в то время как внутренний объем гранулы пригоден для закрепления сверхпроводящего вихря. Построена модель [3,4], описывающая магнитные и транспортные свойства образцов при малых магнитных полях как сеть слабых связей образованных сверхпроводящими областями. При больших полях поведение системы определяется намагниченностью несвязных сверхпроводящих островков. Средний размер сверхпроводящих областей оценивался из модели расширенного критического состояния. Карты распределения стронция для таких систем рассчитаны численно, проведено сравнение с экспериментальными данными. Найден коэффициент диффузии стронция, зависимость размеров сверхпроводящих областей от времени спекания показывает насыщение, вызванное падением градиента концентрации стронция. Такое поведение подтверждает модель диффузионного фронта для таких систем. Интенсивность магнитного рассеяния МУРН в 2–3 раза выше при охлаждении в поле, чем без. Дополнительные магнитные неоднородности из-за замыкания линий напряженности магнитного поля, вызывают дополнительное рассеяние.

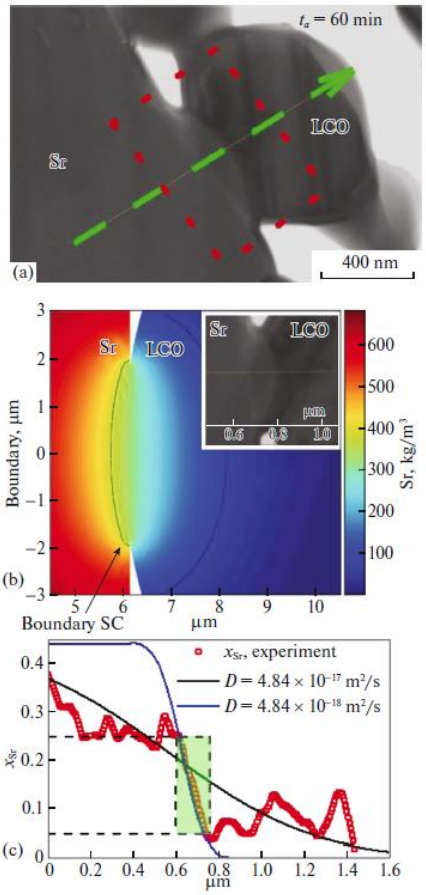


Рис. 3. (a) Микрофотография контакта разнородных гранул. (b) Расчетная карта концентрации стронция при контакте. Сверхпроводящая область ограничена линиями. (c) Экспериментальные и расчетные значения атомной доли Sr.

ЛИТЕРАТУРА

1. Bykov A.A., Gokhfeld D.M., Terent'ev K.Yu. et al., Russ. J. Phys. Chem., **95** (2021).
2. Bykov A.A., Gokhfeld D.M., Terent'ev K.Yu. et al., J. Supercond. Nov. Magn, **32** (2019).
3. Bykov A.A., Gokhfeld D.M., Terent'ev K.Yu. et al., J. Supercond. Nov. Magn. **31** (2018).
4. Bykov A.A., Gokhfeld D.M., Terent'ev K.Yu. et al., Phys. Solid State. **54** (2012).

Эффект сохранения полярного состояния выше температуры фазового перехода в керамике $BaTiO_3$

Л.В. Гимадеева[1,*], Д.О. Аликин[1], Q. Hu[2], X. Wei[2], В.Я. Шур[1]

[1]*Институт Естественных Наук и* Математики*, Уральский Федеральный Университет, 620000, Екатеринбург, Россия (e-mail: lv.gimadeeva@urfu.ru)*

[2]*Key Laboratory of the Ministry of Education & International Center for Dielectric Research, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China.*

Существование полярных нанокластеров в параэлектрической фазе сегнетоэлектрических было предсказано в середине XX века [1]. Наличие полярных включений выше температуры Кюри (T_c) было подтверждено при помощи интегральных измерений генерации второй гармоники [2]. Недавно наличие полярных нанокластеров в титанате бария было продемонстрировано на атомарном масштабе [3, 4].

В работе исследовались изменение доменной структуры, электромеханический отклик и распределение заряда при сегнетоэлектрическом фазовом переходе в керамике титаната бария. Использование неразрушающей методики силовой микроскопии пьезоэлектрического отклика (СМПО) позволило с высоким пространственным разрешением визуализировать доменную структуру и измерять пьезоэлектрические свойства в отдельных зернах при нагреве и охлаждении. Контроль температуры поверхности керамики осуществлялся при помощи термопары. Полученные результаты анализировались совместно с данными макроскопических измерений методом диэлектрической спектроскопии и интегрального пьезоэлектрического коэффициента, измеренного при помощи лазерной интерферометрии.

Показано, что при комнатной температуре доменная структура внутри зерна керамики состоит из a-доменов, разделённых 90° доменными стенками, а также включает области c-доменов с 180° доменными стенками. С ростом температуры наблюдалось слабое изменение СМПО-отклика вплоть до T_c=125°C. При достижении температуры фазового перехода исчезали a-домены в объеме зерна, а контраст сегнетоэлектрических доменов сохранялся. Локальные петли сегнетоэлектрического гистерезиса сохраняли форму выше T_c, при 140°C. Частичное сохранение полярного состояния выше температуры фазового перехода можно отнести за счет влияния полей объемного экранирования, которые сохраняются в параэлектрической фазе. В области границы зерна кластеры полярной фазы имели более высокий отклик и сохранялись до более высокой температуры, что обусловлено повышенной концентрацией заряженных дефектов.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ. Исследование проведено при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект № 20-32-90201\20).

ЛИТЕРАТУРА

1. Känzig W., Maikoff N., Helv. Phys. Acta **24**, 343 (1951).
2. Pugachev A.M., Kovalevskii V.I., Surovtsev N.V. et.al., A. Phys. Rev. Lett. **108**, 247601 (2012).
3. Malinovsky V.K., Pugachev A.M., Popova V.A. et.al., Ferroelectrics **443(1)**, 124-130 (2013).
4. Bencan A., Oveisi E., Hashemizadeh S. et.al., Nat. Commun. **12**, 3509 (2012).

Диэлектрические свойства керамики $Ca_{0.3}Ba_{0.7}Nb_2O_6$ модифицированной $SrTiO_3$, $KTaO_3$ и $LiTaO_3$

Гусева О.С. [1], **Малышкина О.В.** [2]

[1] *Ассистент, Тверской государственный медицинский университет*

[2] *Доктор физико-математических наук, профессор, Тверской государственный университет*

4ikulaeva@mail.ru

В работе методом твердофазного синтеза получены образцы керамики состава $Ca_{0.3}Ba_{0.7}Nb_2O_6$ (CBN30) чистого и с модифицирующими добавками (5%) $SrTiO_3$, $KTaO_3$ или $LiTaO_3$. Проведены сравнительные исследования (в температурном интервале от комнатной до 300°C) дисперсии диэлектрической проницаемости в частотном диапазоне от 1 Гц до 10МГц. Показано (рис. 1а), что примесь $SrTiO_3$ приводит к увеличению диэлектрической проницаемости, по сравнению с беспримесной керамикой CBN30 и другими модифицированными составами.

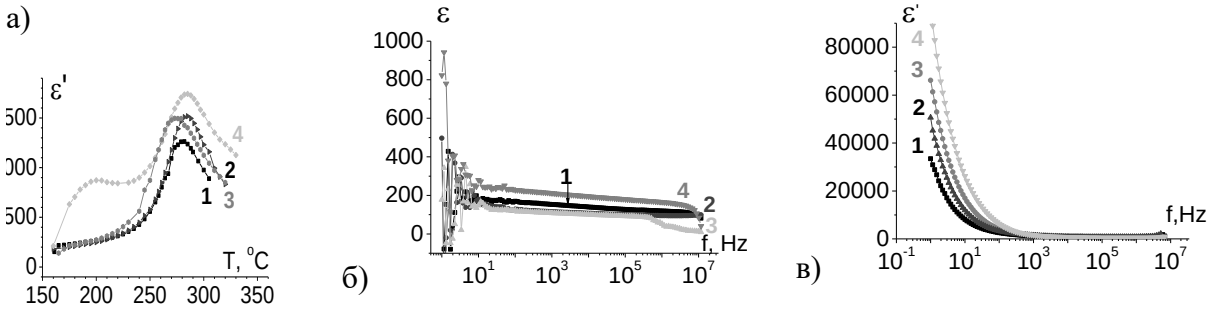


Рисунок 1 – температурные (а) и частотные (б, в) зависимости действительной части диэлектрической проницаемости керамики CBN. а – частота измерения 1кГц. б – температура 27 °C и в – 264 °C. Кривая 1 – чистый CBN30, 2 – модифицированный $KTaO_3$, 3 – $LiTaO_3$, 4 – $SrTiO_3$.

До температур 230°C диэлектрическая проницаемость практически не зависит от частоты. Затем начинается ее рост, обусловленный приближением к температуре сегнетоэлектрического фазового перехода. У всех составов наблюдается максимум около температуры 280 °C, который не зависит от частоты измерения, и слабо зависит от вида модификатора. Образец CBN30 модифицированный $SrTiO_3$ имеет дополнительный максимум при температуре 200°C (Рис. 1а). Необходимо отметить, что температура Кюри керамического CBN30 на 60 градусов выше, чем у монокристалла [1], для которого она составляет 217°C.

Исследования дисперсии диэлектрической проницаемости показали, что при комнатной температуре 27 °C на частотах до 10 Гц у всех исследуемых образцов наблюдается сильный разброс значений диэлектрической проницаемости (рис.1б), свойственный пьезокерамикам, который обычно связывают с объемно-зарядовой поляризацией. При температурах выше 260 °C, то есть в непосредственной близости к фазовому переходу разброс значений диэлектрической проницаемости исчезает (рис.1в), что позволяет предположить связь «скачков» диэлектрической проницаемости на низких частотах с колебаниями в переменном электрическом поле ионов, отвечающих за возникновение спонтанного дипольного момента.

ЛИТЕРАТУРА

1. О.В. Малышкина, В.С. Лисицын, J. Dec, T. Łukasiewicz, Физика твердого тела. Т. **56**. Вып. 9. С. 1763-1766 (2014). DOI: 10.1134/S1063783414090194.

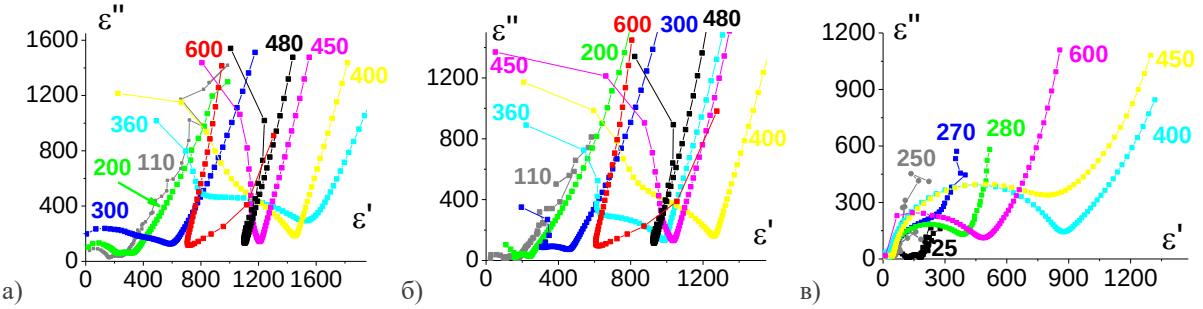
Температурные зависимости релаксационных процессов керамики ниобата натрия

Али М.[1,2], **Малышкина О. В.**[2]

[1] *Тверской государственный медицинский университет*
Тверь, 170100, Россия (*E-mail: maisalihasan@gmail.com)*
[2]*Тверской государственный университет*
Тверь, 170002, Россия

Керамика ниобата натрия является одной из возможных альтернатив керамики ЦТС. Научный интерес к этому материалу вызван тем, что синтетический $NaNbO_3$ (**NN**) имеет семь различных структурных фаз [1], а в температурном интервале от 25 до 360°С возможно сосуществование фаз Q и P, зависящее от условий синтеза [2]. Ранее нами было показано влияние условий синтеза на наличие сегнетоэлектрического состояния в образцах керамики NN [3].

В настоящей работе методом диэлектрической спектроскопии исследованы релаксационные процессы в образцах керамики NN в температурном интервале от 25 до 600°С. Твердофазный синтез материала для получения керамики NN осуществлялся тремя различными способами: одиночный синтез при температуре 650°С или 700°С; и двойной синтез (оба при 700°С). Спекание образцов осуществлялось при температуре 1100°С в течение 4 часов. Обнаружена зависимость релаксационных механизмов, в частности частоты перехода от линейной дисперсии к дисперсии, описываемой «классическим» уравнением Гавриляка – Негами, как от температуры, так и от технологии синтеза материала NN. Температурные интервалы, в которых дисперсия комплексной диэлектрической проницаемости однотипна, соответствуют температурному интервалу существования одной структурной фазы (по [1]). Разброс значений диэлектрической проницаемости, наблюдаемый на низких частотах и обусловленный миграционной поляризацией, полностью исчезает к температуре 200°С у образцов с одиночным синтезом и к 280°С у образцов с двойным синтезом (рис. 1). Вид дисперсионных зависимостей ε″(ε′) также определяется числом предварительного синтеза материала NN.



а) б) в)

Рис. 1. Диаграммы ε″(ε′) для образцов керамики NN, с одиночным синтезом при 650°С (а), 700°С (б) и с двойным синтезом 700°С-700°С (в). Цифрами на графиках отмечена температура измерения в °С.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mitchell R.H., Kennedy B.J., Knight K.S.. Physics and Chemistry of Minerals **45(1)**, 77 (2018).
2. Johnston K.E., Tang C.C., Parker J.E., Knight K.S., Lightfoot P. J Am Chem Soc **132**, 8732 (2010).
3. Малышкина О.В., Али М., Иванова А.И., Чернышова И.А., Мамаев Д.В. Физика твердого тела **63,** 1890 (2021).

Электронное строение пленок из фуллеренов C_{58}

Мурзашев А. И.[1], Жуманазаров А.П.[2]

Марийский государственный университет, Физико-математический факультет
Йошкар-Ола, 424000, Россия
[1]nanotubes59@mail.ru, [2]allayar_0909@mail.ru

Углеродные наносистемы (УНС) в плане создания элементной базы наноэлектроники являются одними из самых перспективных материалов. Особый интерес представляют системы с малой размерностью, например пленки из фуллеренов на поверхности благородных материалов. Востребованность для этой цели наносистем на основе углерода вызвана уникальным электронным строением углерода. В фуллеренах, углеродных нанотрубках (УНТ) и графенах четырёхвалентный углерод находится в sp^2 гибридизированном состоянии, три из четырех валентных электронов углерода в этих системах гибридизируются и образуют между атомами σ-связи, формирующие прочный каркас системы, четвертый, не гибридизированный электрон, будучи слабо локализованным на узле, может перескакивать с узла на узел. В итоге эти электроны формируют зону, называю π-зоной. Граница между заполненными и вакантными состояниями в углеродных системах с такой гибридизацией лежит в области энергии π-электронов. Вследствие этого, все интересные для практического применения свойства таких систем определяются именно π-электронами. Кроме сказанного, согласно [1], в углеродных системах с sp^2 гибридизицией кулоновское взаимодействие π-электронов на одном узле велико, ~ 10 эВ. Это обстоятельство требует описания электронных свойств УНС в рамках модели Хаббарда. В [2,3] Мироновым и Мурзашевым для описания электронных свойств УНС в рамках модели Хаббарда было предложено приближение статических флуктуаций (ПСФ). Расчеты в рамках этого приближения показали, что электронное строение и оптическое поглощение УНС, согласуется с экспериментом, при параметрах модели Хаббарда B=-1 эВ, U=7 эВ, где B – интеграл перескока, U – параметр кулоновского отталкивания. При таких параметрах, все УНТ и фуллерены представляют собой полупроводники с щелью между заполненной и вакантной зонами равной $\Delta \approx U-6B$.

По всей видимости, такая же ситуация имеет место и в пленках на основе фуллеренов C_{58}, которые были получены и изучены в работе [4]. Согласно [4] пленки образованы изомерами C_{3v} и C_s. Результаты измерения плотности электронных состояний (ПЭС) методом туннельной спектроскопии показывают, что осажденные в [2] пленки, являются полупроводниками с щелью ~ 1 эВ.

Исходя из сказанного, с целью верификации ПСФ, в рамках настоящей работы вычислены энергетические спектры изомеров C_{3v}, C_s и димеров C_{3v}-C_{3v}, C_s- C_s. Полученные ПЭС, согласуются с экспериментальными данными, а именно щель на кривой ПЭС, полученной нами их вычисленного энергетического спектра примерно равна 1 эВ. Полученные в предлагаемой работе результаты убедительно свидетельствуют о необходимости учета внутриузельного кулоновского вазимодействия при изучении электронного строения УНС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wehling O, Sasioglu E., Friedrich C., et al. Phys. Rev.Lett. **106**. 236805 (2011).
2. Миронов Г.И., Мурзашев А.И. ФТТ. **53**, 2273 (2011).
3. Арутюнова Т. Э., Миронов Г.И., Мурзашев А.И. ФТТ, 54,1797 (2012)
4. Noelia B., Stefan S., Toshio M., et al. The J. of Chem. Phys. **138**, 104703 (2013).

Электронное строение и оптическое поглощение фуллеренов как сильно коррелированных систем на примере изомера №181 фуллерена C_{96}

Мурзашев А. И.[1], Кокурин М. Ю.[2], Паймеров С. К.[3]

Марийский государственный университет,
Йошкар-Ола, 424001, Россия
[1]nanotubes59@mail.ru, [2]kokurinm@yandex.ru, [3]paymerov@mail.ru

Фуллерены и углеродные нанотрубки (УНТ) продолжают вызывать неслабеющий интерес исследователей. Это обстоятельство связано с их уникальными свойствами, которые есть следствие уникального их геометрического строения и свойств атома углерода. Атом углерода, будучи четырехвалентным, в зависимости от окружения может принимать различные валентности. В фуллеренах и УНТ атом углерода находится в sp^2-гибридизированном состоянии. Три из четырех валентных электронов гибридизируются и образуют σ-связи, формирующие жесткий каркас системы, четвертый, не гибридизированный, электрон оказывается слабо локализованным на узлах, вследствие этого он может перескакивать с узла на узел. В результате его состояния формируют зону, называемую π-зоной. Важно, что граница между вакантными и заполненными состояниями в таких системах лежит в области энергий этой зоны. Вследствие этого важные электронные и оптические свойства системы напрямую определяются π-электронами. В [1] было показано, что в таких системах внутриузельное кулоновское взаимодействие (ВУКВ) π-электронов велико ~ 10 эВ, что требует описания системы в рамках модели Хаббарда. Мироновым Г.И. и Мурзашевым А.И. для описания электронного строения фуллеренов и УНТ было предложено приближение статических флуктуаций (ПСФ) [2,3]. Изучение фуллеренов и УНТ в рамках такого приближения показало, что в этих системах энергетический спектр разбивается на две зоны – хаббардовские подзоны. щель между которыми равна U-$6B$, где U – параметр кулоновского взаимодействия, B – интеграл перескока.

В настоящей работе с учетом ВУКВ в рамках ПСФ вычислен энергетический спектр изомера №181 фуллерена C_{96} группы симметрии C_2, спектр оптического поглощения (СОП) которого был измерен в [4], и СОП, полученный на основании вычисленного энергетического спектра. Кроме этого, вычислены энергетический спектр и СОП этого изомера без учета ВУКВ. Результаты расчетов показывают, что СОП, полученный с учетом кулоновского взаимодействия $U\approx7$ эВ и B=-1 эВ, на хорошем качественном уровне совпадает с экспериментальными данными. СОП, полученный на основе энергетического спектра, вычисленного при B=-2.6 эВ и U=0, не имеет ничего общего с экспериментальными кривыми.

Таким образом, результаты нашей работы убедительно свидетельствуют о необходимости учета ВУКВ U~7 эВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wehling O, Sasioglu E., Friedrich C., et al., Phys. Rev. Lett. **106**. 236805 (2011).
2. Миронов Г.И., Мурзашев А.И. ФТТ. **53**, 2273 (2011).
3. Арутюнова Т. Э., Миронов Г.И., Мурзашев А.И. ФТТ, 54,1797 (2012).
4. Yang H., Jin H., Che Y., et al., Chem. Eur. J. **18**, 2792 (2012).

Особенности магнетизма в $Dy_{1-x}Ho_xMnO_3$

Матвеева А. Н.[1], Зобкало И. А.[1], Meven M.[2], Sazonov A.[2], Hutanu V.[2]

[1] Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

[2] RWTH Aachen University, Garching, Germany

$DyMnO_3$ является уникальным мультиферроиком II рода, потому что демонстрирует одну из самых высоких электрических поляризаций для соединений такого типа. Такое поведение связано с наличием двух механизмов возникновения электрической поляризации: она порождается циклоидальной спиновой структурой марганцевой подсистемы, что удовлетворительно описывается на основе обратного взаимодействия Дзялошинского – Мория и обменно-стрикционным эффектом. Химическое замещение атома редкоземельного элемента в орторомбических манганитах со структурой типа перовскита $RMnO_3$ позволяет контролировать магнитные взаимодействия и, следовательно, физические свойства этих соединений, включая такие сложные проявления, как, например, магнитная мультиферроичность.

Методами рассеяния нейтронов, включая дифракцию поляризованных нейтронов, проведены сравнительное исследование магнитного упорядочения на монокристаллах $DyMnO_3$ и $Dy_{0.8}Ho_{0.2}MnO_3$. Измерения выполнены на дифрактометрах HEIDI и POLI в MLZ (Гархинг, Германия).

Впервые представлены структурные параметры частично замещенного соединения $Dy_{0.8}Ho_{0.2}MnO_3$ как при комнатной, так и при низких температурах (4 K). Результаты показывают, что общая кристаллическая симметрия исходного соединения с пространственной группой Pbnm сохраняется в замещенных образцах. Были полученны очень схожи для обоих соединений параметры решетки.

Температурная эволюция магнитной структуры DyMnO3 и $Dy_{0.8}Ho_{0.2}MnO_3$, а также влияние на нее внешнего электрического поля были изучены методом нейтронной дифракции и нейтронно-поляризационного анализа. Была подтверждена сильная связь R-Mn в обоих соединениях.

Анализ магнитной структуры $DyMnO_3$ в режимах охлаждения и нагрева показал, что магнитный порядок имеет особенности очень медленной релаксации, т.е. происходит переход из состояния “контролируемого Dy” в состояние “контролируемого Mn” в течение нескольких часов.

Впервые были выполнены измерения полных поляризационных матриц методом сферической нейтронной поляриметрии для несоразмерной магнитной структуры в $Dy_{0.8}Ho_{0.2}MnO_3$. Это дало предпосылки для получения исходной модели для определения магнитной структуры $Dy_{0.8}Ho_{0.2}MnO_3$. Уровень замещения Dy на Ho на 20% подавляет спонтанное упорядочение редкоземельной подсистемы с собственным вектором распространения (0 0,5 0). Это приводит к ситуации, когда две магнитные подсистемы, марганцевая и редкоземельная, имеют когерентное несоразмерное пространственное распространение. Это обеспечивает ситуацию, благоприятную для генерации сегнетоэлектрической поляризации, возникающей как благодаря обратному взаимодействию Дзялошинского-Мория в подсистеме Mn, так и благодаря механизмам обменной стрикции RE-Mn во всей температурной области циклоидального упорядочения.

Приложение электрического поля вдоль оси c позволило в небольшой степени менять заселенность киральных доменов в $Dy_{0.8}Ho_{0.2}MnO_3$ при постоянной фиксированной температуре. Это указывает на довольно сильную связь киральных доменов с кристаллическим каркасом.

Свойства перколяционных каналов в планарных мемристивных структурах на основе эпитаксиальных пленок оксидных соединений $YBa_2Cu_3O_{7-y}$ и $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-y}$

Россоленко А.Н.[1], Тулина Н.А.[1], И.М.Шмытько[1], А.А.Иванов[2], В.В.Сироткин[3], И.Ю.Борисенко[3], А.В.Зотов[3], В.А.Тулин[3]

[1]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела Российской академии наук.
[2] Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
[3]Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов Российской академии наук.

Резистивные переключения в гетероструктурах на основе различных соединений - явление, которое в настоящее время интенсивно изучается в нанотехнологиях для разработки энергонезависимых и двухполюсных элементов памяти нового поколения мемристоров [1], предназначенных для формирования основы будущих систем самоорганизации - самопрограммирования в прикладных исследованиях и новых областях инженерного дела [2]. В этой работе была исследована проблема материаловедения, включающая выбор базовых материалов и использование их функциональных свойств при разработке структуры и выяснении механизма резистивных переключений. Были получены мезоскопические гетероструктуры на основе эпитаксиальных ориентированных <001> пленок высокотемпературного сверхпроводника $YB_2C_3O_{7-y}$ [3] и легированного манганита $La_{1-x}Sr_xMnO_{3-y}$, проведены исследования свойств каналов перколяции структур на основе этих соединений. Показано, что ключевыми факторами для воспроизводимых переключений являются наличие кислородных вакансий на поверхности пленки, геометрические размеры структуры и наличие барьеров на электродах, в результате чего реализуется модель двух противоположно направленных диодов. Наблюдены эффекты “самоадаптирующегося электроформирования” в микроконтактных гетероструктурах на основе эпитаксиальных пленок манганита. Численные расчеты по модели критического электрического поля [4] показали, что “самоэлектроформирование” происходит в сильных электрических полях и в зоне контакта образуется щелевая структура. Эта структура обеспечивает воспроизводимость резистивных переключений.

Работа поддержана в части государственных заданий Института Физики твердого тела РАН, Института проблем микроэлектроники и особочистых материалов РАН, а также грантом РФФИ №19–29–03021 мк и грантом №19–29–03011 мк.

ЛИТЕРАТУРА

1. Meijer G.I, Science **319**,1625 (2008).
2. Stoliar P., Tranchant J., Corraze B. et al., Adv. Funct. Mater. ***27***, 1604740 (2017**).**
3. Tulina N.A., Borisenko , I.Yu, Shmytko I.M. et al, Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. **33**, 3695 (2020).
4. Tulina N.A., Sirotkin V.V. Physica C **400**, 105 (2004).

СКВИД магнитометрия фазовых переходов в антиферромагнитную фазу в синтезированных в плазме нанодисперсных порошках CoF_2 и Co_3O_4

Курявый В.Г., Ткаченко И.А., Зверев Г.А.

Институт химии ДВО РАН

В плазме импульсного высоковольтного разряда синтезирован нанокомпозит содержащий наночастицы CoF_2 и углеродную и фторуглеродную составляющую (образец 1). После прокаливания нанокомпозита получен нанодисперсный порошок Co_3O_4 (образец 2). Размеры частиц CoF_2 и Co_3O_4 одинаковы, равны 15-100 нм с пиком распределения около 50 нм. Методом СКВИД магнитометрии изучены температурные (рис. 1) и полевые зависимости магнитной восприимчивости полученных веществ. В обоих образцах, по наличию пика на температурных зависимостях зафиксирован переход в антиферромагнитную фазу. Проведено сравнение изменений магнитной восприимчивости до, после и в процессе фазового перехода для CoF_2 и Co_3O_4. В CoF_2 измеренная температура перехода в АФМ фазу (температура Нееля T_N) совпадает с T_N = 38 K известной для макроскопических образцов. В Co_3O_4 - T_N сдвинута в меньшую сторону (27.2 K против 40 K). В обоих случаях ниже T_N имеет место сдвиг петель магнитного гистерезиса в сторону отрицательных полей, который стандартно интерпретируется наличием АФМ/ФМ взаимодействием между ядром и оболочкой наночастиц. Можно предположить, что в наночастицах Co_3O_4, либо между этими наночастицами в образце 2 имеет место некоторое дополнительное магнитное взаимодействие, приводящее к сдвигу T_N относительно T_N в макроскопическом Co_3O_4. С этим согласуется характер записанных записанных для образца 1 и образца 2 стандартных температурных зависимостей, записанных после их охлаждения в магнитном поле (FC) и в нулевом магнитном поле (ZFC). В образце 1 (CoF_2) имеет место расхождение кривых FC и ZFC только ниже T_N, в то время как в образце 2 (Co_3O_4) такое расхождение наблюдается во всем диапазоне исследованных температур от 300 K до 2 K. Так же особенностью образца 2 является наличие заметного перегиба на пике, прописываемом на температурной зависимости магнитной восприимчивости в районе перехода в АФМ фазу. Особенности температурных зависимостей обсуждаются в рамках наличия суперпарамагнитной фазы и (или) фазы спинового стекла.

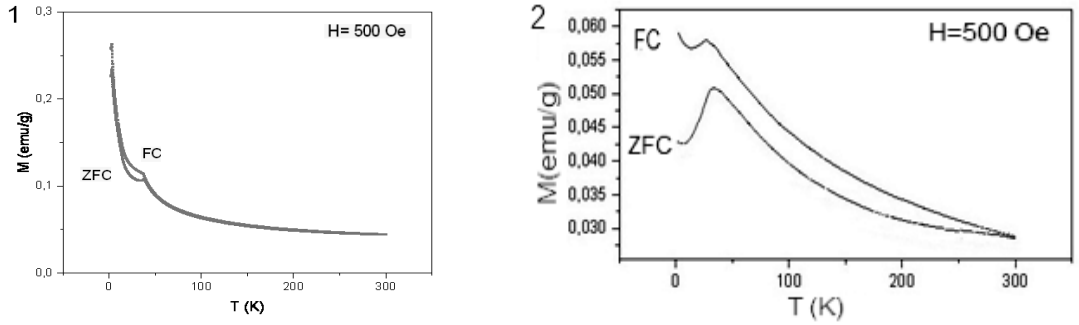


Рис.1. Температурные зависимости магнитной восприимчивости образца 1 и образца 2.

Исследование гетероструктур на основе HfO_2

Шарифуллина Я. И.[1], Мамин Р. Ф.[2], Гумарова И. И.[1,2], Недопекин О. В.[1]

[1]*Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, 420008, Россия*
[2]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Казань, 420029, Россия*

(E-mail: janesharifullina@yandex.ru)

Быстрорастущий рынок полупроводниковых микро- и наноэлектронных устройств особое внимание приковывает к технологии энергонезависимой памяти – это устройства, продолжающие сохранять данные после прекращения подачи питания. Ожидается, что доминирующую на сегодняшний день технологию энергонезависимой флэш-памяти в скором времени заменят другие, новые решения, которые обладают лучшими способностями к масштабированию, а также лучшими характеристиками, например, высокими скоростями записи и считывания и большим числом циклов переключений. Среди основных кандидатов можно назвать сегнетоэлектрические запоминающие устройства, например, сегнетоэлектрическая память с произвольной выборкой (FeRAM, FRAM, ferroelectric random access memory).

Недавнее открытие сегнетоэлектричества в тонких пленках на основе легированного кремнием оксида гафния $Si:HfO_2$ привлекло еще больший исследовательский интерес к этому материалу [1]. Материалы на основе HfO_2 стали новым классом перспективных сегнетоэлектрических материалов для следующего поколения устройств оперативной памяти. Сегнетоэлектрические материалы на основе HfO_2 обладают высоким значением коэрцитивного поля (E_c = 1 – 2 МВ/см) и остаточной поляризации (P_r = 1 – 45 мкКл/см^2) даже при толщине пленки в 5 – 10 нм. Тонкие пленки HfO_2 имеют ряд преимуществ в сравнении с обычными сегнетоэлектрическими перовскитами, используемыми в FRAM, такие как совместимость с КМОП, масштабируемость и возможность создания трехмерного конденсатора [2].

В данной работе были проведены *ab initio* исследования структурных и электронных свойств объемного HfO_2 в различных фазах и произведено сравнение структурных параметров с имеющимися экспериментальными данными, были построены и проанализированы спектры плотности состояний электронов, что позволило определить оптимальные параметры моделирования. На втором этапе были построены модели тонких пленок, для которых также были исследованы структурные и электронные свойства, и показаны и проанализированы сегнетоэлектрические свойства. Были построены модели гетероструктур типа HfO_2/Si, имеющих различные интерфейсные слои, определены стабильные конфигурации, изучены структурные и электронные свойства. Наконец, были исследованы гетероструктуры с HfO_2, легированным различными примесями.

Работа выполнена за счет средств Программы стратегического академического лидерства Казанского (Приволжского) федерального университета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Böscke T., Müller J., Bräuhaus D. et. al., Appl. Phys. Lett, **99**, 102903, (2011).
2. Fan Z., Chen J. and Wang J., J. Adv. Dielect, **6**, 1630003, (2016).

Эволюция доменной структуры монокристаллов ортованадата кальция в однородном электрическом поле

Южаков В.В.[1], Шишкина Е.В.[1], Чувакова М.А.[1], Ахматханов А.Р.[1], Небогатиков М.С.[1], Линкер Е.А.[1], Ивлева Л.И.[2], Шур В.Я.[1]

[1]*Институт естественных наук и математики, Уральский федеральный университет, 620000 Екатеринбург, Россия (E-mail: Vladimir.Juzhakov@urfu.ru)*

[2]*Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук, 119991 Москва, Россия*

Ортованадат кальция $Ca_3(VO_4)_2$ (CVO) является высокотемпературным сегнетоэлектриком с температурой Кюри T_C = 1110±10°C и величиной спонтанной поляризации $68*10^{-2}$ Кл/м^2 [1]. Номинально чистые и легированные редкоземельными элементами монокристаллы CVO обладают нелинейно-оптическими свойствами, что делает их перспективными материалами для генерации второй гармоники [2,3]. Создание периодической доменной структуры может существенно улучшить эффективность преобразователей частоты излучения, однако, до сих пор никому не удавалось продемонстрировать переключение поляризации в CVO.

Исследуемые пластины CVO толщиной 0,4 мм были вырезаны перпендикулярно полярной оси. Переключение поляризации производилось при повышенной температуре импульсами электрического поля напряженностью до 10 кВ/мм и длительностью от 100 мс до 30 с. Производилась in situ оптическая визуализация эволюции доменной структуры с одновременной регистрацией тока переключения. Для визуализации доменов в объеме использовалась сканирующая конфокальная микроскопия комбинационного рассеяния и микроскопия генерации второй гармоники.

Исследуемые образцы имели исходную доменную структуру, образовавшуюся вблизи фазового перехода при охлаждении кристалла, и представляющую собой нерегулярную трёхмерную лабиринтовую структуру с заряженными доменными стенками [4]. Впервые при переключении поляризации при повышенной температуре была экспериментально изучена кинетика доменной структуры. При приложении импульса поля амплитудой 6,3 кВ/мм при температуре 350°C на поверхности образца наблюдалось образование округлых доменов диаметром до 10 мкм.

Наблюдаемые особенности свидетельствовали о росте цилиндрических доменов, которые образуются на заряженных доменных стенках и прорастают к полярной поверхности. Следует отметить, что образование и рост доменов из объема кристалла впервые наблюдался в сегнетоэлектриках. Было выявлено образование стабильных доменов с нейтральными вертикальными стенками в результате прорастания от заряженной доменной стенки к полярной поверхности и образование несквозных стабильных доменов в объеме.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ при финансовой поддержке РФФИ (грант 20-02-00588).

ЛИТЕРАТУРА

1. Glass A.M., Abrahams S.C., Ballman A.A. et al., Ferroelectrics **17**, 579 (1978).
2. Bechthold P.S., Liebertz J., Optics Communications **27**, 393 (1978).
3. Voronina I.S., Voronov V.V., Dunaeva E.E. et al., J. Crystal Growth **555**, 125965 (2021).
4. Shishkina E.V., Yuzhakov V.V., Nebogatikov M.S., et al., Crystals **11**, 1508 (2021).

Осаждение пленок $BiFeO_3$ из химического раствора с послойным контролем покрытия и структуры

Сафина В.А.[1], Абрамов А.С.[1], Соболь А.Г.[2], Слабов В.[3], Трусов Л.А.[2], Васильев А.В.[2], Шур В.Я.[1], Холкин А.Л.[1,3], Аликин Д.О.[1]

[1] *Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина Екатеринбург, 620000, Россия (E-mail:* v.a.safina@urfu.ru)
[2] *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, 119991, Россия*
[3] *Department of Physics & CICECO—Aveiro Institute of Materials, University of Aveiro, Aveiro, Portugal*

$BiFeO_3$ (BFO) – является одним из перспективных мультиферроиков, тонкие пленки которого обладают высокой спонтанной поляризацией и антиферромагнитными свойствами [1,2]. Метод осаждения из химического раствора позволяет получать тонкие пленки с большой площадью покрытия для использования в различных электромеханических устройствах и сенсорах. Однако, микроструктура таких пленок часто достаточно неидеальна, особенно для пленок толщиной в несколько сотен нанометров, получаемых методом послойного осаждения. Влияние послойного осаждения и качества отдельных слоев на свойства пленок в литературе обсуждается редко.

В этой работе мы использовали силовую микроскопию пьезоэлектрического отклика (piezoresponse force microscopy) и атомно-силовую микроскопию проводимости (conductive atomic force microscopy) для исследования тонких пленок BFO, полученных методом послойного осаждения из химического раствора (золь-гель процесс). Были проанализированы морфология, распределение локальных пьезоэлектрических свойств и проводимости в зависимости от числа нанесенных слоев пленки. Установлено, что конечные свойства получаемых тонких пленок определяются не только составом геля и условиями термической обработки на стадии кристаллизации, но также морфологией пленки, формирующейся на стадии гелеобразования. Показано, что температура и продолжительность сушки раствора сильно влияют на качество покрытия пленкой поверхности, что в итоге определяет морфологию пленки и протекание процесса кристаллизации.

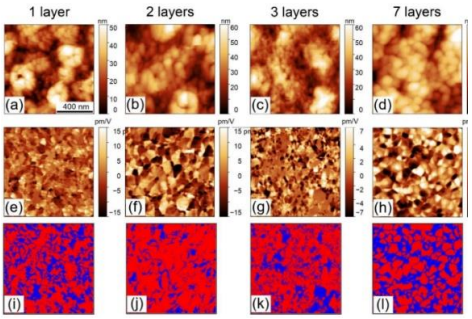


Рис. 1. (a) Топография, (b) доменная структура и (c) распределение полярной (красный цвет)/неполярной (синий цвет) фазы в поликристаллических плёнках $BiFeO_3$.

Работа выполнена с использованием оборудования УЦКП «Современные нанотехнологии» УрФУ, при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 19-72-10076).

ЛИТЕРАТУРА

1. Catalan G., Scott J.F. Adv. Mater., C. **21**, 2463–2485 (2009).
2. Fujino S., Murakami M., Anbusathaiah V. et al. Appl. Phys. Lett., V. **92**, 202904 (2008).

Эффективный g-фактор в квантовых ямах InGaAs/InAlAs с высоким содержанием InAs

С.В.Гудина[1], Ю.Г. Арапов[1], В.Н. Неверов[1], А.П. Савельев[1], Н.С. Сандаков[1], Н. Г. Шелушинина[1], М.В. Якунин[1], И.С. Васильевский[2], А.Н. Виниченко[2]

[1] *Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, 620108, Россия (E-mail: svpopova@imp.uran.ru)*

[2] *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

Низкоразмерные системы на основе InGaAs представляют большой фундаментальный и технический интерес благодаря выдающимся свойствам носителей заряда, таким как малая эффективная масса, что обеспечивает их применение в быстродействующих транзисторах (HEMT), и большой эффективный g-фактор, так что большое результирующее зеемановское расщепление при приложении слабых магнитных полей делает эту полупроводниковую систему многообещающим кандидатом для мезоскопических спиновых устройств, работающих при относительно высоких температурах. Причем с фундаментальной точки зрения изучение влияния обменно-корреляционных эффектов на значение g-фактора и управление этими процессами с помощью изменения структурного дизайна системы является весьма актуальным.

Исследованы метаморфные МНЕМТ-гетероструктуры, отличающиеся содержанием InAs в квантовой яме и в барьерах, n-$In_yGa_{1-y}As/In_xAl_{1-x}As$ (x=0.82, 0.81; y=0.85, 0.90). Измерены продольное ρ_{xx} и холловское ρ_{xy} сопротивления в магнитных полях до 13 Тл, перпендикулярных и наклонных по отношению к двумерной плоскости, и температурах T от 0.3 до 35 К. Параметры носителей заряда определены из анализа осцилляций магнитосопротивления: концентрация n=4.6; 6.8×10^{15} $м^{-2}$, подвижность μ= 4.6; 20 $м^2/В\cdot с$, эффективная масса $m^* = 0.037m_0$.

Термоактивационная проводимость в режиме квантового эффекта Холла определяется тем фактом, что когда уровень Ферми находится в области локализованных состояний в щели подвижности, то термическое возбуждение электронов в узкие полосы делокализованных состояний в центре каждого из уровней Ландау должно приводить к активационному поведению проводимости с ростом температуры, что позволяет определить величину щели подвижности и, соответственно, g-фактор электронов. Для исследуемых структур были получены большие значения g-фактора ($|g^*|\approx7.5\div12$), которые зависели от фактора заполнения уровней Ландау ($\nu=3\div9$), что свидетельствует о необходимости учета обменного усиления и спин-орбитального расщепления [1, 2].

Метод совпадений основан на том, что в наклонных магнитных полях орбитальные щели подвижности в спектре уровней Ландау, определяемые эффективной массой m*, зависят от перпендикулярного магнитного поля, в то время как зеемановское расщепление, определяемое эффективным g-фактором, зависит от полного магнитного поля. Методом совпадений было найдено $|g^*|=6.8$ для больших $\nu\geq16$, что близко к величине истинного (bare) g-фактора [2].

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме «Электрон», при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ 075-15-2020-797 (13.1902.21.0024) и РФФИ и Свердловской области № 20-42-660004.

1. С.С. Криштопенко, К.П. Калинин, В.И. Гавриленко, и др. ФТП, **46**,1186 (2012).
2. W. Desrat, F. Giazotto, V. Pellegrini, et al., Phys. Rev. B **69**, 245324 (2004).

Сверхпроводящий спиновый клапан

Гарифуллин И.А., Камашев А.А.

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: ilgiz0garifullin@gmail.com)

В последние два десятилетия XXI века существует огромный теоретический и экспериментальный интерес к разработке логических элементов для сверхпроводящей спинтроники. Помимо базовых элементов для компьютеров будущего, необходимы и пассивные элементы, которые будут включать/выключать сверхпроводящий ток. Таким устройством может послужить сверхпроводящий спиновый клапан (ССК). Сверхпроводящий спиновый клапан представляет собой чередующуюся последовательность ферромагнитных (Ф) и сверхпроводящих (С) слоев. Комбинируя количество и порядок следования слоев Ф- и С-материалов, можно управлять свойствами спинового клапана. Это связано с тем, что на границе слоёв С/Ф свойства меняются не скачкообразно – существует область взаимопроникновения свойств двух материалов. Данное явление называется эффектом близости сверхпроводник/ферромагнетик. Сверхпроводящий спиновый клапан основан на антагонизме двух явлений – сверхпроводимости и ферромагнетизма. Ферромагнетизм предполагает параллельную ориентацию спинов, а сверхпроводимость – антипараллельную, так как спины электронов, составляющих куперовскую пару, противоположно направлены. Именно поэтому при проникновении куперовской пары из С-слоя в Ф-слой происходит ее разрушение, поскольку энергия обменного взаимодействия внутри ферромагнетика гораздо больше энергии связи куперовской пары.

Принцип работы ССК основан на идее контроля температуры перехода в сверхпроводящее состояние (T_c) путем изменения взаимной ориентации намагниченностей Ф-слоев. Впервые теоретическая модель ССК была предложена в Стэнфордском университете в 1997 году профессором. Впервые экспериментально реализовать ССК удалось нашей группе в 2010 году в структуре CoO_x/Fe1/Cu/Fe2/In. В дальнейшем нами были очень подробно изучены ССК, в которых в качестве ферромагнитного материала использовались железо и пермаллой, а в качестве сверхпроводящего материала – свинец и индий. Мы обнаружили большое разнообразие эффектов, таких как квантовая интерференция парной волновой функции сверхпроводящего конденсата, изолированная триплетная сверхпроводимость и многие другие.

В наших последних работах был исследован эффект ССК в гетероструктурах Ф1/Ф2/С, содержащих сплава Гейслера $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$ в качестве Ф-слоев. Нами было обнаружено, что разница в кривых сверхпроводящих переходов в структурах спинового клапана $Co_2Cr_{1-x}Fe_xAl_y$/Cu/Ni/Cu/Pb, измеренных при параллельной и перпендикулярной ориентации намагниченностей ферромагнитных слоев сплава Гейслера с высокой степенью спиновой поляризации и никеля (Ni), достигает 0.5 K.

На сегодняшний величина эффекта сверхпроводящего спинового клапана порядка 0.5 K в магнитном поле 3.5 кЭ является рекордным значением для таких структур. Стоит отметить, что на сегодняшний день наука, связанная с классическими структурами ССК практически полностью изучена. Как показывают наши результаты и результаты других групп уже сейчас достигнуты предельные значения эффекта ССК с использованием различных сплавов и элементных ферромагнетиков в структурах Ф1/Ф2/С. В связи с этим необходимо начать изучать структуры с нестандартны ми подходами.

Исследования выполнены за счет гранта РНФ № 21-72-10178.

Фотосопротивление гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$

А.О. Чибирев, А.В. Леонтьев, Н.Н. Гарифьянов, Р.Ф. Мамин

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: mamin@kfti.knc.ru)

Вначале электронный газ высокой подвижности был обнаружен на интерфейсе между $LaAlO_3$ и $SrTiO_3$ [1]. В соединении $LaAlO_3$ слои LaO и AlO_2 являются разнозаряженными и с этим связан эффект возникновения квизидвумерного электронного газ. Нами были исследованы гетероструктуры на основе пленок сегнетоэлектрических оксидов со структурой $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$ на монокристаллах $LaMnO_3$. Показано, что они проявляют квазиметаллическое поведение проводимости интерфейса. В случае гетероструктур типа $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$ все слои нейтральны, и в $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ сегнетоэлектрическая поляризация возникает из-за смещения атомов Ti из центра октаэдра в пленке $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$. Поэтому появляется возможность переключения такой поляризации внешним электрическим полем.

В гетероструктуре $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$ на основе монокристалической подложки $LaMnO_3$ электрическое сопротивление значительно уменьшается с температурой ниже температуры максимума около 165 K, демонстрируя высокую проводимость. Также были проведены исследования методом эффекта Холла. При исследовании гетероструктур $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$ был обнаружен своеобразный эффект отрицательной фотопроводимости гетероструктуры во время однородного освещения гетероструктуры со стороны сегнетоэлектрической пленки светом различного спектрального состава: при облучении инфракрасным, зеленым и ультрафиолетовым светом. В случае, когда применялось совместное воздействие зеленого и инфракрасного света, эффекты от воздействия складывались, и наблюдался кумулятивный эффект. Была обнаружена своеобразная неэргодичность этого эффект в случае, когда вначале измерялось электросопротивление без света, потом включалось освещение зеленым светом, а через некоторое время включалось инфракрасное освещение без выключения зеленого света. При различной последовательности включения и выключения зеленого и инфракрасного освещения картина изменения сопротивления практически не менялась при повторных циклах [2]. Наблюдаются изменения при другой последовательности включения зеленого и инфракрасного света. Общая величина эффекта зависела от последовательности включения зеленого и инфракрасного света.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00179.

1. A. Ohtomo, H. Ywang, *Nature* **427**, 6973 (2004).
2. А. В. Леонтьев, А. О. Чибирев, и др., Письма в ЖЭТФ, том 114, вып. 12, с. 818 – 823 (2021).

.

Фотосопротивление пленочной гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$

А.О. Чибирев, А.В. Леонтьев, Р.Ф. Мамин

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: chibirev12@mail.ru)

Охтомо и Хвангом был обнаружен электронный газ высокой подвижности на интерфейсе между $LaAlO_3$ и $SrTiO_3$ [1]. Нами были исследованы гетероструктуры на основе пленок сегнетоэлектрических и диэлектрических оксидов со структурой $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$. Было показано, что они проявляют квазиметаллическое поведение проводимости интерфейса. В случае гетероструктур типа $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ все слои нейтральны, и в $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ сегнетоэлектрическая поляризация возникает из-за смещения атомов Ti из центра октаэдра в сегнетоэлектрической пленке $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$.

В гетероструктуре $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$, на основе пленок сегнетоэлектрических и диэлектрических оксидов, электрическое сопротивление значительно уменьшается с температурой ниже температуры максимума около 170 K, демонстрируя высокую проводимость. При исследовании пленочной гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ был обнаружен своеобразный эффект отрицательной фотопроводимости гетероструктуры во время однородного освещения гетероструктуры со стороны сегнетоэлектрической пленки светом различного спектрального состава: при облучении инфракрасным, зеленым и ультрафиолетовым светом. В случае, когда применялось совместное воздействие зеленого и инфракрасного света, эффекты от воздействия складывались, и наблюдался кумулятивный эффект. Была обнаружена своеобразная неэргодичность этого эффект в случае, когда вначале измерялось электросопротивление без света, потом включалось освещение зеленым светом, а через некоторое время включалось инфракрасное освещение без выключения зеленого света. Величина эффекта зависела от последовательности включения зеленого и инфракрасного света. Исследования этих образцов продолженаются.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00179.

1. A. Ohtomo, H. Ywang, *Nature* **427**, 6973 (2004).

.

Ab initio исследование гетероструктур для приложений спинтроники

Гумарова И.И.[1,2*], Евсеев А.А.[1,2], Недопёкин О.В.[1]

[1]*Институт физики, Казанский Федеральный Университет, Казань, 420111, Россия*
[2]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Казань, 420029, Россия*
(E-mail: i.piyanzina@gmail.ru)

Желательно, чтобы материалы, используемые в устройствах спинтроники и для обнаружения майорановских фермионов в твердых телах, имели большое и идеальное спин-орбитальное расщепление типа Рашбы. Недавно было предложено сочетать легирование упорядоченной поверхности и инженерию интерфейса, то есть выращивание монослоёв сплава на изолирующей полярной поверхности [1]. Эффектом Рашбы называют спин-орбитальное расщепление, вызванное нарушением инверсионной симметрии, на поверхностях/интерфейсах [2].

В данной работе исследовались пленочные гетероструктуры с различным сочетанием компонентов, для которых предполагалось наличие спин-орбитального расщепления типа Рашбы [2,3]. У данных гетероструктур из-за градиента плотности электронов на границах раздела возникает токовый вихрь, связанный со спинами электронов. Были изучены структурные и электронные свойства этих систем. Был произведён электронный расчёт DFT+U с учётом спин-орбитального взаимодействия. Все вычисления проводились с использованием программы VASP [4], интегрированной в программный пакет MedeA [5].

Для гетероструктур CuO/Cu, Al/Si, Cu_3N/Cu, Bi/$BaTiO_3$ рассчитаны зонные структуры с учетом спин-орбитального взаимодействия, и на их основе получены значения параметра Рашбы α_R, характеризующего величину спин-орбитального расщепления [6]. Было исследовано влияние межфазных контактных слоев, толщины, полярности интерфейса и сегнетоэлектрической поляризации на значения параметра Рашбы.

Результаты настоящего исследования могут быть использованы при разработке функциональных материалов для спинтроники на основе свойств этих соединений.

Расчеты выполнены при поддержке Программы стратегического академического лидерства (Приоритет-2030) Казанского Федерального Университета в рамках Лаборатории Компьютерного дизайна новых материалов и машинного обучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. M. Chen and F. Liu, Natl. Sci. Rev. **8** (2021).
2. Э.И. Рашба и В.И. Шека, Физ. Твёрд. Тела – Сборник Статей (Ленинград) II, 162–176 (1959).
3. A.D. Caviglia, M. Gabay, S. Gariglio et al. Phys. Rev. Lett. 126603 (2010).
4. G. Kresse and J. Furthmüller, Phys. Rev. B **54**, 11169–11186 (1996).
5. MedeA version 3.; MedeA is a registered trademark of Materials Design, Inc., San Diego, USA.
6. Ю.А. Бычков и Э.И. Рашба, Письма в ЖЭТФ **39**, 66–69 (1984).

Исследование намагниченности в двухслойных системах ферромагнетик/сегнетоэлектрик на основе магнитооптического эффекта Керра

Чибирев А.О., Салихов Т.М., Камашев А.А., Леонтьев А.В., Гарифуллин И.А., Мамин Р.Ф.

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: chibirev12@mail.ru)

Настоящая работа связана с изучением нового способа работы сверхпроводящего спинового клапана для перехода к новым технологиям построения сверхпроводящей спинтроники. Новая структура клапана, использующая сегнетоэлектрик в качестве переключающего элемента, может быть интегрирована в конструкцию сверхпроводящего компьютера в качестве ключа для сверхпроводящего тока. Мы планируем дополнительно использовать сегнетоэлектрик в структуре сверхпроводящего спинового клапана. Это позволит управлять свойствами сверхпроводника при помощи воздействия электрическим полем на сегнетоэлектрик, что позволит исключить необходимость использования магнитного поля.

На первом этапе, было необходимо исследовать магнитные свойства двухслойных систем ферромагнетик/сегнетоэлектрик при помощи магнитополяриметрического комплекса на основе магнитооптического эффекта Керра. Данный метод был выбран в связи с доступностью оборудования для измерения, а также возможностью проводить измерения при комнатной температуре с высокой скоростью. Магнитооптический эффект заключается в следующем, что при отражении линейно поляризованного света от поверхности намагниченного материала наблюдается вращение плоскости поляризации света, а свет становится эллиптически поляризован. Таким образом, существует возможность фиксации изменения направления вектора намагниченности в наших системах. Для начала была проведена магнитная характеризация всех образцов, удалось пронаблюдать магнитные петли гистерезиса с насыщением в поле 50-100 Э, в зависимости от ферромагнитного материала.

Методом эффекта Керра удалось зарегистрировать изменение ориентации намагниченности ферромагнитного слоя при приложении внешнего электрического напряжения от 10 до 50 В.

Исследования выполнены за счет гранта РНФ № 21-72-10178.

Исследованя поведения сопротивления гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$

Д.П. Павлов, Р.Ф. Мамин

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: mamin@kfti.knc.ru)

Электронный газ высокой подвижности впервые был обнаружен на интерфейсе между $LaAlO_3$ и $SrTiO_3$ [1]. Было показано, что эта гетероструктура обладает ферромагнитными свойствами [2] и переходит в сверхпроводящее состояние при температурах ниже 300 мК [3]. Мы исследовали гетероструктуры на основе сегнетоэлектрических и диэлектриков оксидов со структурой типа $BaTiO_3/LaMnO_3$. Были получены образцы гетероструктур $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$. Экспериментально измерены сопротивление образцов и показано возникновение квазидвумерной проводимости на интерфейсе гетероструктуры. В образцах гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3$ электрическое сопротивление значительно уменьшается с температурой при температурах ниже максимума при 160-230 K, указывая на металлический характер поведения проводимости интерфейса этой гетероструктуры. Температура максимума зависит от термоциклирования во внешнем магнитном поле, и она увеличивается с увеличением количества циклов. Сильное влияние внешнего магнитного поля на сопротивление гетероструктуры свидетельствует о том, что в области интерфейса существует неоднородный магнитный порядок, который постепенно переходит к однородному порядку при приложении магнитного поля при термоциклировании. Ведутся попытки переключения поляризации в сегнетоэлектрической пленке.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00179.

1. A. Ohtomo, H. Ywang, *Nature* **427**, 6973 (2004).
2. S. Thiel, G. Hammerl, A. Schmehl et al., *Science* **313**, 5759 (2006).
3. N. Reyren, S. Thiel, A. D. Caviglia, et al., *Science* **317**, 1196 (2007).

Проводимость пленочной гетероструктуры $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$

А.О. Чибирев, А.В. Леонтьев, М.И. Банников, Р.Ф. Мамин

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (*E-mail:* chibirev12@mail.ru)

Охтомо и Хвангом был обнаружен электронный газ высокой подвижности на интерфейсе между $LaAlO_3$ и $SrTiO_3$ [1]. В 2004 году был обнаружен электронный газ высокой подвижности на интерфейсе между $LaAlO_3$ и $SrTiO_3$ [1]. Были исследованы гетероструктуры на основе пленок сегнетоэлектрических и диэлектрических оксидов со структурой $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$.

В ряде гетероструктур $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ электрическое сопротивление значительно уменьшается с температурой ниже температуры максимума около 170 K, демонстрируя высокую проводимость. Также были проведены исследования методом эффекта Холла. При исследовании гетероструктур $Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3/LaMnO_3/Ba_{0.8}Sr_{0.2}TiO_3$ был обнаружен эффект квази двумерной проводимости только при определенных толщинах. Исследования в этом направлении будут продолжены.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда № 21-12-00179. Измерения эффекта Холла были выполнены в Физическом институте им. П.Н. Лебедева.

1. A. Ohtomo, H. Ywang, *Nature* **427**, 6973 (2004).

.

Создание гетероструктур Fe/Nb и $Fe/Al_2O_3/Nb$ на монокристаллических подложках MgO

Валидов А. А., **Насырова М. И.**, **Хабибуллин Р. Р.**, **Гарифуллин И. А.**

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия (E-mail: validov@kfti.knc.ru)

Одним из важнейших элементов сверхпроводящей спинтроники может быть сверхпроводящий спиновый клапан. Последние исследования показывают, что структуры сверхпроводящего спинового клапана, построенные на классическом эффекте близости сверхпроводник/ферромагнетик, исчерпали свои возможности в отношении достижения рекордных функциональных параметров. Мы планируем исследовать принципиально новые структуры сверхпроводящих спиновых клапанов. Работа новых структур будет построена за пределами классического эффекта близости сверхпроводник/ферромагнетик, так как будет отсутствовать прямой интерфейсный контакт между сверхпроводником и ферромагнетиком.

Мы решили исследовать структуры сверхпроводящего спинового клапана конструкции Fe/Nb/Fe и $Fe/Al_2O_3/Nb/Al_2O_3/Fe$. В конструкции Fe/Nb/Fe предполагается наличие «мертвых» слоев на границе раздела Fe/Nb и Nb/Fe, которые могут служить изоляционными слоями на границе раздела ферромагнетик/сверхпроводник и сверхпроводник/ферромагнетик. В конструкции $Fe/Al_2O_3/Nb/Al_2O_3/Fe$ предполагается наличие изоляционных слоев за счет введения слоев Al_2O_3. Для этого необходимо отладить технологию приготовления двухслойных систем Fe/Nb и трехслойных систем $Fe/Al_2O_3/Nb$.

Образцы готовились на высококачественных монокристаллических подложках MgO и Al_2O_3 с использованием классического метода электронно-лучевого испарения в сверхвысоком вакууме 1x10-9 мбар. Были использованы сверхчистые мишени Fe, Al, Nb с чистотой выше значения 4N, что говорит о концентрации примеси менее 0.01 %. В напылительной камере установлено 4 различных мишени, что позволяет осуществлять напыление различных материалов в одном вакуумном цикле. Скорость осаждения контролировалась при помощи водоохлаждаемого кварцевого осциллятора, который непосредственно расположен вблизи подложки. Скорость напыления слоев железа (Fe) и алюминия (Al) составляла порядка 0.5 Å/s, слоев ниобия (Nb) 1-1.5 Å/s. Напыление слоя Al_2O_3 производилось в 2 этапа. В начале наносился слой алюминия толщиной 2 нм. Далее держатель образцов при помощи транспортной штанги перемещался из рабочей камеры в загрузочную. После чего в загрузочную камеру напускался кислород под давлением 100 мбар. Таким образом, производилось окисление слоя алюминия в течение 30 минут.

Были приготовлены различные серии образцов Fe/Nb и $Fe/Al_2O_3/Nb$ на различных подложках (MgO и Al_2O_3) с варьируемыми толщинами Fe и Nb. При этом менялись и условия приготовления образцов, то есть некоторые серии были приготовлены при близкой к комнатной температуре, другие при высоких температурах подложки > 400ºC.

Согласно нашим исследованиям, наиболее подходящие условия для приготовления высококачественных двухслойных систем Fe/Nb и трехслойных систем $Fe/Al_2O_3/Nb$ со стабильными сверхпроводящими свойствами следующие: а) использование подложки MgO; б) напыление при высоких температурах подложки.

Исследования выполнены за счет гранта РНФ № 22-22-00916.

Электропроводность композиционных материалов на основе полимеров, легированных углеродными нанотрубками

Гарипов Р. Р., Хантимеров С. М., Львов С. Г., Гимазов И. И., Коновалов Д. А., Сулейманов Н. М.

[1]*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН Казань, 420029, Россия (E-mail: gari_rtrf@mail.ru)*

Разработка и создание полимерных композиционных материалов, обладающих высоким уровнем функциональных свойств, является актуальной проблемой в настоящее время. В частности, особое внимание уделяется полимерным электропроводящим композиционным материалам на основе углеродных нанотрубок. В таких материалах в зависимости от концентрации наполнителя в полимерной матрице можно в широких пределах регулировать электрофизические свойства [1]. Проводящие свойства композиционного материала будут определяться концентрацией наполнителя, контактными явлениями на границах проводник-изолятор-проводник и механизмами проводимости.

В данной работе были исследованы концентрационные и температурные зависимости электропроводности образцов композиционного материала на основе эпоксидной смолы ЭД-20 и одностенных углеродных нанотрубок. Путем исследования концентрационных зависимостей электропроводности на постоянном токе установлено, что порог перколяции для исследуемых образцов составляет 0,006 вес.%. Исследования концентрационных зависимостей электропроводности на переменном токе позволили установить, что углеродные нанотрубки в полимерной матрице преимущественно отделены диэлектрической полимерной прослойкой и перенос носителей заряда может осуществляться за счет туннельного эффекта. Экспериментальное исследование и анализ температурных зависимостей электропроводности показали, что в исследуемом композиционном материале при концентрациях 1 вес.% (см. рис. 1.) и ниже основным механизмом переноса носителей заряда является туннелирование, индуцированное флуктуациями напряжения (Fluctuation induced tunneling [2]) на туннельном переходе. Таким образом, для образца с концентрацией углеродных нанотрубок 1 вес.% температурный диапазон, в котором туннелирование носителей заряда сквозь тонкую полимерную диэлектрическую прослойку составляет от 10,5 К до 80 К. По мере снижения концентрации наполнителя температурный диапазон смещается в сторону больших температур.

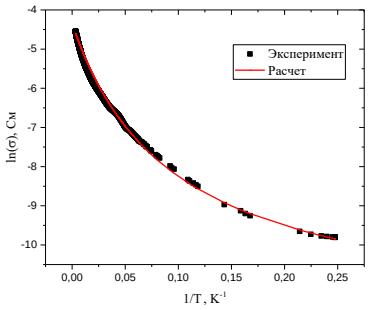


Рис. 1. Экспериментальная и расчетная температурные зависимости электропроводности образца композиционного материала с концентрацией ОУНТ 1 вес.%

ЛИТЕРАТУРА

1. N.M. Nurazzi, M.R.M. Asyraf, A. Khalina et al., Polymers **13**, 1047 (2021).
2. P. Sheng, Phys. Rev. B **21**, 2180 (1980).

Влияние дефектов на электронные свойства гетероструктуры $LaMnO_3/BaTiO_3$

Гумарова И.И., Шапошникова Т.С., Мамин Р. Ф.

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ КазНЦ РАН
Казань, 420029, Россия
Казань, 420008, Россия (E-mail: i.piyanzina@gmail.ru)

Для усиления интерфейсного магнетизма было предложено использовать магнитные изоляторы в составе гетероструктур для индуцирования спин-поляризованного двумерного электронного газа (2DEG) на интерфейсе [1, 2]. Еще более перспективным здесь является манипулирование им с помощью электрического поля, таким образом создавать своеобразный сегнетоэлектричский полевой транзистор.

В настоящей работе в качестве модельной системы была исследована гетероструктура $LaMnO_3/BaTiO_3$ (LMO/BTO) вдоль направления [001], в составе которой есть антиферромагнетик A-типа и сегнетоэлектрик. Основываясь на расчетах теории функционала плотности (DFT), были исследованы возможности появления 2DEG в гетероструктуре LMO/BTO при наличии дефектов. Прежде всего, было исследовано влияние кислородных вакансий, расположенных в разных слоях, на электронные свойства и на возможность появления 2DEG состояния.

Система LMO/BTO без наложенной внешнего поля остается полупроводником вплоть до 6 верхних слоев BTO, с малой шириной запрещенной зоны равной ~0.2 эВ, которая медленно убывает, асимптотически приближаясь к нулю. Ранее было показано, что сочетание сегнетоэлектрической поляризации и антиферромагнетизма может влиять на состояния 2DEG, и наложенная наложение внешнего электрического поля по направлению к поверхности гетероструктуры изменяет полупроводниковое состояние на проводящее. Нами показано, что проводящее состояние на интерфейсе может быть вызвано наличием кислородных вакансий как на поверхности, а также в слоях сегнетоэлектрической пленки BTO. Основываясь на наших рассчетах, мы можем констатировать, что возникновение кислородных вакансий наиболее вероятно в слоях BaO, а также они могут возникать в интерфейсном слое MnO_2. Это следует принимать во внимание при создании пленочных структур типа LMO/BTO.

Исследования выполнены за счет гранта Российского научного фонда в соответствии с исследовательским проектом № 21-12-00179.

1. Kabanov V.V., Piyanzina I.I., Lysogorskiy Yu.V. et al., Mater.Res.Express **7**, 5 (2020).
2. Weng Y., Niu W., Huang X. et al., Phys. Rev. B **103**, 214101 (2021).

Электрическая поляризация в малых магнитных частицах с магнитоэлектрической связью

Шапошникова Т.С., Мамин Р.Ф.

*Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского ФИЦ Казанский научный центр РАН, 420029, г. Казань, Россия (*E-mail:*t_shap@kfti.knc.ru)*

Магнитные наночастицы и наноструктуры широко изучаются из-за их потенциальной применимости в таких областях как хранение данных, зондирование и биомедицинские приложения [1]. Наномагнетики традиционно представляют собой двумерные плоские структуры. В трехмерных наномагнетиках, например, дисках, нанопроводах, сферических наночастицах наблюдаются более сложные магнитные конфигурации с необычными свойствами [2].

Магнитоэлектрический эффект, который первоначально наблюдался только при низких температурах, в настоящее время наблюдается при температурах вплоть до комнатной в мультиферроиках, в том числе манганитах [3,4], а также в высококачественных гетероструктурах и композиционных материалах [5].

Мы рассматриваем возможность появления магнитоэлектрического эффекта в малых ограниченных областях с магнитным порядком. Неоднородное магнитное упорядочение в таких нанообластях может приводить к магнитоэлектрическому отклику. Механизм появления поляризации подобен механизму появления поляризации в доменных стенках в магнитоупорядоченных материалах. В данной работе мы рассматриваем возможность возникновения электрической поляризации в малых шарообразных магнитных частицах, находящихся в парамагнитной матрице.

Микроскопический механизм возникновения магнитоэлектрического эффекта обусловлен наличием взаимодействия Дзялошинского-Мории [6, 7]. Конкретный вид выражений для намагниченности и поляризации определяется геометрией нанообластей и граничными условиями. Определена область существования таких состояний. Ненулевая средняя сегнетоэлектрическая поляризация и магнитоэлектрический эффект наблюдаются только в присутствии внешнего магнитного поля. Получено выражение для ненулевой магнитоэлектрической восприимчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Peixoto L., Magalhaes R., Navas D. et al., Appl. Phys. Rev. **7**, 011310 (2020).
2. Fernaṙndez-Pacheco A., Streubel R., Fruchart O. et al., Nat. Com. **8**, 15856 (2017).
3. Spaldin N.A., Ramesh R., Nat. Mater. **18**, 203 (2019).
4. Fiebig M., Lottermoser T., Meier D., Trassin M., Nat. Rev. Mater. **1**, 16046 (2016).
5. Zhou Z., Zhao S., Gao Y., et al., Sci. Rep. **6,** 20450 (2016).
6. Дзялошинский И.Е., ЖЭТФ **37**, 81 (1960).
7. Morya T., Phys. Rev. **120**, 91 (1960).

ДЛЯ ЗАМЕТОК