

*На правах рукописи*



Масюгин Альберт Николаевич

МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ПЛЕНКАХ ЦЕРИЕВОГО  
И ВИСМУТОВОГО ФЕРРИТА ГРАНАТА С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ  
ЗАМЕЩЕНИЕМ

1.3.8. Физика конденсированного состояния

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева»

**Научный руководитель:** **Аплеснин Сергей Степанович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
университет науки и технологий имени  
академика М.Ф. Решетнева»,  
заведующий кафедрой физики

**Официальные оппоненты:** Санина Виктория Александровна  
доктор физико-математических наук,  
ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф.  
Иоффе Российской академии наук,  
главный научный сотрудник лаборатории физики  
сегнетоэлектричества и магнетизма

**Чжан Анатолий Владимирович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Красноярский государственный  
аграрный университет»,  
заведующий кафедрой физики

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Защита состоится 8 октября 2021 г. в 16:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.228.01 в Институте физики им. Л.В. Киренского СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН по адресу: 660036, Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ИФ СО РАН

Автореферат разослан 25 августа 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук

11

Втюрин  
Александр  
Николаевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Исследование новых материалов, обнаруживающих свойства мультиферроиков и сильную взаимосвязь между магнитной, электронной и упругой подсистемами, проявляющуюся в виде магнитоэлектрических и магниторезистивных эффектов в области комнатных температур, представляет интерес, как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Например, создание эффективных сенсоров, элементной базы в микроэлектронике, энергонезависимой магнитной памяти, так и быстродействующих электрических систем обработки информации. Привлекательными являются многофункциональные материалы, например мультиферроики с магнитооптическими эффектами. Так в пленках железо иттриевого граната, замещенных висмутом, созданы пространственные модуляторы света с высокой скоростью переключения [1] и устройства для магнитооптической памяти на основе эффектов Фарадея и Керра [2]. Пленки феррита граната с висмутом обнаруживают магнитоэлектрический эффект и свойства мультиферроиков.

В объемном висмутовом феррите граната линейный магнитоэлектрический эффект отсутствует. При переходе к мезоскопическому масштабу линейный МЭ проявляется в слабых полях за счет изменения магнитной доменной структуры. В пленках  $(\text{BiLu})_3(\text{FeGa})_5\text{O}_{12}$  обнаружено движение магнитных доменных границ под действием электрического поля [3] и переключение их электрической поляризации под действием магнитного поля [4], которое отсутствует на пленках с ориентацией подложки (111). Зависимость МЭ эффекта от толщины пленки указывает на существование нескольких механизмов взаимодействия электрической и магнитной подсистем. Активно обсуждается механизм неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия, который в магнитно-неоднородных системах приводит к несобственной электрической поляризации [5], который называют флексомагнитоэлектрическим эффектом. Это явление универсально для всех магнитоупорядоченных сред и действует в центросимметричных магнитных диэлектриках.

Интерфейс диэлектрик-полупроводник и парамагнетик-ферромагнетик также может индуцировать электрическую поляризацию вблизи интерфейса в результате неоднородной деформации кристаллической структуры пленки. В одном материале возможно существование пьезоэффекта и магнитострикции, что может привести к магнитоэлектрическому взаимодействию.

Таким образом, тонкие пленки на основе иттриевых феррит гранатов, обнаруживают ряд эффектов и новых явлений связанных с

магнитоэлектрическим и магнитооптическим эффектам. Поэтому актуально исследование этих эффектов, механизмов их взаимосвязи.

**Целью** диссертационной работы является установление механизмов магнитоэлектрического (МЭ) взаимодействия в пленках иттриевого феррит граната, замещенных висмутом и церием. Для достижения цели в диссертации решались следующие **задачи**:

1. Исследовать влияние интерфейса на магнитодиэлектрические свойства пленок висмутового феррита граната на стекле и на галлий гадолиниевом гранате.

2. Исследовать роль неподеленной электронной пары ионов висмута в магнитоэлектрическое взаимодействие путем замещения ионов висмута ионами церия.

3 Установить вклад упругой решетки в МЭ взаимодействие за счет магнитострикции и электрострикции в пленках.

#### **Объект и предмет исследования.**

**Объект:** тонкие пленки  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на стеклянной подложке и  $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  на монокристаллической подложке галий гадолиниевого граната (GGG) и поликристаллические пленки  $Ce_3Fe_5O_{12}$  на подложке GGG.

**Предмет:** эффекты взаимодействия магнитной и электрической подсистем, выяснение вклада в МЭ эффект ЕН и ЕН<sup>2</sup>, индуцирование магнитным полем электрической поляризации.

#### **Методы исследования:**

1. Измерение констант электро- и магнитострикции от электрического и магнитного поля, от температуры.

2. Измерение емкости и тангенса угла потерь в области частот 20 Гц-1 МГц в магнитных полях до 12 кЭ от частоты и температуры. Импедансная спектроскопия, компоненты импеданса от температуры и частоты.

3. Измерение электрической поляризации от электрического поля в магнитных полях до 12 кЭ при четырех ориентациях магнитного поля относительно пленки при фиксированных температурах.

4. Определение компонент магнитоэлектрического тензора в магнитном поле до 12 кЭ при разных ориентациях магнитного поля относительно пленки.

#### **Научная новизна работы:**

1. Установление корреляции температур экстремумов в электро- и магнитострикции, коэффициентов теплового расширения от температуры в висмутовом феррите граната с редкоземельным замещением.

2. Определение гистерезиса электрической поляризации пленок висмутового феррита граната и температур исчезновения для двух типов подложек.
3. Установление линейного и квадратичного МЭ в пленках и роли неподеленной электронной пары ионов висмута в МЭ эффект.
4. Существование тока с переносом заряда и электрической поляризации в висмутовых пленках.
5. Определение магнитоемкости пленок висмутового феррита граната.

#### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Установлен максимум магнитострикции и электрострикции на монокристаллических и поликристаллических пленках при низких температурах и смена знака магнитострикции с отрицательного на положительный в пленках висмутового феррита граната.
2. Найден гистерезис электрической поляризации в электрическом поле. Обнаружен линейный и квадратичный МЭ эффект по магнитному полю. МЭ взаимодействие в пленке на гранате больше, чем на стекле.
3. Обнаружен рост электроемкости в феррите граната висмута в магнитном поле.
4. Найден гистерезис ВАХ и гистерезис электрической поляризации в пленках феррита граната висмута. Установлено отсутствие гистерезиса в пленках феррита граната церия.

#### **Научная значимость работы:**

Научная значимость связана с индуцированием электрической поляризации в магнитном поле и с обнаружением линейного магнитоэлектрического эффекта в ферромагнитных пленках в магнитных полях, превышающих поле насыщения. Магнитоэлектрический эффект может быть обусловлен несколькими механизмами: деформацией структуры, приводящей к нарушению центра инверсии в результате эпитаксиальных напряжений пленки на подложке или катионного замещения по додекаидрическим узлам; неподеленной электронной парой ионов висмута и спин-орбитальной связью. Использование двух типов подложек и замещение висмута церием позволило выделить эти вклады в МЭ эффект. Линейный магнитоэлектрический эффект вызван полярным смещением ионов в пленках при синтезе пленок и флексомагнитоэлектрическим эффектом. Влияние магнитного поля на электронную структуру при деформациях октаэдров в результате спин-орбитального и обменно-стрикционного взаимодействия является микроскопическим механизмом МЭ взаимодействия. При замещении висмута церием линейная зависимость поляризации от магнитного поля

обусловлена градиентом деформации ионов церия в пленке и парапроцессом редкоземельных элементов.

### **Практическая значимость работы:**

Возможные применения в микроэлектронике связаны с более плотной записью информации, как в магнитном, так и в электрическом поле, в электромеханических системах, создающих управляемые статические перемещения. Контролируемая линия магнитостатической задержки для коммуникационной технологии в диапазоне ГГц и датчики для визуализации вихревых токов в реальном времени с высоким пространственным разрешением.

**Достоверность результатов** подтверждается согласием экспериментальных результатов, полученных при исследовании диэлектрических, магнитоэлектрических, оптических свойств различными методами и качественным согласием с существующими теоретическими расчетами магнитоэлектрических характеристик редкоземельных ферритов гранатов.

**Личный вклад** автора заключается в проведении измерений магнитоэлектрических и диэлектрических характеристик, обработке и интерпретации полученных результатов, подготовке их к публикации, участии в написании статей и докладов.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований по теме диссертации докладывались и обсуждались на конференциях различного уровня: Международная научная конференция «Решетневские чтения» (Красноярск, 2017, 2018, 2019); Московский международный симпозиум по магнетизму (Москва, 2017); XXII Международный симпозиум «Нанофизика и наноэлектроники» (Нижний Новгород, 2018, 2020). Тезисы докладов VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» (г. Минск 2018 г.), 14-ой Российской конференции по физике полупроводников (г. Новосибирск, 2019г.), VII Евро-Азиатского симпозиума «Тренды в магнетизме» (г. Екатеринбург, 2019г.).

**Работа поддержана грантами:** Грант РФФИ № 18-42-240001 «Инверсия знака компонент магнитоэлектрического тензора по температуре в пленках висмутового феррита граната замещенного неодимом», конкурс на лучшую научную работу по итогам ранее выполненных работ аспирантами и молодыми учеными ФГБОУ ВО «СибГУ им. М. Ф. Решетнева» в 2020 году, премии Главы города молодым талантам в номинации «За высокие достижения в научно-учебной деятельности».

**Публикации.** По теме диссертации 5 статей в базе данных WOS и по списку ВАК, 9 публикаций в материалах международных симпозиумов и конференций. Список публикаций приведен в конце авторефера.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четыре глав основного текста, заключения. Объем диссертации составляет 110 страницы, включает 57 рисунка и библиографический список из 134 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели исследования, показана научная новизна и практическая значимость результатов работы, представлена степень апробации, количество публикаций и структура диссертации.

**Первая глава** является обзорной. В ней анализируются механизмы магнитоэлектрического взаимодействия. Рассматривается спин-решеточный, спин-орбитальный и орбитальные вклады в магнитоэлектрическое взаимодействие. Отмечается важность учета неоднородного магнитоэлектрического взаимодействия в магнитоупорядоченных структурах при наличии доменов, доменных стенок, спиральной структуры [6]. Обсуждаются экспериментальные работы и методы определения МЭ эффекта. Рассмотрен МЭ эффект в иттриевом феррите граната, индуцированный сильным электрическим полем [7]. Обсуждаются магнитная и электронная структуры висмутового феррита граната.

Рассмотрены методы исследования диэлектрических свойств, электрической поляризации в магнитном и электрическом поле, спектр импеданса пленок  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на стеклянной подложке и  $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  на монокристаллической подложке GGG и поликристаллические пленки  $Ce_3Fe_5O_{12}$  на подложке GGG. Измерения диэлектрических свойств в данной работе проведены на анализаторе компонентов АМ-3028 в интервале температур 80К – 500 К в нулевом магнитном поле и в поле 12 кЭ. Точность измерений составляет 0,1%. Электрическая поляризация определялась из тока, измеренного на электрометре «Keithley 6517B», погрешность измерения составляет 1%.

**Вторая глава** посвящена исследованию влияние интерфейса на электрическую поляризацию, магнитоэлектрический эффект пленок висмутового феррита граната на стекле и на галлий гадолиниевом гранате. Эпитаксиальные пленки  $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  на монокристаллической подложке GGG, выращенной в кристаллографическом направлении (111) и поликристаллические пленки  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на стеклянной

подложке, изготовлены путем разложения металлоорганического соединения из раствора в Технологическом университете Нагаока (Япония) [8]. Методами просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) на микроскопе Hitachi HT 7700 при ускоряющем напряжении 110 кВ определена толщина пленок  $380 \pm 10$  нм, граница раздела, которая имеет резкий интерфейс между пленкой и GGG подложкой (рисунок 1), и несовпадение параметров решетки пленки и GGG, которое составляет 1.55%. Параметры решетки пленки перпендикулярно подложки 1.259 нм и вдоль пленки 1.266 нм. Симметрия пленки отличается от кубической.

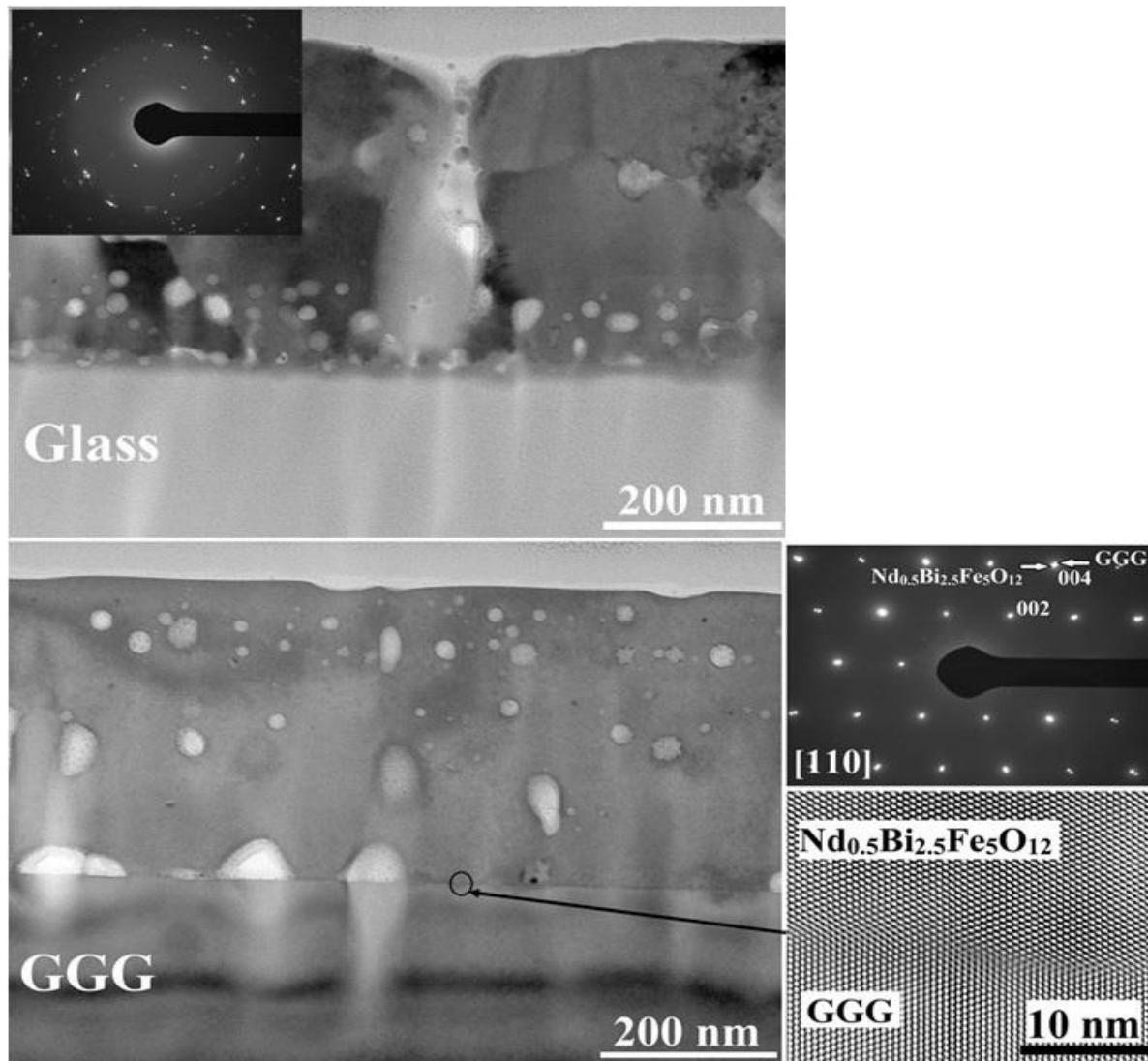


Рисунок 1 – Морфология и рентгеновские снимки пленки на гранате (внизу) на стекле (вверху), полученные с помощью просвечивающего электронного микроскопа.

Электрическая поляризация  $P(E, H)$  от электрического и магнитного полей определялась по нормали к пленки из соотношения  $P = \int j dt$  при измерении тока во внешнем квазипериодическом поле с частотой  $v=0.01$  Гц. Гистерезис  $P(E)$  (рисунок 2) связан с образованием доменной структуры в результате мозаичной структуры при упругих напряжений

типа растяжения со стороны подложки, которые составляют ~0.3% и ~0.1% соответственно вдоль и перпендикулярно пленке [9].

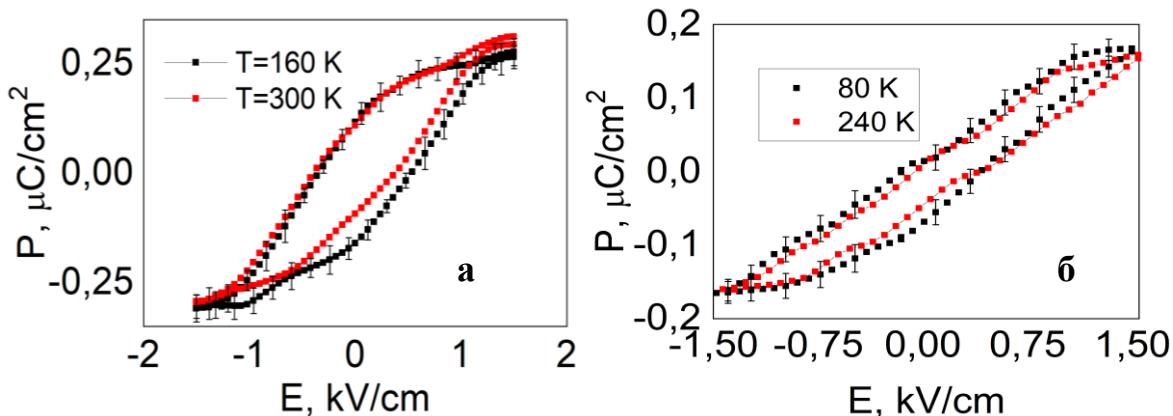


Рисунок 2 - Электрическая поляризация по нормали пленок на подложках из GGG (а) и стекла (б) от внешнего электрического поля.

Ширина гистерезиса  $P(E)$  не превышает  $0,3 \text{ мкКл/см}^2$  и на подложке из стекла на 30-60% меньше, чем на подложке из GGG. Можно предположить, что электрическая поляризация обусловлена смещением ионов висмута в додекаэдре, (эффект неподеленной электронной пары) и ростом ковалентности с ионом железа в тетраэдрических позициях в следствие гибридизации  $p-d$  связей. Оценим величину электрической поляризации в пленке граната висмута исходя из простой модели точечных зарядов, локализованных на ионах. В ячейке феррита граната содержится 24 тетраэдра и 24 додекаэдра содержащих 83 % висмута в  $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  и 59 % в  $\text{Nd}_1\text{Bi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$ , так как толщина  $\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  составляет 290 нм. Поляризация, возникающая за счёт смещения ионов висмута из симметричных позиций, представим в виде  $P=N_{\text{Bi}} e/V \delta_{\text{Bi}}$ , где  $\delta_{\text{Bi}}$  смещения ионов висмута относительно исходного положения в ячейке объемного образца,  $V = a^3$  — объём ячейки. Остаточная (спонтанная) поляризация  $0.2 \text{ мкКл/см}^2$ , согласно этим оценкам, соответствует смещению ионов  $\delta=5 \cdot 10^{-13} \text{ м}$ , что составляет 0.15% изменения длины связи Bi-O и согласуется с величиной упругих напряжений.

На рисунке 3 представлены зависимости  $P(H)$  для пленок на подложках из граната и стекла в интервале температур 80-280 К. Поляризация в поле 12 кЭ для моноクリсталлической пленки обнаруживает анизотропию и достигает максимума при 160 К в поле, направленном вдоль пленки, и наибольшего значения при 200 К в поле по нормали к пленке. В поликристаллической пленке максимумы поляризации в магнитном поле наблюдаются при 200 К и 280 К. Температура максимума МЭ взаимодействия коррелирует с температурой, при которой константа магнитострикции меняет знак и наблюдается максимум коэффициента теплового расширения.

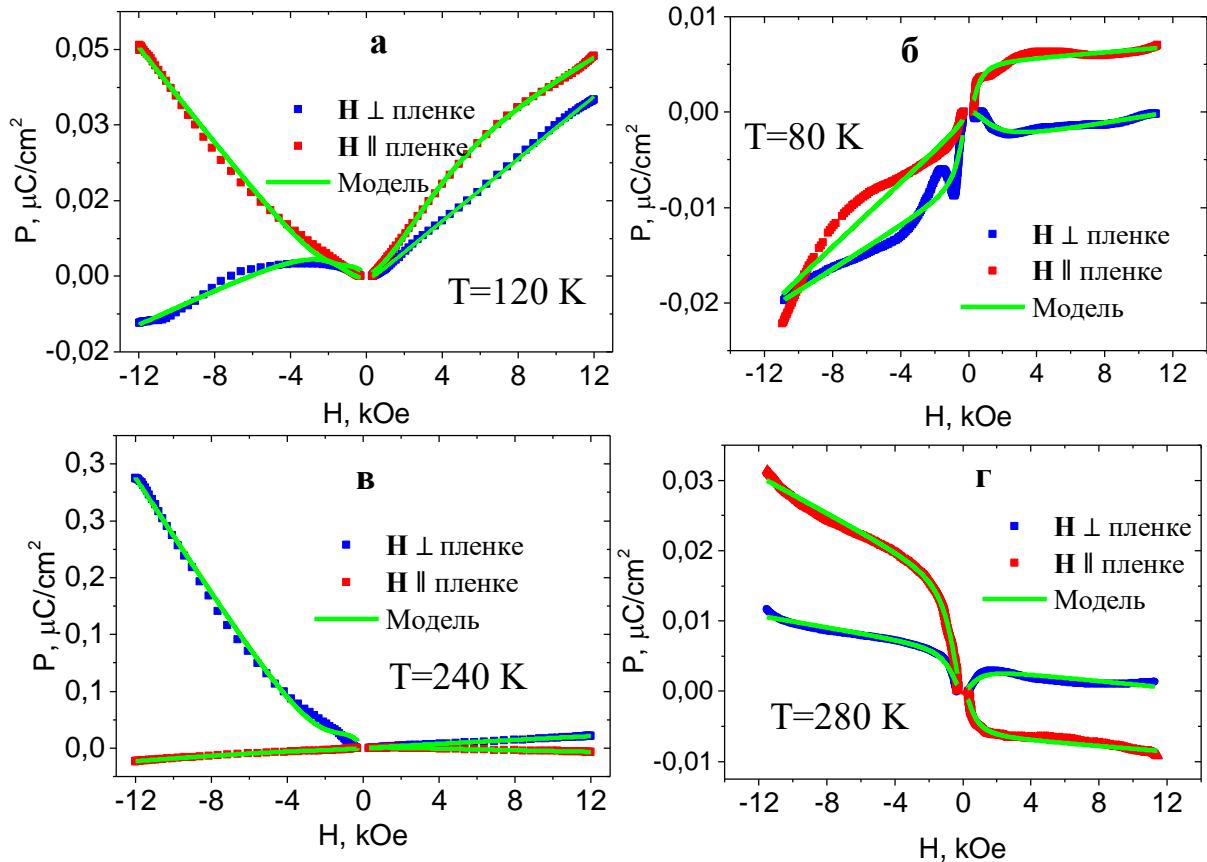


Рисунок 3 - Электрическая поляризация по нормали пленки на подложке из GGG (а, в) и стекла (б, г) от магнитного поля. Теоретические расчеты (модель) по формуле (5) (сплошная линия).

Можно выделить три основных механизма магнитоиндуцированной электрической поляризации в мультиферроиках: (а) полярные смещения ионов, изменяющие угол между связями магнитных ионов и лигандом и влияющие на величину обменного поля и относительную ориентацию магнитных моментов [10]; (б) взаимосвязь пространственной модуляции спина и электрической поляризации вследствие релятивистского механизма [11]; (в) перераспределение электронной плотности в результате спин-орбитального взаимодействия [12]. Анализ карты обратного пространства близи направления [111] указывает на анизотропию интенсивности дифракционных пиков пленки относительно максимума и эллиптическую форму интенсивности по сравнению с кругом для подложки GGG, что свидетельствует о мозаичной структуре пленок граната. Спин-орбитальное взаимодействие на ионах железа согласно расчетам электронной структуры  $\text{Bi}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  составляет 10 мэВ в валентной зоне и 39 мэВ в зоне проводимости [13] в результате гибридизации p-d состояний ионов висмута и железа. Согласно ЯМР, магнитный момент иона висмута  $0.1 \mu_B$  [14]. Подгоночную функцию для поляризации, обусловленную обменно-стrikционным механизмом, представим в виде:

$$P = \frac{\gamma H^2}{1+dH^2} \quad (4)$$

где  $\gamma$  и  $d$  - подгоночные параметры. Поляризация, вызванная смещением ионов кислорода, в результате конкуренции упругих, обменных и орбитально-решеточных взаимодействий, выходит на насыщение при некотором значении магнитного поля. Электрическая поляризация пленки, индуцируемая магнитным полем, описывается суммой линейного и квадратичного МЭ взаимодействия в магнитном поле:

$$P_i = \alpha_{ij} H_j + \frac{\gamma_{ij} H_j^2}{1+dH_j^2} \quad (5)$$

Функция (5) удовлетворительно описывает экспериментальные результаты  $P(H)$ . Микроскопический механизм взаимодействия намагниченности и электрической поляризации происходит через решетку и связан с магнитоупругим и со спин-орбитальным взаимодействием.

Взаимосвязь магнитной и электрической подсистем за счет магнитоупругого и пьезоэлектрического взаимодействий исследуется на основе коэффициента теплового расширения пленок, магнитострикции и электрострикции. Использование двух типов подложек и разных замещающих элементов неодима и галлия позволит выяснить влияние эпитаксиальных напряжений. Для измерения относительного изменения линейных размеров пленки использовались датчики напряжения ZFLA-3-11 с сопротивлением 140 Ом. Измерялась разница сопротивлений двух датчиков на пленке и на подложке  $\delta L = (R_f - R_s)/R_s = (L_f - L_s)/L_s$ . Константа магнитострикции определялась по изменению сопротивления тензодатчика в магнитном поле  $\lambda = (R(H) - R(0))/R(0) = (L(H) - L(0))/L(0)$ . На рисунке 4 представлено относительное изменение длины пленок на стекле и гранате от температуры, которое качественно отличаются ниже комнатной температуры.

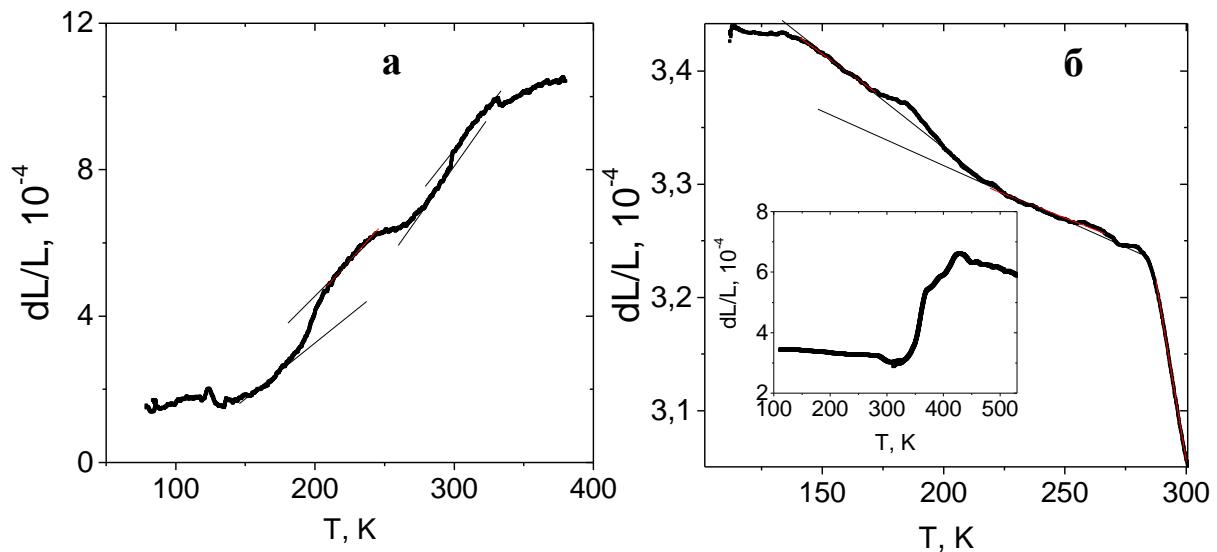


Рисунок 4 - Относительное изменение длины пленок: монокристаллической пленки  $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  на гранате (а) и  $\text{Nd}_1\text{Bi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  на стекле (б) от температуры.

Так подложка из стекла препятствует растяжению пленки и относительный коэффициент теплового расширения (ТКР)  $d(\delta L)/dT < 0$  в интервале 100 -300 К, тогда как для пленки на гранате  $d(\delta L)/dT > 0$  выше 160 К. Экстремальные значения коэффициента теплового расширения пленок достигаются при  $T=196$  К и 295 К, 360 К и 416 К на стекле и при  $T=128$  К, 192 К и 296 К на гранате. Температуры аномалий ТКР пленок при 194, 295 К не зависят от типа подложки и связаны со структурными деформациями пленок. Скачки с изменением объема пленки вызваны деформацией октаэдров. Так в иттрий висмутовом феррите граната в  $\text{Y}_{1.8}\text{Bi}_{1.2}\text{Fe}_{3.5}\text{Ga}_{1.5}\text{O}_{12}$  смягчается мода колебаний октаэдров при 200 К и 400 К. Интенсивность комбинационной моды в интервале частот 800-850  $\text{cm}^{-1}$  уменьшается при 200 К и 280 К.

На рисунке 5 представлены константы магнитострикции  $\lambda$  для пленок на стекле и гранате в зависимости от внешнего магнитного поля. В области комнатных температур нелинейная зависимость  $\lambda(H)$  вызвана конкуренцией обменной и одноионной магнитострикцией. Константа магнитострикции в магнитном поле  $H=12$  кЭ меняет знак ниже 315 К. Наибольшая деформация пленок в магнитном поле на стекле и гранате достигается соответственно при температурах 200 К и 160 К. Температурная зависимость констант магнитострикции в магнитном поле 12 кЭ приведена на рисунке 6. С понижением температуры магнитострикция проходит через минимум при  $T=160$  К и так же, как и на стекле практически не зависит от температуры при дальнейшем охлаждении ниже 120 К.

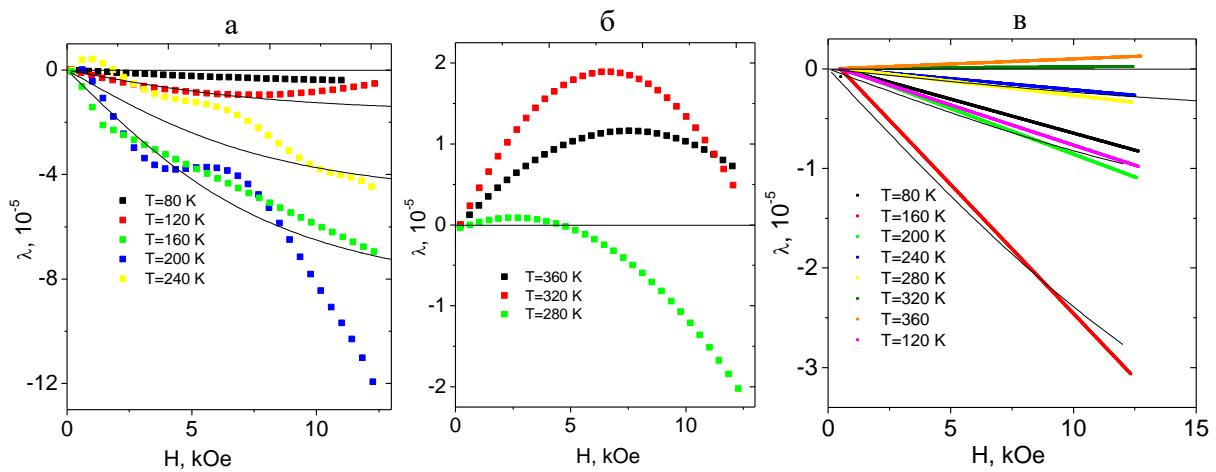


Рисунок 5 - Константа магнитострикции  $\lambda = (L(H) - L(0)) / L(0)$  пленки  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на стекле (а, б) и монокристаллической пленки  $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  на GGG (в) при фиксированных температурах от магнитного поля.

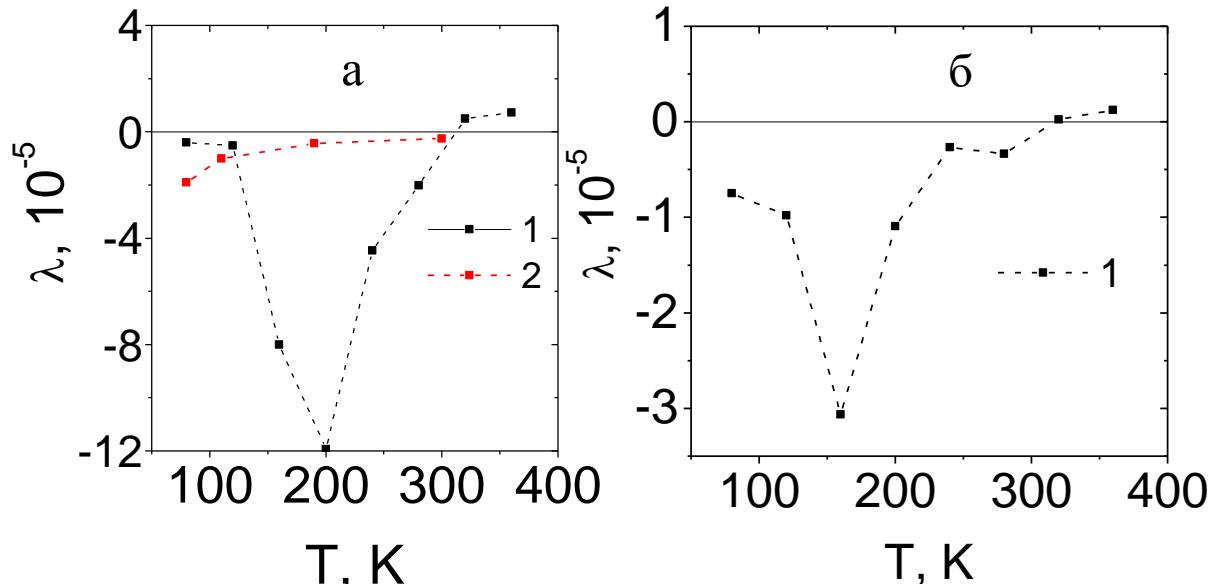


Рисунок 6 - Константа магнитострикции пленки  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на стекле от температуры (1), феррита-граната  $Y_{2.5}Nd_{0.5}Fe_5O_{12}$  (2)(а), пленки  $Nd_{0.5}Bi_{2.5}Fe_5O_{12}$  на GGG (6).

Относительное изменение линейных размеров пленки  $Nd_1Bi_2Fe_5O_{12}/Nd_2Bi_1Fe_4Ga_1O_{12}$  на подложке из стекла измерялось в электрическом поле до 400 В/см (рисунок 7). Пленка незначительно расширяется во внешнем электрическом поле при  $T=80$  К. Выше температуры  $T=120$  К пленка нелинейно сжимается и достигает максимальной величины деформации в полях 300-400 В/см при  $T = 200$  К. Деформация пленки зависит от знака электрического поля. Это указывает на наличие двух вкладов, пьезоэлектричества и электрострикции. Деформация пленки по абсолютной величине возрастает при повышении

температуры, проходит через максимум при 200 К и уменьшается при дальнейшем увеличении температуры вплоть до 360 К. В окрестности 200 К коэффициенты теплового расширения, магнитострикции и электрострикции пленок обнаруживают максимумы. Максимальная деформация пленок в магнитном и электрическом полях происходит при одной и той же температуре, при которой смягчается мода колебаний октаэдров, что указывает на взаимосвязь магнитных и диэлектрических свойств и на наличие магнитоэлектрической связи.

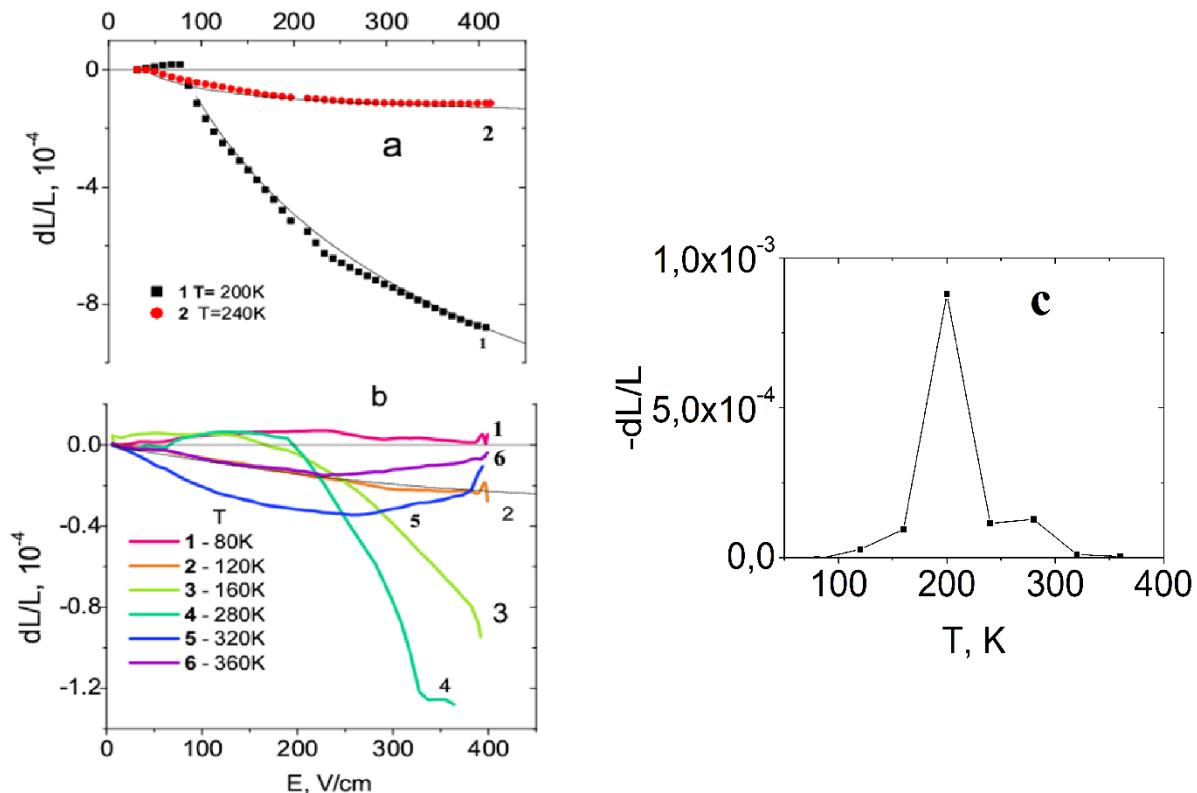


Рисунок 7 - Относительное изменение линейных размеров пленки в зависимости от электрического поля (а, б) и температурная зависимость относительного изменения линейных размеров в поле 400 В/см для пленки  $\text{Nd}_1\text{Bi}_2\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Nd}_2\text{Bi}_1\text{Fe}_4\text{Ga}_1\text{O}_{12}$  на подложке из стекла (с).

Магнитострикционные константы являются произведением магнитоупругих констант и спиновых корреляционных функций, которые определяют температурную и полевую зависимости магнитострикции [15]. Смена знака константы магнитострикции вызвана изменением знака магнитоупругих констант и уменьшением нелинейных характеристик, вытекающих из уменьшения интенсивности комбинационной моды. В пленке на стекле ионов неодима в три раза больше, чем в пленке на GGG, поэтому здесь проявляется одноионный вклад в магнитострикцию, связанный с взаимодействием магнитного момента редкоземельного иона с кристаллическим полем, который пропорционален  $\lambda(H)/\lambda(0)=3/5m^2$  ( $H$ ), где  $m$  - относительная намагниченность подрешетки неодима при  $m \ll 1$ ,

$I=2$ . При  $T > 280$  К компонента намагниченности  $m^x \sim H$  и  $\lambda(H) = -AH^2$ . Подгоночная функция  $\lambda(H) = -AH^2 + BH$  удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

Максимум магнитострикции и электрострикции в интервале температур 160-200 К указывают на решеточный вклад в магнитоэлектрическое взаимодействие.

**В третьей главе** определяется релаксация из импедансной и диэлектрической спектроскопии. Анализируется гистерезис ВАХ. В пленках в запрещенной зоне наблюдаются небольшие максимумы поглощения на частотах  $\omega_1 = 9300$  см<sup>-1</sup> ( $E_1 = 1.15$  эВ) and  $\omega_2 = 14100$  см<sup>-1</sup> ( $E_2 = 1.74$  эВ), обусловленные переходами на трехвалентных ионах железа  ${}^6A_1 \rightarrow {}^4T_2$ ,  ${}^4E$ ,  ${}^4T_1$  в YGG:Fe (6.2 at. %) в октаэдрических позициях с  $E_1 = 1.3$  эВ и  $E_2 = 1.77$  эВ [16]. Наличие этих переходов указывает, что пленки относятся к Моттовским полупроводникам с зарядовой щелью 2.3 эВ, формируемой ионами кислорода. Перенос заряда идет через Fe-O-Fe.

Из импедансной спектроскопии в модели Дебая для пленки на GGG найдены времена релаксации, температурная зависимость которых описывается экспонентой  $\tau_{1,2} = \tau_{1,2,0} \exp(\Delta E_{1,2}/T)$  с энергией активации  $\Delta E_1 = 69$  мВ (560 см<sup>-1</sup>) ниже комнатной температуры и выше с  $\Delta E_2 = 180$  мВ (1450 см<sup>-1</sup>), включая пленки на стекле. Наименьшее значение энергии активации связано с модой колебаний октаэдров на частоте  $\omega = 560$  см<sup>-1</sup>. В окрестности температуры смены знака констант магнитострикции наблюдаются максимумы в активной части импеданса  $Re(Z(T))$  и перегиб в  $Im(Z(T))$  в интервале 260-275 К для пленки на GGG и скачок компонент импеданса при 302 К с небольшой аномалией при 370 К в пленке на стекле. В модели эквивалентных схем годограф импеданса пленки на стекле описывается одним RC контуром (рисунок 8). Из годографа импеданса найдено время релаксации  $\tau = RC$ ,  $\tau = 0.08$  с при  $T = 340$  К и  $\tau = 0.003$  с при 380 К, которое типично для миграционной электронной поляризации.

Магнитоэлектрический эффект проявляется в увеличении емкости в магнитном поле. На рисунке 9 изображены частотные зависимости емкости в магнитном поле и без поля при фиксированных температурах. Магнитоемкость  $\Delta C/C = (C(H) - C(0))/C(0)$  для пленки на GGG и на стекле исчезает в интервале 450-470 К. Температуры широких максимумов магнитоемкости пленок на GGG при 200 К и на стекле при 280 К совпадают с температурами максимумов электрической поляризации в магнитном поле.

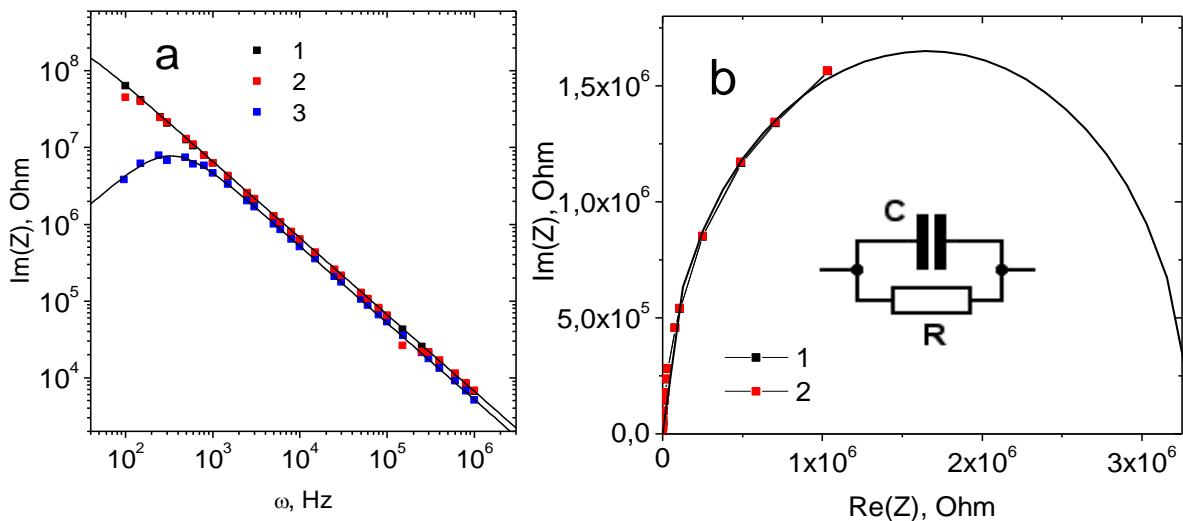


Рисунок 8 – Реактивная часть импеданса пленки на стеклянной подложке в зависимости от частоты при  $T = 300$  К (1),  $340$  К (2),  $380$  К (3) (а). Годограф импеданса пленки без магнитного поля (1) и в магнитном поле (2) при  $T = 340$  К. Эквивалентная цепь (сплошная линия) (б).

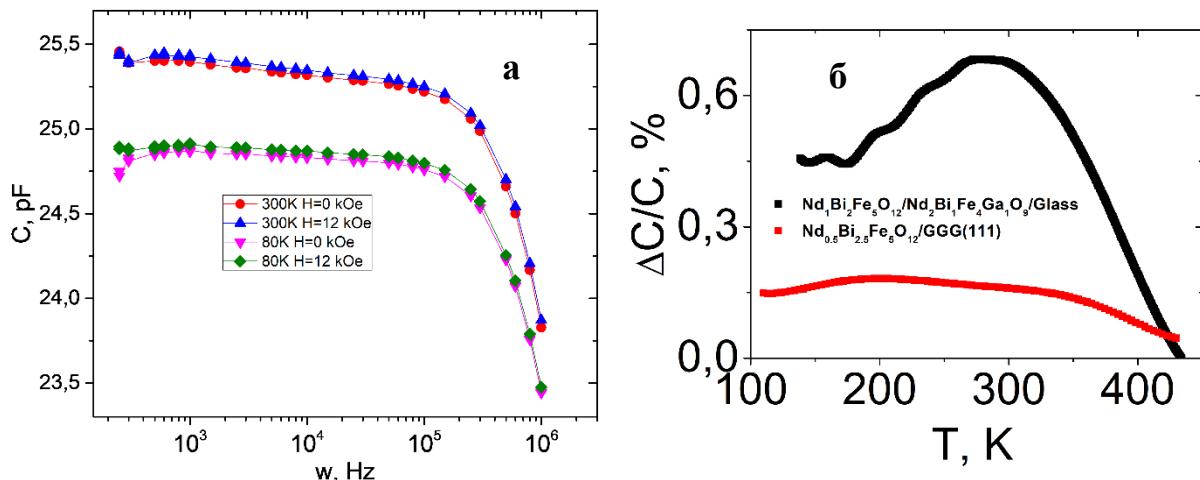


Рисунок 9 – Частотная зависимость ёмкости пленки  $\text{Nd}_{0.5}\text{Bi}_{2.5}\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  на GGG в магнитном поле и без поля (а), магнитоемкость  $\Delta C/C$  в зависимости от температуры на частоте  $\omega = 100$  кГц (б).

Поликристаллическая пленка на стекле имеет несколько аномалий в ёмкости  $C(T)$  при  $T=300$  К,  $375$  К и  $420$  К. Небольшие максимумы и скачки в  $C(T)$  связаны с изменением коэффициента теплового расширения пленки относительно стекла. Так при  $420$  К расширение пленки сменяется на сжатие. Температура аномалий диэлектрических характеристик при  $375$  К не зависят от типа подложки и коррелируют с температурой смягчения моды колебаний октаэдров на частотах  $596$  см $^{-1}$  и  $560$  см $^{-1}$ . Аномалии электрических и диэлектрических свойств при этой температуре свойственны самой пленке, и не зависят от типа подложки.

Релаксация электрической поляризации по экспоненциальному закону описывается в модели Дебая. До комнатных температур дисперсия в  $C(\omega)$  отсутствует до  $\omega=10^5$  Гц в обоих пленках. В области высоких частот

диэлектрическая проницаемость пленки как на гранате, так и на стекле описывается в модели Дебая:

$$\text{Re}\epsilon(\omega) = \frac{A}{1+(\omega\tau_1)^2} + \frac{B}{1+(\omega\tau_2)^2}, \quad (7)$$

$$\text{Im}\epsilon(\omega) = \frac{A\omega\tau_1}{1+(\omega\tau_1)^2} + \frac{B\omega\tau_2}{1+(\omega\tau_2)^2} \quad (8)$$

с временами релаксации  $\tau = (1-3) 10^{-7}$  с и в низкочастотной области спектром времен релаксации с  $\tau_1 = 3 10^{-4}$  с,  $\tau_2 = 4 10^{-5}$  с,  $\tau_3 = 2 10^{-7}$  с выше комнатных температур и ниже 300 К одним временем  $\tau \sim 10^{-7}$  с.

Со существование электрической поляризации и тока с переносом заряда определим из ВАХ характеристики, которые обнаруживают гистерезис, смещенный по осям напряжения и тока до 280 К. Уменьшение поля смещения в магнитном поле в два раза при низких температурах коррелирует по температуре с понижением кристаллической симметрии в железо-иттриевом гранате при  $T=130$  К. Гистерезис ВАХ наблюдается при разных напряжениях внешнего электрического поля (рисунок 10-11, а) и обусловлен гистерезисом электрической поляризации. Общий ток, проходящий через пленку, состоит из тока с переносом заряда  $I_{ch}$ , ток поляризации  $I_p$ ,  $I = I_{ch} + I_p$ . Транспортный ток удовлетворяет закону Ома  $I_{ch}=U/R$ ,  $I_p=dP/dt$ . В результате  $I = U/R + I_p$  и ток поляризации  $I_p = I - U/R$  проходит через максимум в интервале напряжений ( $-U_{min}$   $U_{max}$ ). Зависимость электрической поляризации от напряжения установим из соотношения  $j = dP/dt = (dP/dU)(dU/dt)$ ;  $P = \frac{\int j dU}{dt}$  с точностью до постоянного множителя (рисунок 10, б).

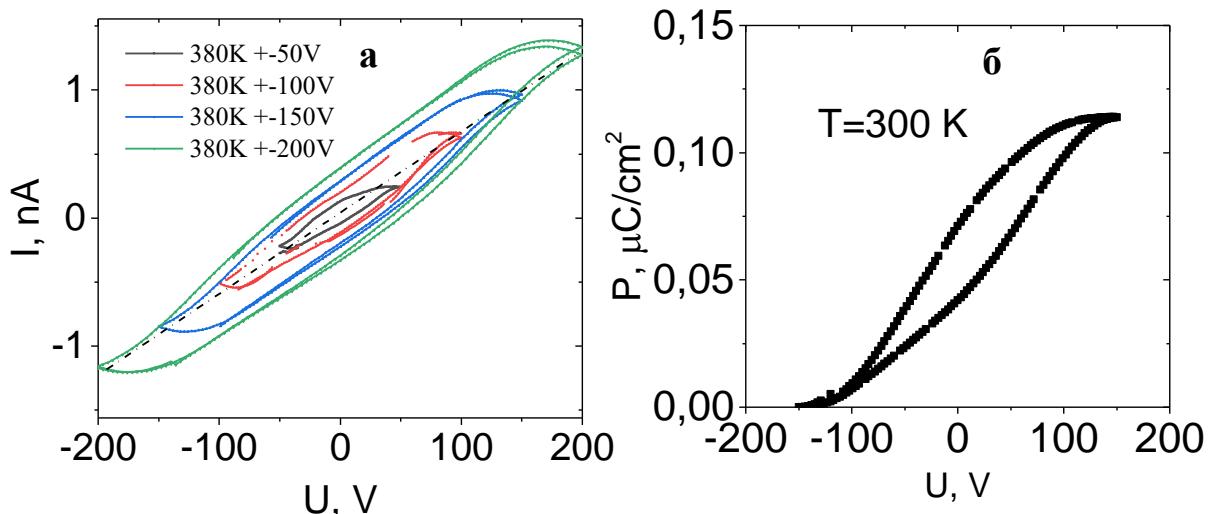


Рисунок 10 - ВАХ при различных напряжениях развертки (а) и поляризация от напряжения для пленки на гранате (б).

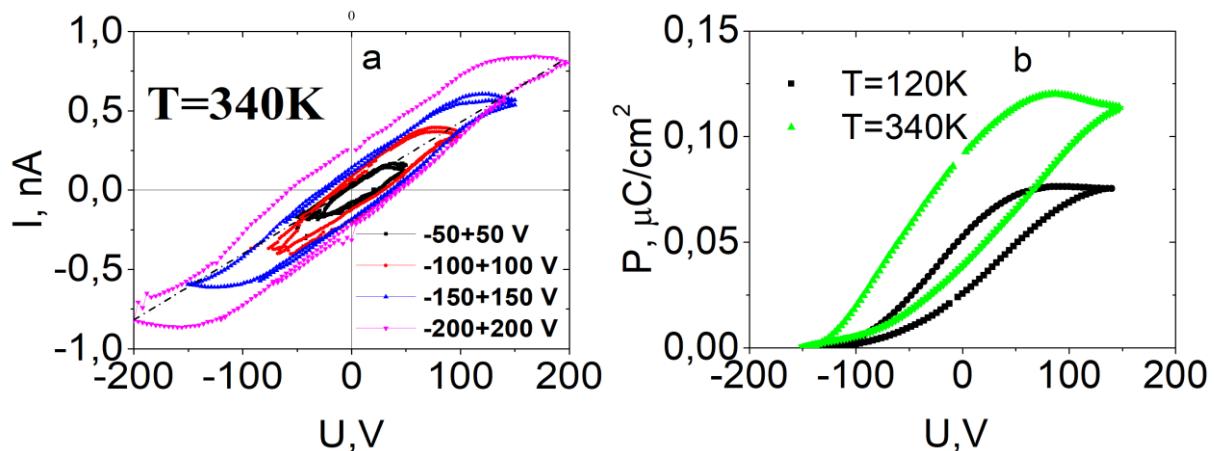


Рисунок 11 - ВАХ пленки на стекле при  $T = 340$  К (а) при различных напряжениях развертки; Зависимость поляризации пленки на стекле от электрического напряжения при (б).

Электрическая поляризация выше 150 В выходит на насыщение. В поликристаллической пленке на стекле наблюдается гистерезис в  $P(U)$  в результате закрепления доменной границы на межкристаллических границах. Гистерезис поляризации увеличивает ширину гистерезиса ВАХ в поликристаллической пленке на 40% больше, чем на GGG. Максимальные значения токов поляризации отличаются в полтора раза. Гистерезис ВАХ пленки на GGG уменьшается на порядок при  $T=460$  К, в поликристаллической пленке на стекле при  $T=380$  К.

Таким образом, из ВАХ найдены: гистерезис электрической поляризации и критические температуры ее исчезновения.

**В четвертой главе** анализируются магнитоэлектрическое взаимодействие и примесные состояния ионов, возникающие в результате синтеза пленок, в поликристаллической пленке  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ .

Пленка  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  толщиной 400 нм поликристаллическая со средним размером зерна 60-70 нм получена методом ионно-лучевого распыления на подложку галий гадолиниевого граната [17]. Пленка  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  обладает кубической структурой с пространственной группой S.G.: Ia3d (230) с преимущественной ориентацией в направлении (444). Параметр  $a$  элементарной кубической ячейки пленки имеет величину  $a=1.234$  нм. Кристаллическая структура пленка заметно деформирована ( $\Delta a = a_{\text{substrate}} - a_{\text{film}} = 0.05$  Å). В процентном отношении различие между параметрами решетки пленки и подложки составляет ~0.4%.

Феррит гранат  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  является параэлектриком и температурная зависимость электрической поляризации, найденной из пиротока, удовлетворительно описывается парапроцессом ионов церия.

Электрическая поляризация от магнитного поля измерялась при двух ориентациях поля относительно пленки. На рисунке 12 представлены зависимости  $P(H)$  для поликристаллической пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в интервале температур 80-360 К. Электрическая поляризация пленки, индуцируемая

магнитным полем, описывается суммой линейного и квадратичного МЭ взаимодействия в магнитном поле согласно выражению (5), которая удовлетворительно описывает экспериментальные результаты  $P(H)$ . Найдены компоненты тензора МЭ. До 180 К превалирует линейный магнитоэлектрический эффект с диагональной компонентой тензора, от 180 К до 240 К с недиагональной компонентой. Возможно, это связано со спин-переориентационным переходом при 180 К. Так в  $(Y_{1-x}Ce_x)Fe_5O_{12}$  наблюдался спин-переориентационный переход при 170 К [18]. Изменение электрической поляризации в магнитном поле монотонно убывает с ростом температуры (рисунок 13).

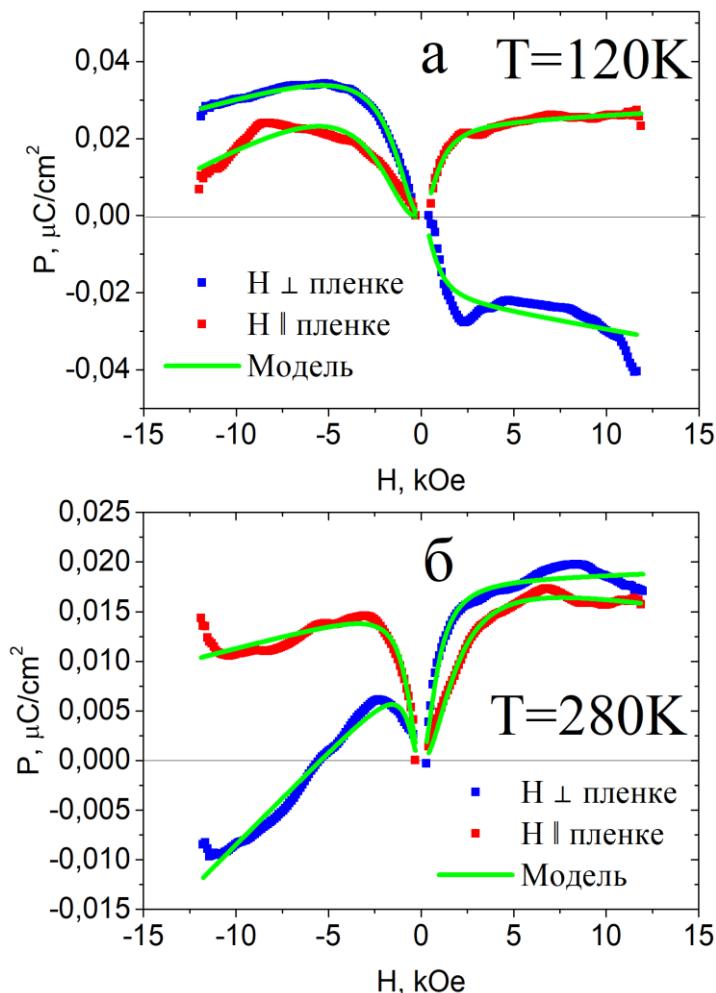


Рисунок 12 – Электрическая поляризация пленки  $Ce_3Fe_5O_{12}$  от магнитного поля, направленного по нормали к пленке и вдоль пленки при различных температурах (а – 120 К, б – 280 К). Подгоночная функция уравнения (5).

Микроскопический механизм взаимодействия намагниченности и электрической поляризации происходит через решетку и обусловлен редкоземельными ионами церия. Симметрийный анализ редкоземельных ферритов-граната [19] выявил возможность образования электрической поляризации в пленках феррита-граната. Так как по мере роста пленки

редкоземельные ионы занимают кристаллографические позиции, которые немного отличаются от положения равновесия в объемных образцах, это приводит к механическому градиенту напряжения, который характеризуется вектором  $\mathbf{K}$ . В результате инвариант магнитоэлектрического взаимодействия можно представить в виде [19]:

$$I \sim \sum_{k=1}^{12} E_z^{(k)} K_x^{(k)} H_x^{(k)} M_z^{(k)} \quad (9)$$

где  $M_z^{(k)}$  - магнитный момент редкоземельного иона, суммирование по 12 неэквивалентным позициям редкоземельного иона в примитивной ячейке феррита-граната. Для парамагнитной структуры редкоземельных ионов поляризация имеет вид:

$$P_i^{(k)} \sim \left( K^{(k)} H^{(k)} - K_i^{(k)} H_i^{(k)} \right) \eta_i^{9,1} \quad (10)$$

Здесь  $i$  обозначает  $x, y, z$ ,  $\eta^{9,1}$  - комбинации магнитных моментов редкоземельных ионов:

$$\eta_1^{9,1}(M^{(k)}) = M_x^{(3)} + M_x^{(4)}, \eta_2^{9,1}(M^{(k)}) = M_y^{(5)} + M_y^{(6)}, \eta_3^{9,1}(M^{(k)}) = M_z^{(1)} + M_z^{(2)} \quad (11)$$

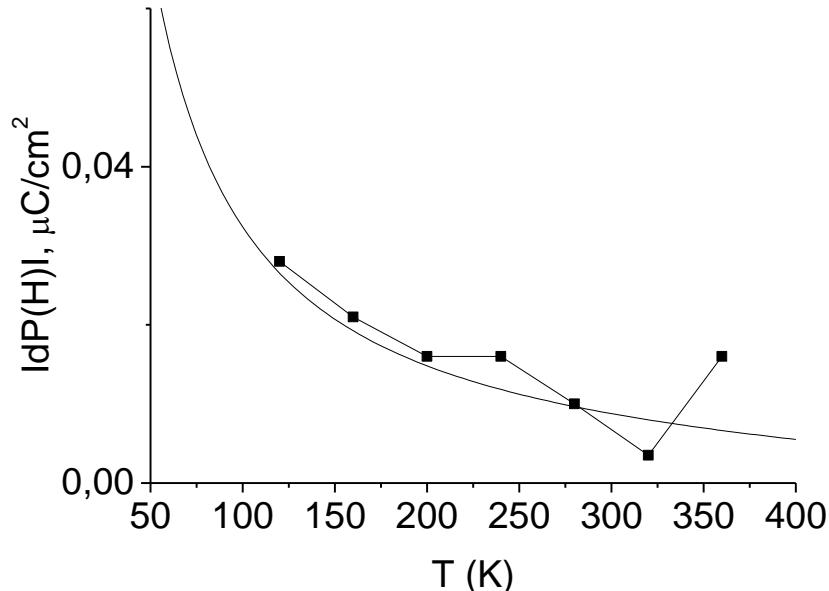


Рисунок 13 – Изменение поляризации в магнитном поле 12 кЭ в зависимости от температуры для пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$

Если градиент упругих напряжений в пленке незначительно меняется с температурой ниже комнатной, то температурная зависимость поляризации определяется парамагнетизмом ионов церия  $P \sim M_{\text{Ce}} \sim \lambda M_{\text{Fe}} / T$ ,  $M_{\text{Fe}} \sim (1 - T/T_c)^\beta$  с  $\beta=0.5$ ,  $T_c=550$  К. Эти оценки справедливы для парапроцесса.

Изменение поляризации в магнитном поле  $\Delta P = A \cdot H \cdot (1 - T/T_c)^\beta / T$  удовлетворительно описывает экспериментальные результаты с  $A=3.5$  (Рисунок 13).

В поликристаллических пленках феррита граната церия найдены две линии поглощения в области частот  $\omega_1 \sim 5520 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda_1 \sim 1.5 \text{ мкм}$ ) и  $\omega_2 \sim 6800 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda_2 \sim 1.8 \text{ мкм}$ ) (рисунок 14). Одна линия на частоте  $\omega_1$  исчезает при 275 К, другая на частоте  $\omega_2$  в области температур (360 - 400) К (Рис 14, б).

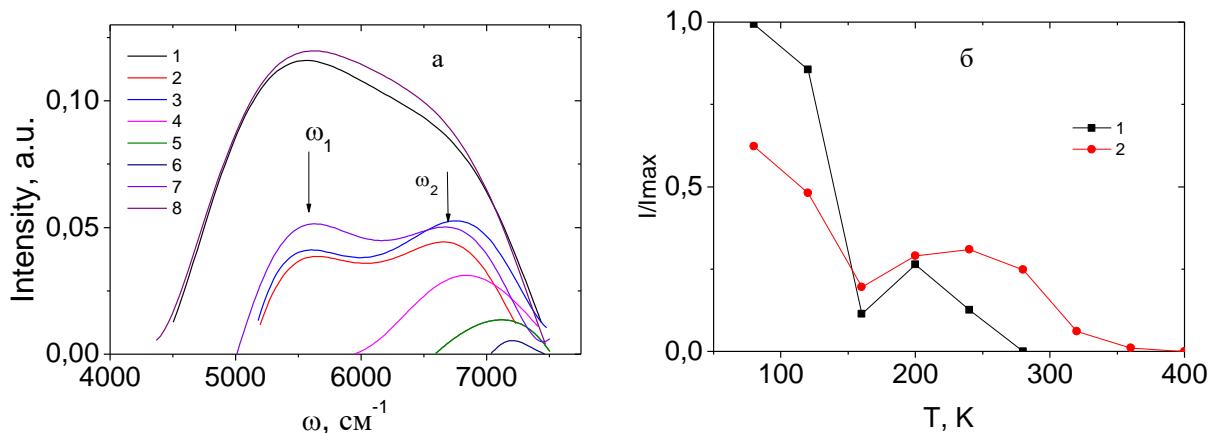


Рисунок 14 - ИК поглощение пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  в частотном интервале 4500-7500  $\text{cm}^{-1}$  120К (1), 160 К (2), 240 К (3), 280 К (4), 320 К (5), 360 К (6), 200 К (7), 80 К (8) (а). Интенсивность поглощения на частотах  $\omega_1$  (1) и  $\omega_2$  (2) от температуры (б).

Дипольные электронные переходы d-f типа между ионами  $\text{Fe}^{2+}$  в тетраэдрических (октаэдрических) позициях и  $\text{Ce}^{4+}$  образуют две линии поглощения.

Линия поглощения на частоте  $\omega_1$  исчезает при 275 К в результате смещения ионов церия в додекаэдрических позициях при деформации пленки относительно подложки. Так в Ce:YIG/GGG коэффициент теплового расширения пленки меняет знак при 284 К. Увеличение длины связи Ce-O делает энергетически невыгодным перезарядку ионов  $\text{Ce}^{4+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ . Температура 160 К, при которой интенсивность ИК поглощения пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  резко уменьшается (Рисунок 14, б) связана с изменением потенциального барьера при туннелировании электронов между катионами.

Измерены частотные и температурные зависимости импеданса. При 400 К минимум импеданса связан с максимумом емкости, вызванный смягчением моды колебаний октаэдров в феррите граната. Зависимость проводимости от частоты описывается выражением  $\sigma = \sigma_0 \omega^s$ , где  $s=0.8$  и связано с прыжковой перезарядкой дефектов одного типа.

Зависимости  $I(U)$  являются линейными в интервале температур 300-500 К, гистерезис отсутствует (Рисунок 15). Проводимость подчиняется закону Ома.

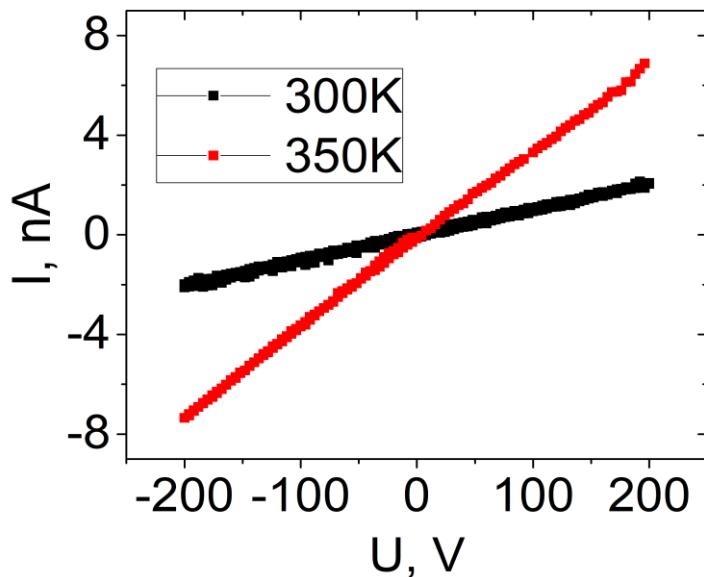


Рисунок 15 – ВАХ пленки  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  при различных температурах

**В заключении** приведены основные результаты работы и выводы

1. В пленках феррита граната висмута обнаружен гистерезис электрической поляризации. Магнитоэлектрическое взаимодействие зависит от интерфейса и на гранате МЭ взаимодействие больше, чем на стекле и в пленках цериевого феррита граната. Линейный отклик МЭ восприимчивости объясняется в модели спин-орбитального взаимодействия, квадратичный МЭ эффект связан с обменно-стрикционным механизмом.

2. Найдены температуры экстремальных значений коэффициента теплового расширения пленок, которые не зависят от типа подложки и связаны со структурными деформациями пленок.

3. Найдены отрицательные константы магнитострикции пленок для двух типов подложек в магнитном и электрическом полях ниже комнатной температуры и смена знака констант магнитострикции в области комнатных температур. Обнаружена корреляция температур максимумов магнито- и электрострикций с температурой максимума коэффициента теплового расширения.

4. Обнаружено в пленках феррита граната висмута увеличение емкости в магнитном поле, которое обусловлено МЭ взаимодействием.

5. В поликристаллической пленке феррита граната висмута обнаружен гистерезис ВАХ, обусловленный гистерезисом электрической поляризации, которые исчезают в монокристаллической пленке при более низкой температуре, чем в монокристаллической пленке.

6. Феррит граната церия  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  является паразелектриком, который обнаруживает МЭ. Линейный МЭ объясняется в модели градиента деформации с полярным смещением ионов и квадратичный обменной магнитострикцией между ионами железа. ВАХ подчиняются закону Ома, гистерезис отсутствует.

**Основное содержание и результаты диссертации** отражены в следующих публикациях:

### **Материалы международных и всероссийских конференций**

1. Аплеснин С.С., Масюгин А.Н., Ситников М.Н., Рыбина У.И., Ишибаши Т. Магнитострикция и тепловое расширение пленок висмут–неодимовых ферритов–гранатов //Нанофизика и наноэлектроника. — 2018. — С. 140-141.
2. Масюгин А.Н., Аплеснин С.С., Ситников М.Н., Рыбина У.И., Ишибаши Т. Электрострикция и магнитострикция пленок висмут ферритового граната // Новое в магнетизме и магнитных материалах. — 2018. — С. 561-563.
3. Аплеснин С. С., Масюгин А. Н., Фисенко О.Б., Ишибаши Т. Мультиферроики на основе пленок висмут - неодимовых ферритов-гранатов // Тезисы докладов VIII Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела». — 24-28 сентября 2018 г. г Минск. — С.167-169.
4. Масюгин А.Н., Фисенко О.Б. Магнитоэлектрический эффект в пленках висмут-неодимовых ферритов-гранатов // Решетневские Чтения. — 2018, Т. 1. — С. 536-538.
5. Масюгин А.Н., Бегишева О.Б., Аплеснин С.С. Роль подложки и дефектов на транспортные свойства пленки висмутового феррита граната // 14 Российская конференция по физике полупроводников, Тезисы докладов. — Новосибирск, 2019г. — С.117.
6. Aplesnin S.S., Masyugin A.N., Sitnikov M.N., Stognij A.I., Ketsko V.A., Smirnova M.N. Impedance and IR spectroscopy of films Ce<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> // VII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism». — Ekaterinburg, Russia, 2019г. — P.446-447.
7. Masyugin A.N., Aplesnin S.S., Sitnikov M.N., Ishibashi T. Influence of the substrate on the magnetoresistance of bismuth garnet ferrite substitute by rare earth // VII Euro-Asian Symposium «Trends in MAGnetism». — Ekaterinburg, Russia, 2019г. — P.442-443.
8. Масюгин А.Н., Бегишева О.Б. Магнитоэлектрический эффект и ИК-спектроскопия пленок Ce<sub>3</sub>Fe<sub>5</sub>O<sub>12</sub> // Материалы XXIII международной научно-практической конференции посвященной памяти генерального конструктора ракетнокосмических систем академика М.Ф. Решетнева. — Красноярск, 2019г. — С.565-566.
9. Аплеснин С. С., Масюгин А. Н., Филлипсон Г.Ю., Стогний А.И., Ишибаши Т. Магнитоэлектрический эффект пленок висмутового и цериевого ферритов гранатов // Труды XXIV Международного симпозиума (Нижний Новгород, 10–13 марта 2020 г.) В 2 т. Том 1. —

Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского госуниверситета, 2020. — С.156-157.

### **Статьи в реферируемых журналах**

1. Aplesnin S.S., Masyugin A.N., Sitnicov M.N., Rybina U.I., Ishibashi T. Colossal magnetostriction and electrostriction of bismuth-substituted neodymium iron garnet films//Journal of Magnetism and Magnetic Materials. — 2018, Vol. 464. — P. 44-49.
2. Аплеснин С.С., Масюгин А.Н., Ситников М.Н., Ишибashi Т. Влияние подложки на магнитоэлектрический эффект пленок висмутового феррита граната с редкоземельным замещением//Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. — 2019, Т. 110, № 3-4 (8). — С. 204-212.
3. Masyugin A.N., Aplesnin S.S., Loginov Y.Y., Bandurina O.N. Magnetoelectric effect in bismuth - neodymium ferrite - garnet films//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2020, Vol. 822. — Р. 012025.
4. Аплеснин С. С., Масюгин А.Н., Ситников М.Н., Кецко В.А., Смирнова М.Н., Янушкевич К.И. Магнитоэлектрический эффект в пленках  $\text{Ce}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  // Письма в ЖЭТФ. — том 112, вып. 10. — С. 680 – 685.
5. Aplesnin S. S., Masyugin A. N., Volochaev M. N., Ishibashi T. Coexistence of the Electric Polarization and Conductive Current in the Bismuth–Neodymium Ferrite Garnet Films // J. Mat. Sci: Mater Eletron. - 2021, V 32. – Р. 1946-1962.

### **Список литературы**

1. Park J.-H. et al. Magneto-optic spatial light modulators driven by an electric field // Journal of Applied Physics. American Institute of Physics. — 2003. Vol. 93, № 10. — P. 8525–8527.
2. Chung K.H. et al. Fabrication and characteristics of one-dimensional magnetophotonic crystals for magneto-optic spatial light phase modulators // Journal of Applied Physics. American Institute of Physics. — 2010. Vol. 107, № 9. — P. 09A930.
3. Logginov A.S. et al. Magnetoelectric control of domain walls in a ferrite garnet film // Jetp Lett. — 2007. Vol. 86, № 2. — P. 115–118.
4. Pyatakov A.P. et al. Magnetically switched electric polarity of domain walls in iron garnet films // EPL. IOP Publishing. — 2011. Vol. 93, № 1. — P. 17001.
5. Звездин А.К., Пятаков А.П. Неоднородное магнитоэлектрическое взаимодействие в мультиферроиках и вызванные им новые физические

- эффекты // Успехи физических наук. — 2009. Т. 179, № 8. — С. 897–904.
- 6. Mostovoy M. Ferroelectricity in Spiral Magnets // Phys. Rev. Lett. American Physical Society. — 2006. Vol. 96, № 6. — P. 067601.
  - 7. O'Dell T.H. An induced magneto-electric effect in yttrium iron garnet // The Philosophical Magazine: A Journal of Theoretical Experimental and Applied Physics. Taylor & Francis. — 1967. Vol. 16, № 141. — P. 487–494.
  - 8. Ishibashi T. et al. Characterization of epitaxial  $(Y,Bi)_3(Fe,Ga)_5O_{12}$  thin films grown by metal-organic decomposition method // Journal of Applied Physics. American Institute of Physics. — 2004. Vol. 97, № 1. — P. 013516.
  - 9. Yoshida T. et al.  $Nd_{3-x}Bi_xFe_4GaO_{12}$  ( $x = 2, 2.5$ ) films on glass substrates prepared by MOD method // EPJ Web of Conferences. EDP Sciences. — 2014. Vol. 75. — P. 05009.
  - 10. Brink J. van den, Khomskii D.I. Multiferroicity due to charge ordering // J. Phys.: Condens. Matter. IOP Publishing. — 2008. Vol. 20, № 43. — P. 434217.
  - 11. Sergienko I.A., Dagotto E. Role of the Dzyaloshinskii-Moriya interaction in multiferroic perovskites // Phys. Rev. B. American Physical Society. — 2006. Vol. 73, № 9. — P. 094434.
  - 12. Scaramucci A. et al. Linear Magnetoelectric Effect by Orbital Magnetism // Phys. Rev. Lett. American Physical Society. — 2012. Vol. 109, № 19. — P. 197203.
  - 13. Wittekoek S. et al. Magneto-optic spectra and the dielectric tensor elements of bismuth-substituted iron garnets at photon energies between 2.2–5.2 eV // Phys. Rev. B. American Physical Society. — 1975. — Vol. 12, № 7. — P. 2777–2788.
  - 14. Hosoe Y. et al. NMR Study of Bismuth-Substituted Yttrium Iron Garnets // J. Phys. Soc. Jpn. The Physical Society of Japan. — 1986. — Vol. 55, № 3. — P. 731–734.
  - 15. Белов К.П. et al. Гигантская магнитострикция // Успехи физических наук. — 1983. — Vol. 140, № 6. — P. 271–313.
  - 16. Wemple S.H. et al. Optical properties of epitaxial iron garnet thin films // Phys. Rev. B. American Physical Society. — 1974. Vol. 9, № 5. — P. 2134–2144.
  - 17. Nipan G.D., Stognij A.I., Ketsko V.A. Oxide ferromagnetic semiconductors: coatings and films // Russ. Chem. Rev. — 2012. Vol. 81, № 5. — P. 458–475.
  - 18. Lage E. et al. Temperature-dependent Faraday rotation and magnetization reorientation in cerium-substituted yttrium iron garnet thin films // APL Materials. American Institute of Physics. — 2017. Vol. 5, № 3. — P. 036104.

19. Popov A.I., Plokhov D.I., Zvezdin A.K. Symmetry and magnetoelectric effects in garnet crystals and films//Physical Review B. – 2014. Т. 90, N 21. – С. 214427.