



На правах рукописи

Мамин Ринат Файзрахманович

**ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ И
ОБРАЗОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СОСТОЯНИЙ
В СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ
ПОЛУПРОВОДНИКАХ**

01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико–математических наук

КАЗАНЬ – 2012 г.

Работа выполнена в лаборатории физики перспективных материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Казанский физико–технический институт им. Е. К. Завойского КазНЦ РАН.

Официальные оппоненты: Сигов Александр Сергеевич
доктор физико–математических наук,
академик РАН, МГТУ МИРЭА,
ректор

Зиненко Виктор Иванович
доктор физико–математических наук,
профессор, ИФ СО РАН,
главный научный сотрудник

Малкин Борис Залманович
доктор физико–математических наук,
профессор, ИФ КазФУ,
профессор

Ведущая организация: Федеральное государственное
бюджетное учреждения науки
Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН (г. Москва)

Защита диссертации состоится “ 25 ” апреля 2013 г. в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.15 при Казанском (Приволжском) федеральном университете по адресу: 420008, г.Казань, Кремлевская, 16а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке имени Н.И. Лобачевского Казанского (Приволжского) федерального университета

Автореферат разослан “ ____ ” _____ 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.–мат. наук, профессор

Еремин М.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Работа посвящена исследованию особенностей фазовых переходов и процессов образования пространственно неоднородных состояний в сегнетоэлектриках и магнетиках с полупроводниковыми свойствами. Изучены явления, которые возникают в результате взаимодействия подсистемы, в которой происходит фазовый переход, и электронной подсистемы. Сложность этих систем связана со следующими обстоятельствами: наличие нелинейностей вблизи фазовых переходов; наличие двух сильно взаимодействующих подсистем - электронной системы полупроводника и подсистемы, в которой происходит фазовый переход. При фазовом переходе в такой системе могут образовываться неоднородные состояния, которые обусловлены не свойствами отдельной подсистемы, а являются результатом взаимодействия подсистем. Актуальность этой темы связана с неослабевающим интересом к изучению фазовых переходов в таких сложных системах и с возрастающей практической значимостью исследования пространственно неоднородных состояний.

Пространственно неоднородные среды являются актуальным объектом исследований в связи с тем, что их изучение позволяет найти материалы с новыми полезными свойствами. Часто такие среды получают путем конструирования объектов со сложной внутренней геометрией во время роста образцов либо при последующем локальном внешнем воздействии. В процессе роста удается получить образцы, в которых в матрице одного соединения находятся мелкие вкрапления другого, либо образцы представляют собой слоистые структуры с чередованием слоев соединений со всевозможными свойствами. Несомненный прогресс достигнут в этом направлении в последние годы. Такие объекты представляют собой перспективную элементную базу для разработки приемников и преобразователей для новейших систем детекторов и преобразователей излучения. Например, периодические структуры в диэлектриках широко используются для изменения длины волны лазерного излучения. Для этих целей часто применяют периодическую доменную структуру, создаваемую локальным

приложением электрического поля. Неоднородные состояния в магнитных средах приводят к неординарным магнитоэлектрическим явлениям, таким как магнитосопротивление и магнитоёмкостной эффект. Магнитоэлектрические свойства часто получают за счет магнитострикционного эффекта путем искусственного создания периодической структуры с чередованием магнитной и немагнитной фаз. Всё это примеры искусственного создания неоднородных состояний.

Но существует и другой путь создания “полезных” неоднородных состояний, когда они возникают скоррелированным образом за счет внутренних взаимодействий, существующих в системе. Этот путь заманчив тем, что хорошо выверенная периодичность в системе достигается за счет внутреннего самосогласования. Было замечено, что такие скоррелированные состояния возникают в сложных системах в условиях сильного взаимодействия различных подсистем. Подобная ситуация появляется вблизи фазового перехода, когда подсистема, испытывающая фазовый переход, становится мягкой, и малые, внешние по отношению к этой подсистеме, воздействия могут сильно изменить состояние этой подсистемы. В этих условиях перераспределение зарядов в электронной подсистеме может сильно влиять на поведение параметра порядка. Образование неоднородных состояний вблизи фазовых переходов за счет взаимодействия параметра порядка с носителями заряда электронной подсистемы является одной из тем, исследованных в настоящей диссертации.

К исследованию сложных систем, состоящих из нескольких подсистем, проявляется неизменный интерес в различных областях науки. С одной стороны, это связано с пониманием того, что системы, состоящие из двух и более подсистем, могут проявлять качественно новые свойства, несвойственные ни одной из подсистем. С другой стороны, сложные системы проявляют качественно сходные мотивы поведения во всем разнообразии возникающих новых качеств. Примером сложной системы являются сегнетоэлектрики-полупроводники [1, 2], в которых проявляются новые свойства, связанные с взаимодействием электронной и решеточной подсистем. Похожее скоррелированное поведение также наблюдается в магне-

тиках с полупроводниковыми свойствами [3, 4].

В сегнетоэлектриках-полупроводниках уже наблюдались примеры скоррелированного поведения в виде динамических режимов - это колебания границы раздела между фазами в иодате сурьмы (SbSI) [5], автоколебания параметра порядка в прустите (Ag_3AsS_3) [6]. Модель, описывающая динамику сегнетоэлектриков-полупроводников, была разработана в предыдущих работах [7, A1], и на ее основе исследовано возникновение ряда динамических режимов в однородном случае. Но по-прежнему актуальной оставалась проблема возникновения стационарных и динамических пространственно неоднородных состояний вблизи различных структурных фазовых переходов.

Пространственно неоднородные гетерофазные состояния со строгой периодичностью могут быть основой для создания доменной структуры с тем же периодом при охлаждении системы в низкотемпературную фазу. Кроме того, возникновение пространственно неоднородных локализованных образований и их динамика при локальном освещении могут быть использованы при самофокусировке света и при создании саморегулирующихся пульсирующих источников света. При создании пространственно неоднородных и динамических состояний возникают проблемы получения метастабильных состояний, которые имеют свои особенности в системе с полупроводниковыми свойствами. Особенно это становится важно в той области температур, где свойства полупроводниковой системы существенно меняются. Нахождение таких областей и исследование влияния изменения характеристик полупроводниковой системы на свойства фазового перехода являются важными аспектами современных исследований.

Особый интерес на протяжении долгого времени проявляется к исследованию кристаллов, в которых возникают несоизмеримые фазы. Несоизмеримая фаза представляет собой периодическую структуру, период которой не кратен периоду основной структуры. Она возникает в некоторой температурной окрестности фазового перехода в соизмеримую фазу. Так как несоизмеримая фаза – существенно неоднородная система, в ней наблюдаются различные нелинейные эффекты. Были получены данные

о несоразмерной фазе в полупроводниках, таких как $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ и Ag_3AsS_3 , с шириной запрещенной зоны $E_g \simeq 1.8 - 2.4$ эВ [8–10]. В области существования несоразмерной фазы проявляется зависимость состояния системы от режима изменения температуры [11]. В работе [8] было экспериментально исследовано влияние освещения на несоразмерную фазу. Поэтому было важно рассмотреть влияние динамики электронной подсистемы на поведение параметров динамических свойств несоразмерной фазы, таких как эффекты памяти и глобальный динамический гистерезис.

Также существует неизменный интерес к работам по исследованию релаксационных характеристик размытых фазовых переходов. Они нашли широкое применение в современных сонарах, и это стало новым толчком для их углубленного исследования. Многочисленные экспериментальные данные показывают, что свойства низкотемпературной фазы зависят от предыстории образцов, таким образом, в низкотемпературной фазе проявляется неэргодическое поведение. Природа низкотемпературной фазы остается недостаточно ясной до сих пор. Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что низкотемпературная фаза представляет собой совокупность нескоррелированных между собой областей сегнетоэлектрической фазы. При приложении электрического поля в низкотемпературной фазе наблюдается переход в состояние с однородной поляризацией. Исследование возникновения неоднородных состояний в системах с размытым фазовым переходом является одной из актуальнейших задач современной физики твердого тела.

Отметим, что фотостимулированные явления наблюдаются вблизи различных фазовых переходов в полупроводниках, в том числе в магнитных полупроводниках [3, 4]. В этих веществах наблюдается изменение ширины запрещенной зоны при появлении в системе магнитного порядка, а также сдвиг температуры фазового перехода за счет возникновения неравновесной заселенности ловушек при внешнем освещении. В магнитных полупроводниках параметры этих изменений аналогичны тому, что мы наблюдаем в сегнетоэлектриках-полупроводниках, только они соответствуют проти-

воположному знаку коэффициента взаимодействия параметра порядка с электронной подсистемой. В целях выявления наиболее общих особенностей поведения различных систем, рассмотрение всех вопросов в диссертации проведено на основе достаточно общих предположений, и поэтому результаты работы применимы для различных фазовых переходов в полупроводниках.

Однако помимо этого в магнитных полупроводниках может возникать принципиально иная ситуация, когда уровень легирования, изменяющий концентрацию носителей заряда, достаточно велик. В этом случае возможно возникновение неоднородного состояния за счет зарядовых неоднородностей и фазового расслоения. Идея о фазовом расслоении была впервые предложена Э.Л. Нагаевым в работе [12]. В дальнейшем она была развита применительно к манганитам [13–15]. При этом основное внимание уделялось описанию колоссального магнитосопротивления в сильно легированных проводящих образцах, которое объяснялось влиянием магнитного поля на зарядово-неоднородное состояние, находящееся в условиях перколяции заряженных областей. Однако осталась неисследованной возможность новых неординарных магнитоэлектрических явлений в случае более слабого легирования, когда перколяции между зарядовыми неоднородностями не возникает. Теоретическое и экспериментальное исследование возможности магнитоэлектрических эффектов в относительно слабо легированных манганитах является одной из целей данной работы.

Все вышеизложенное указывает на **актуальность** темы диссертации, которая посвящена исследованию процессов возникновения пространственно неоднородных состояний вблизи фазовых переходов в различных системах с полупроводниковыми свойствами.

В настоящей диссертации теоретически исследованы процессы возникновения неоднородных состояний и динамических явлений вблизи фотостимулированных фазовых переходов для случая распределенных систем и фазовых переходов, протекающих в неравновесных условиях. Результаты экспериментальных исследований, инициированных автором диссертации, оказались в согласии с положениями и выводами теории. При анализе

неоднородных состояний и динамических режимов применялся феноменологический подход, основанный на теории, предложенной для сегнетоэлектриков В.Л. Гинзбургом [16], и использовались методы теории нелинейных колебаний, применение которых к физическим объектам было начато с работ Л.М.Мандельштама [17].

Исследования проведены для двух принципиальных случаев:

- 1) рассмотрены явления в системах с относительно малым числом примесей, когда перераспределение зарядов на собственных дефектах приводит к самоорганизации в пространстве с характерными размерами микронного и субмикронного диапазона;
- 2) изучено возникновение скоррелированных состояний в системе с высоким уровнем легирования в которых характерный размер возникающих структур имеет порядок нескольких нанометров.

Настоящая работа является частью комплексных исследований, проводимых в КФТИ КазНЦ РАН по теме “Исследование сверхпроводимости, магнетизма и фазовых переходов в материалах с сильными электронными корреляциями”(рег. номер 01.2.007.07599) и исследований, выполненных в рамках проектов РФФИ.

Целью данной работы явилось раскрытие физической природы и установление закономерностей процессов возникновения пространственно неоднородных состояний и динамических режимов, связанных с перестройкой электронной системы вблизи фазовых переходов.

В соответствии с целью **сформулированы следующие задачи:**

1. Изучить закономерности возникновения неоднородных гетерофазных структур при фазовом переходе в системах с полупроводниковыми свойствами в условиях интенсивного освещения и влияние света на параметры размытого фазового перехода.
2. Исследовать взаимосвязь эффектов памяти и глобального гистерезиса в температурной области существования несоразмерной фазы с перестройкой электронной подсистемы и сопоставить аномалии физических величин и временные характеристики памяти с параметрами полупроводниковой подсистемы.

3. Выяснить взаимосвязь феноменологической модели фазовых переходов в полупроводниках с теорией фазовых переходов в системах с дефектами и исследовать процессы, приводящие к появлению размытых фазовых переходов и к задержке либо опережению фазового перехода во времени.

4. Исследовать возникновение локализованных зарядовых неоднородностей и фазового расслоения в сильно легированных системах, установить возможности появления новых физических свойств при переходе в такое неоднородное состояние.

В качестве объектов исследования для проведения оценок и сравнения с экспериментальными данными, а также для проверки результатов теории на эксперименте, были рассмотрены системы сегнетоэлектриков–полупроводников: Ag_3AsS_3 , $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$; системы с размытыми фазовыми переходами: кристаллы магнониобата свинца $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ (PMN) и кристаллы германата-силиката свинца $\text{Pb}_5(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_3\text{O}_{11}$; сильно легированные магнитные полупроводники: кристаллы лантан-стронциевых манганитов: $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ ($x = 0.1, 0.11, 0.125$).

Основной причиной, обусловившей такой выбор, явилось то, что все эти соединения хорошо изучены и являются модельными объектами для исследований фазовых переходов, характерных для каждой из этих систем.

Научная новизна. В работе впервые:

- получено описание бегущих и стационарных автосолитонных состояний и периодической гетерофазной структуры вблизи фазовых переходов первого рода в условиях интенсивного освещения;

- показано возникновение размытого фазового перехода и дисперсии восприимчивости на низких частотах за счет влияния переполаризующихся дефектов с изменяющимися свойствами на свойства фазовых переходов;

- установлено, что возникновение новых взаимосвязанных состояний при увеличении уровня легирования может привести к изменению наблюдаемой энергии активации и к высокой прыжковой проводимости;

- установлены закономерности влияния изменения концентрации но-

сителей заряда на уровнях прилипания при изменении температуры на динамику и последовательность фазовых переходов;

- определена взаимосвязь эффектов памяти или глобального гистерезиса в области несоразмерной фазы с образованием структуры неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания и с изменением этой структуры при изменении температуры;

- предложен подход к описанию поведения сильно размытых фазовых переходов в рамках феноменологической теории фазовых переходов в системе с дефектами;

- установлено, что основные причины размытия фазовых переходов в твердых растворах германата-силиката свинца $Pb_5(Ge_{1-x}Si_x)_3O_{11}$ связаны с тем, что температура фазового перехода оказывается в температурной области термолокализации зарядов;

- обнаружено изменение значения диэлектрической проницаемости под воздействием интенсивного освещения в монокристаллах магнониобата свинца $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN);

- предложена модель для описания времени задержки фазового перехода в однородное поляризованное состояние в низкотемпературной фазе релаксоров, которая связывает этот процесс с процессами делокализации носителей заряда в сильном электрическом поле;

- показано, что локализованные зарядовые неоднородности и фазовое расслоение могут быть описаны в рамках феноменологической теории фазовых переходов, и при их возникновении повышение энергии за счет кулоновского взаимодействия оказывается относительно небольшим вследствие сильного экранирования и малой плотности дополнительного заряда в области неоднородностей;

- обнаружено и исследовано появление чрезвычайно высоких значений диэлектрической проницаемости до 10^7 и коэффициента магнитоёмкостного эффекта до 10^5 % в монокристаллах лантан-стронциевых манганитов $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ ($x = 0.1, 0.11, 0.125$).

Положения, выносимые на защиту.

1. Теория возникновения бегущих и стационарных автосолитонных со-

стояний и периодической гетерофазной структуры вблизи фазовых переходов первого рода в условиях интенсивного освещения, возникающих в результате скоррелированной пространственной самоорганизации параметра порядка и концентрации электронов в ловушках.

2. Результаты теоретического анализа динамики фазового перехода при изменении концентрации носителей заряда на ловушках с изменением температуры, из которых следует возникновение нетривиальных последовательностей фазовых переходов, либо возникновение особенностей в поведении обобщенной восприимчивости в области термолокализации электронов на ловушках, а также возникновение опережающего фазового перехода по температуре при быстром изменении температуры.

3. Механизм эффектов памяти и глобального гистерезиса в области несоразмерной фазы в системе с локализованными зарядами, обусловленный образованием пространственно-неоднородной концентрации электронов на ловушках и динамики этой пространственной структуры при изменении температуры.

4. Феноменологическая теория возникновения размытого фазового перехода в системе с дефектами, свойства которых изменяются с температурой, согласно которой возникновение низкочастотной дисперсии диэлектрических свойств объясняется связью релаксации параметра порядка с процессами термоактивации с уровней прилипания, имеющих широкое распределение по энергиям.

5. Объяснение появления размытого фазового перехода в системе твердых растворов германата-силиката свинца, $Pb_5(Ge_{1-x}Si_x)_3O_{11}$, основанное на перекрывании области температуры фазового перехода с температурной областью термолокализации зарядов.

6. Обнаружение изменения диэлектрической проницаемости под воздействием света в монокристаллах магнониобата свинца, $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$, указывающее на связь этого явления с процессами заполнения электронами уровней прилипания.

7. Модель, описывающая задержку фазового перехода в однородное поляризованное состояние в зависимости от температуры и величины внеш-

него электрического поля в низкотемпературной фазе релаксоров, которая связывает это явление с медленными процессами делокализации носителей заряда во внешнем электрическом поле.

8. Феноменологическая теория возникновения зарядовых неоднородностей и фазового расслоения с последовательным учетом дальнедействующего кулоновского взаимодействия, указывающая на то, что кулоновское взаимодействие играет доминирующую роль в определении структуры и размеров возникающих неоднородностей, но при этом повышение энергии за счет кулоновского взаимодействия оказывается относительно небольшим вследствие сильного экранирования и малой плотности дополнительного заряда в области неоднородностей.

9. Прогнозирование больших значений эффективной диэлектрической проницаемости и коэффициента магнитоёмкостного эффекта при возникновении зарядовых неоднородностей и фазового расслоения в режиме, когда перколяции между заряженными областями не происходит, и обнаружение высоких значений диэлектрической проницаемости до 10^7 и коэффициента магнитоёмкостного эффекта до 10^5 % в полупроводниковых монокристаллах лантан-стронциевых манганитов $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ при $x = 0.1, 0.11, 0.125$.

Научная и практическая значимость.

Полученные в работе результаты расширяют имеющиеся представления о механизмах возникновения неоднородных состояний вблизи фазовых переходов в системах с полупроводниковыми свойствами.

Установленные в работе общие соотношения, связывающие характеристики неоднородных состояний с параметрами взаимодействия системы, в которой происходит фазовый переход, и электронной системы полупроводника, позволяют вести направленный поиск описанных явлений в широком круге систем с различными фазовыми переходами.

Раскрыт механизм возникновения эффектов памяти и глобального гистерезиса в несоразмерной фазе в системе с полупроводниковыми свойствами.

Установленные в работе физические закономерности дают возмож-

ность предсказать размытие сегнетоэлектрического перехода, что позволяет осуществлять целенаправленный поиск диэлектрических материалов, обладающих высокой диэлектрической проницаемостью, пригодных для использования в диэлектрических усилителях, сонарах и других устройствах электронной техники.

Предсказание магнитоэлектрических свойств, возникающих вследствие появления зарядовых неоднородностей при фазовом расслоении, и обнаружение новых необычных свойств в манганитах может стать основой для поиска новых материалов с магнитоэлектрическими свойствами.

Найденные в работе физические механизмы и закономерности будут полезны для лабораторий и научных центров, занимающихся исследованием возникновения неоднородных состояний в конденсированных средах.

Достоверность результатов подтверждается: непротиворечивостью и достаточностью исходных положений; использованием проверенных методов анализа и методов получения решений нелинейных уравнений; результатами проведенных оценок; экспериментальной проверкой ряда положений и выводов теории путем проведения экспериментов на модельных объектах; повторяемостью экспериментальных результатов.

Апробация работы. Основные результаты работы были доложены и обсуждены на конференциях и семинарах различного уровня: XII Всесоюзная и XIII, XIV, XVI, XVII, XVIII и XIX Всероссийские конференции по физике сегнетоэлектриков (Ростов-на-Дону 1989 г., Тверь, 1992 г., Иваново 1995 г., Тверь, 2002 г., Пенза, 2005 г., Санкт-Петербург, 2008 г., Москва, 2011 г.), V Всесоюзная школа-семинар по физике сегнетоэластиков (Ужгород, 1991 г.), Международный семинар по физике сегнетоэлектриков-полупроводников (Ростов-на-Дону, 1993 г.), 8th, 11th, 12th European Meeting on Ferroelectricity, (Nijmegen, Netherlands, 1995; Bled, Slovenia, 2007; Bordeaux, France, 2011) 9th, 10th International Meeting on Ferroelectricity (Seoul, Korea, 1997; Madrid, Spain, 2001), 3rd, 6th European Conference on Applications of Polar Dielectrics, (Bled, Slovenia, 1996; Aveiro Portugal, 2002), 7th International conference on electric ceramics and their applications (Portoroz, Slovenia, 2000), I и III Меж-

дународные семинары по физике релаксорных сегнетоэлектриков (Дубна, 1996, 2000 гг.), 5th Russian-Japanese symposium on ferroelectricity (Moscow, Russia, 1994), 7th, 8th Russia/CIS/Baltic/Japan Symposium on Ferroelectricity (St Petersburg, Russia, 2002, Tsuruba, Japan, 2004). Workshop on Fundamental Physics of Ferroelectrics 2004, 2005 (Williamsburg, USA, 2004, 2005). I, IV и V Международные семинары по физике сегнетоэластиков (Воронеж, 1994, 2003 и 2006 гг.) 3rd international symposium on domain structure of ferroelastics and related materials (Zakopane, Poland, 1994), Ukrainian-Polish and East-evropean workshop on ferroelectricity and phase transitions (Uzgorod-V.Remety, Ukraine, 1994), Symposium on Ferroic Domains and Mesoscopic Structures (Vienna, Austria, 1996), The International Conference on Theoretical Physics (Paris, France, 2002), 20th, 21st, 22st Seminar of the Middle European Cooperation in Statistical Physics (Wels, Austria, 1995; Bled, Slovenia, 1996; Szklarska Poreba, Poland, 1997), Aperiodic 2000 Conference (Nijmegen, Netherlands, 2000), International conference on science and technology of synthetic metals (Gastein, Austria, 2000), Nanores-2004 (Kazan, Russia, 2004), Международная научно-практическая конференция "Фундаментальные проблемы пьезоэлектрического приборостроения" (Москва, 2003).

Публикации. Основные материалы диссертации опубликованы в 38 статьях в центральной российской и международной печати, а также в материалах и тезисах вышеперечисленных конференций.

Личный вклад автора. Все основные теоретические результаты, представленные в диссертации, получены лично автором. В теоретической работе по исследованию зарядовых неоднородностей и фазового расслоения Т.С. Шапошниковой принадлежит участие в проведении компьютерного моделирования, В.В. Кабанов написал программу для компьютерного моделирования и провел фурье анализ для свободной энергии, а автор настоящей диссертации провел анализ свободной энергии для описания поведения системы и получения фазовой диаграммы и сделал оценки для отдельных вкладов в полную энергию неоднородного состояния, а также участвовал в проведении компьютерного моделирования. Постановка

этой задачи, анализ и интерпретация результатов была проведена совместно автором диссертации и В.В. Кабановым в рамках совместного проекта российско–словенского сотрудничества.

Экспериментальные результаты, связанные с системами твердых растворов на основе германата-силиката свинца, $Pb_5(Ge_{1-x}Si_x)_3O_{11}$, были получены в группе А.А. Буша, и автор диссертации участвовал только в анализе полученных зависимостей диэлектрических свойств и проводимости от уровня концентрации кремния, выработке соответствующих выводов и последующем написании статьи по этой теме. Все остальные экспериментальные результаты, вошедшие в диссертацию, которые были выполнены в кооперации с экспериментальными группами А.А. Бухараева, С.И. Никитина, Т. Игами, С.А. Мигачева, получены при непосредственном участии автора диссертации в качестве руководителя, формирующего идею и план экспериментальных исследований при выполнении соответствующего гранта РФФИ, и в качестве исследователя, который анализировал и обобщал полученные результаты и формулировал окончательные выводы. Следует отметить, что руководителем проведения экспериментов по исследованию оптических свойств в магнониобате свинца $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ в Казанском (Приволжском) федеральном университете был С.И. Никитин.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. В конце глав даны краткие выводы по материалам данной главы.

Работа изложена на 250 страницах текста, включая 54 рисунка и библиографию из 211 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность темы, дан краткий обзор современного состояния проблемы, определена цель исследований, поставлены задачи работы. Показана научная новизна и практическая значимость результатов. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту. Приведены сведения об апробации работы, публикациях по теме диссертации, личном вкладе автора, струк-

туре и объеме работы.

В первой главе представлена модель для сегнетоэлектриков-полупроводников вблизи фазовых переходов, введены основные уравнения и описаны методы построения решения для описания неоднородных состояний в рамках этой модели. На основании методики [1] учтен вклад электронной системы в термодинамический потенциал, описывающий поведение параметра порядка. В результате мы приходим к перенормировке температуры фазового перехода T_{cm} за счет взаимодействия параметра порядка с электронной подсистемой:

$$T_{cm} = T_c - \frac{am}{\alpha'} \quad (1)$$

Были получены связанные уравнения для параметра η и числа электронов на уровнях прилипания m ($J = \gamma_n n_o$ или $J \equiv \gamma_n \beta_0 k I \tau_n$)

$$\frac{d\eta}{dt} = -\Gamma[(\alpha'(T - T_0) + am)\eta + \beta\eta^3 + \gamma\eta^5 - \xi \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2}], \quad (2)$$

$$\frac{dm}{dt} = J(M - m) - m\gamma_n N_c \exp\left(-\frac{u_0 + \tilde{a}\eta^2}{kT}\right) + D \frac{\partial^2 m}{\partial x^2}, \quad (3)$$

которые отражают как изменения термодинамического потенциала за счет захвата электронов ловушками, а, именно, сдвиг точки Кюри (1), так и уменьшение теплового заброса за счет появления поляризации. Здесь Γ – кинетический коэффициент параметра порядка, $\alpha, \beta, \gamma, \xi$ – коэффициенты в разложении Ландау-Гинзбурга-Девоншира термодинамического потенциала по параметру порядка η : n_0 – равновесное число электронов проводимости, β_0 – квантовый выход, I и k – соответственно, интенсивность освещения и коэффициент поглощения света, N_c – плотность состояний в зоне проводимости, γ_n – кинетический коэффициент электронной системы, D – коэффициент диффузии для электронов на уровнях прилипания. Таким образом, полученные уравнения (2)–(3) описывают следующие процессы: при изменении числа электронов на уровнях прилипания изменяется температура фазового перехода и, соответственно, изменяется коэффициент в уравнении при линейном по параметру порядка члене; с другой стороны, при изменении параметра порядка изменяется величина запрещенной зоны от дна зоны проводимости до уровней прилипания, и,

соответственно, изменяется вероятность термозаброса, что отражается в уравнениях динамики для числа электронов на уровнях прилипания.

Далее рассмотрено возникновение всевозможных неоднородных гетерофазных структур при фазовом переходе в системах с полупроводниковыми свойствами в условиях интенсивного освещения. Показано, что возможно возникновение локализованных неоднородных состояний - автосолионов [18], а также неоднородных состояний во всем объеме с периодическим чередованием фаз. Автосолионы могут возникнуть тогда, когда в условиях освещения единственное стационарное состояние системы становится метастабильным. Описаны различные бегущие и стационарные автосолионные состояния.

Бегущий автосолион образуется следующим образом: в некоторой точке образца, например, на его границе, в результате внешнего воздействия или флуктуации образуется область противоположной фазы, которая начинает распространяться, так как состояние по параметру порядка является метастабильным. В области вновь образовавшейся фазы начинает изменяться концентрация электронов в ловушках, причем вглубь от фронта движущейся доменной стенки это изменение нарастает до того момента, когда вновь образовавшаяся фаза становится неустойчивой при данном значении концентрации электронов в ловушках. В результате система срывается в первоначальную фазу, и формируется задний фронт домена в виде движущейся доменной стенки. В начальный момент времени задняя доменная стенка движется с большей скоростью, чем передняя доменная стенка. Но в процессе постепенно скорость ее уменьшается до скорости передней и формируется стабильный автосолион, движущийся с постоянной скоростью. За задним фронтом домена образуется хвост автосолиона в процессе релаксации концентрации электронов в ловушках к стационарному значению и связанному с ним изменению параметра порядка в случае метастабильной сегнетофазы.

Статический автосолион может образоваться, когда в результате внешнего воздействия или флуктуации на дефектах образуется область другой фазы и связанная с ним неоднородность концентрации электронов

в ловушках. Если в пространстве состояний системы данное состояние находится в области притяжения автосолиitonного состояния, то система релаксирует в состояние со статическим автосолиitonом. Устойчивый статический автосолиiton имеет определенные размеры и распределение в пространстве параметра порядка и концентрации электронов на уровнях прилипания, которые определяются прежде всего диффузионными процессами в электронной подсистеме.

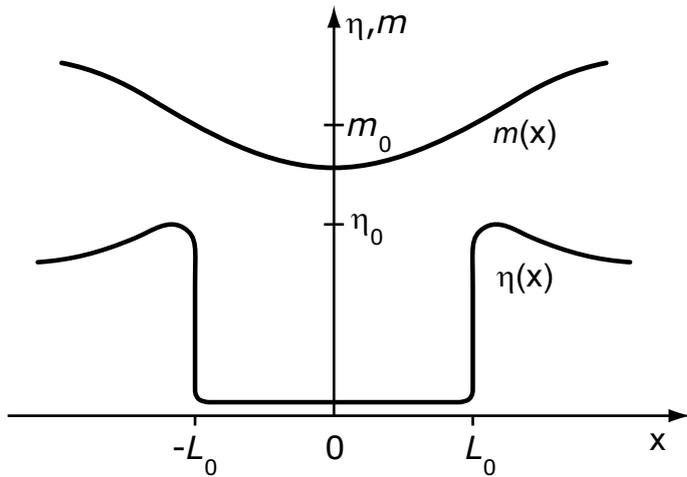


Рис. 1. Распределение параметра порядка η и концентрации электронов на уровнях прилипания m в стационарном автосолиитоне с доменом параэлектрической фазы в метастабильной сегнетоэлектрической фазе.

В области быстрого (резкого) изменения параметра порядка в доменной стенке при постоянной концентрации электронов на уровне прилипания m_0 существует точное решение для пространственного распределения параметра порядка $\eta(x)$. Значения $m(x)$ на участке медленных движений находятся из уравнений диффузии в поле потенциалов, возникающих за счет взаимодействия электронной системы с параметром порядка. Вдали от автосолиитона значения

параметров системы выходят на однородное стационарное состояние η_s , m_s , определяемое как стационарное решение уравнений (2)-(3), описывающих систему. На рисунке 1 показано распределение параметра порядка η и концентрации электронов в ловушках m в автосолиитоне для случая автосолиитона сегнетоэлектрической фазы в парафазе.

Также рассмотрены периодическая гетерофазная структура с чередованием параэлектрической и сегнетоэлектрической фаз, образующихся за счет перераспределения электронов на уровнях прилипания. Задача решена для одномерного случая. Возникновение такого поведения связано

с динамикой сегнетоэлектрика-полупроводника как целого и является примером синергетического поведения.

Во второй главе вначале рассматривается процесс постепенного заполнения примесных уровней при понижении температуры. На примере алмаза, легированного бором, показано, что при увеличении уровня легирования возникают новые связанные состояния примесных атомов. При низких температурах механизмы проводимости связаны с процессами термоактивации дырок с мелких уровней и с прыжковым механизмом проводимости. Показано, что прыжковая проводимость осуществляется по уровням связанных состояний бора, число которых возрастает нелинейным образом при повышении уровня легирования. Вероятность прыжков возрастает в связи с тем, что уровни возбужденных состояний бора в обычном положении находятся в том же энергетическом интервале, что и уровни связанных состояний. Это приводит к высокой прыжковой проводимости. В данном случае для нас было важно проиллюстрировать, что процессы термолокализации заряда на примесных уровнях происходят при температурах T_L , много меньших характерной температуры $T_d = U_d/k_B$ ($T_L \sim 0.05 \div 0.1 T_d$). Показано, что в области этой температуры начинается резкое увеличение концентрации электронов на уровнях прилипания.

При быстром изменении температуры, когда область изменения температур захватывает интервал температур, в котором происходит термоактивационное заполнение (опустошение) ловушек, возникают метастабильные состояния электронной подсистемы с большими временами релаксации. Если в области изменения температуры есть фотоактивный фазовый переход, то происходит сдвиг температуры фазового перехода, который определяется неравновесными электронами (либо их отсутствием) на уровнях прилипания.

Далее мы исследуем влияние температурного изменения заселенности уровней прилипания на фазовые переходы. Показано, что в результате термозаполнения ловушек может возникнуть сложная последовательность фазовых переходов. В случае фазового перехода первого рода в

некоторой области температур может возникнуть метастабильное состояние системы. Наиболее вероятно такое поведение в области выраженного фазового перехода первого рода. Кроме того, в температурной области эффективное заполнение ловушек будет характерное изменение температурного поведения обобщенной восприимчивости, которое будет выглядеть как размытый фазовый переход второго рода.

В третьей главе показано что освещение влияет на характеристики несоразмерной фазы путем изменения неравновесной концентрации электронов на уровнях прилипания. Это позволяет, при интенсивном освещении, наблюдать сильное изменение температурной области существования несоразмерной фазы и генерацию несоразмерной фазы в системах, в которых она не наблюдается без освещения. Рассмотрена экспериментальная ситуация в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$, особенностью которой является близость к трикритической точке и к точке Лифшица. Предложен подход к описанию эффектов памяти и гистерезисных явлений в несоразмерной фазе, основанный на возникновении неоднородной концентрации электронов на уровнях прилипания. Исследована взаимосвязь эффектов памяти с перестройкой электронной подсистемы, и развита теория, позволяющая определять аномалии физических величин и временные характеристики памяти из параметров электронной системы полупроводника.

Показано, что концентрацию электронов на уровнях прилипания можно менять не только световым воздействием. В некоторых случаях при быстром охлаждении полупроводников возникают метастабильные состояния с эффективно опустошенными ловушками. То есть можно говорить, что неравновесная концентрация электронов на уровнях прилипания будет отрицательной. Поэтому вполне реальна такая ситуация, когда возможно появление точки Лифшица в $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{S}_{1-x}\text{Se}_x)_6$ при $x > 0.3$ за счет опустошения ловушек.

В четвертой главе рассмотрена взаимосвязь развитой модели фазовых переходов в системе с полупроводниковыми свойствами с теорией фазовых переходов в системе с дефектами и исследованы процессы, приводящие к появлению размытых фазовых переходов. Исследовано, как

появляется размытие фазового перехода за счет локализации носителей заряда на дефектах. Теоретически исследовано влияние дефектов с изменяющимися свойствами на свойства структурных фазовых переходов. Изучено влияние переполаризующихся дефектов на диэлектрическую восприимчивость, динамику параметра порядка, и получены температурные зависимости соответствующих величин.

Далее обсуждается проявление всех этих процессов на примере трансформаций диэлектрических свойств в кристаллах $\text{Pb}_5(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)_3\text{O}_{11}$. Показано, что наблюдаемое возникновение релаксорного поведения при $x > 0.35$ и критическое поведение концентрационных зависимостей диэлектрических свойств при $x = x_1 = 0.35$ и $x = x_2 = 0.60$ связаны с динамикой локализации зарядов на дефектах с энергией активации $U_{a1} = 0.6$ эВ и $U_{a2} = 0.23$ эВ. Релаксорное поведение возникает тогда, когда точка Кюри фазового перехода оказывается в температурной области термолокализации зарядов. Особенности концентрационных зависимостей при $x = x_1$ и $x = x_2$ объясняются тем, что эффективная точка Кюри попадает в центры температурных областей локализации зарядов на дефектных уровнях U_{a1} и U_{a2} , соответственно.

И, наконец, в последнем разделе этой главы мы обсуждаем возникновение сильной частотной зависимости диэлектрических свойств на низких частотах при термолокализации носителей заряда на примесных уровнях в сильно дефектной системе. Динамика системы определяется тем, что характерные времена изменения параметра порядка η и концентрации электронов в ловушках m существенно различны ($\tau_\eta/\tau_m \ll 1$). Это позволяет исследовать нашу проблему учитывая запаздывание процессов релаксации за счет взаимодействия параметра порядка с электронной подсистемой. В результате время релаксации параметра порядка τ зависит от энергии активации электронной системы u_m и температуры следующим образом: $\tau(u) = \tau_o \exp(u/kT)$ ($u = \nu u_m$). состояний уровней прилипания, $N_{DOS}(u)$: Функцию распределения времен релаксации, $g(\tau)$, удалось выразить через плотность состояний уровней прилипания, $N_{DOS}(u)$, следуя следующей последовательности преобразова-

ний для среднего значения для величины A в результате перехода от распределения по энергиям к распределению по временам релаксации: $\bar{A} = \int_V A dV = \int_u A(\tau(u))N(u)du = \int_\tau A(\tau)g(\ln(\tau))d\ln(\tau)$. В результате получаем:

$$g(\ln(\tau)) = kTN_{DOS}(u(\tau)) = kTN_{DOS}(kT \ln(\frac{\tau}{\tau_0})) \quad (4)$$

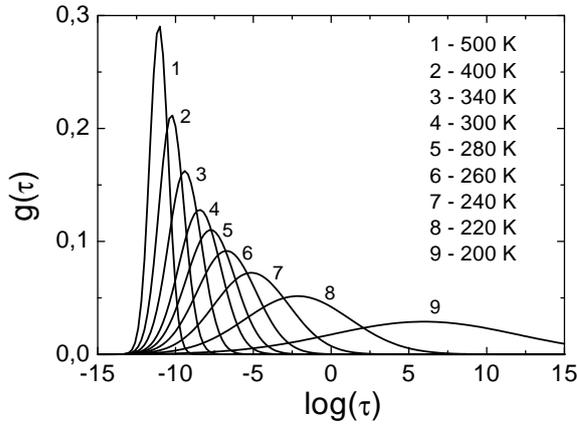


Рис. 2. Функция распределения времен релаксаций, $g(\tau)$, для различных температур.

Как видно из (5), функция распределения времен релаксации $g(\tau)$ имеет логарифмическую зависимость от τ . В результате температурная трансформация для функции распределения времен релаксации $g(\tau, T)$ (5) имеет характерный вид, представленный на рисунке 2. Линейный член по полю в уравнении (4) дает нам выражение для комплексной

диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon(\omega, T) = \varepsilon_\infty + \int \frac{\varepsilon_s(T)g(\tau)}{1 + i\tau\omega} d\ln(\tau), \quad T > T_{cm} \quad (5)$$

Здесь $\varepsilon_s(T) = 2\pi/(\alpha + at)$ - статическая диэлектрическая проницаемость. Температурная и дисперсионная зависимости действительной части диэлектрической проницаемости (6) представлены на рисунке 3.

В пятой главе рассмотрены особенности процессов локализации носителей заряда на примесных центрах. Представлены результаты экспериментальных исследований оптических и фотопроводящих свойств монокристаллов магно-ниобата свинца $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN), а также исследований влияния освещения на диэлектрические свойства этих соединений. Эти вопросы рассмотрены в начале этой главы.

На основе исследования спектральной зависимости фотопроводимости, фотостимулированных токов, возникающих в отсутствие внешнего напряжения, и фотостимулированного изменения диэлектрических свойств на монокристаллах $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$, выявлена структура плотности состояний дефектных уровней и обсуждена возможность участия этих состояний в формировании размытого фазового перехода. Показано, что путем светового воздействия на электронные свойства дефектной подсистемы можно изменять диэлектрические свойства $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$.

В последнем разделе главы рассмотрены процессы, приводящие к задержке фазового перехода в состояние с однородной поляризацией при приложении электрического поля в низкотемпературной фазе релаксоров. Показано, что в сильных электрических полях локализованные заряды активируются с локальных уровней либо путем ударной ионизации,

либо путем туннелирования через потенциальный барьер. В результате, в достаточно сильных полях, в момент делокализации заряда с дефекта исчезает закрепление направления вектора поляризации на этом дефекте. В результате постепенного осуществления такого процесса на основной массе дефектов, спонтанная поляризация через определенное время ориентируется вдоль внешнего поля по всему образцу. Это явление представляет собой своеобразный структурный фазовый переход во времени и проявляется в скачке диэлектрической проницаемости. Зависимость времени задержки фазового перехода от температуры и величины внешнего поля в достаточно сильных полях связана с процессами делокализации носителей заряда и имеет характерный вид $(t_0(E, T) \sim \exp(E_0/E) \exp(T_0/T))$.

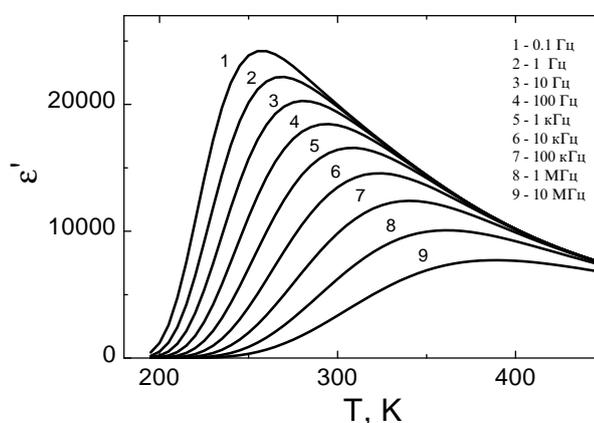


Рис. 3. Температурная зависимость действительной ϵ' части диэлектрической проницаемости $\epsilon(\omega, T)$ (5).

В шестой главе исследовано возникновение локализованных зарядовых неоднородностей и фазового расслоения в сильно легированной системе. Удалось показать, что зарядовое и фазовое расслоение является достаточно общим явлением при фазовых переходах в легированных системах. Рассмотрен случай магнитного фазового перехода в слабо легированной системе, когда перколяция более заряженных областей не имеет места.

Показано, что кулоновское взаимодействие определяет распределение заряда и размер возникающих неоднородностей. Фазовое расслоение, связанное с образованием зарядовых неоднородностей, становится возможным из-за больших значений диэлектрической проницаемости и малой плотности дополнительного заряда в области локализации. Построена фазовая диаграмма системы, и сделаны оценки выигрыша в энергии такого состояния. Показана роль кулоновского взаимодействия, и приведены соответствующие оценки.

В монокристаллах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ (LSMO – x , $x = 0.1, 0.11, 0.125$) обнаружены чрезвычайно высокие значения диэлектрической проницаемости до 10^7 и магнитоёмкостного эффекта до 10^5 %. Эти явления наблюдаются уже при комнатной температуре. Наблюдаемое поведение может быть следствием сильного взаимодействия между зарядовыми, спиновыми и решеточными степенями свободы, приводящего к зарядовому и фазовому расслоению в режиме до порога перколяции.

Температурные зависимости диэлектрической проницаемости, $\varepsilon(T)$, для LSMO-0.125 при охлаждении в нулевом внешнем магнитном поле (ZFC) представлены на рис. 4. Значение $\varepsilon(T)$ получено из измеренной емкости. ac -сопротивление образца на самых низких частотах совпадает с dc -сопротивлением и слегка увеличивается только при высоких частотах. Для случая LSMO-0.1 в режиме ZFC значение $\varepsilon(T)$ держится в области величины $5 \cdot 10^4$ ниже температуры 350 К и слабо изменяется в температурном диапазоне 80 – 250 К, но заметен значительный разброс результатов при температурах 250 – 350 К.

Для случая LSM-0.11 в режиме ZFC значение $\varepsilon(T)$ увеличивается до величины $1 \cdot 10^4$ ниже температуры 310 К и слабо изменяется в темпе-

ратурном диапазоне 150 – 310 К, но затем начинает резко увеличиваться ниже 150 К. Отметим, что максимальное значение $\varepsilon(T)$ для LSMO-0.11 соответствует особенности в температурном изменении проводимости. Для случая LSMO-0.125 в режиме ZFC значение $\varepsilon(T)$ держится в области величины $1 \cdot 10^7$ ниже температуры 275 К и слабо изменяется в температурном диапазоне 180 – 270 К, но затем начинает резко возрастать ниже 180 К, формируя резкий пик при температуре 150 К. Следует заметить, что максимум в $\varepsilon(T)$ соответствует минимуму в температурном поведении сопротивления $\rho(T)$.

Наши результаты по температурной зависимости диэлектрических и магнитных свойств показывают, что LSMO-0.1 и LSMO-0.11 имеют огромные значения диэлектрической проницаемости и магнитоёмкостного эффекта уже при комнатной температуре. А для состава LSMO-0.125 аналогичные эффекты наблюдаются ниже 270 К.

Ранее было показано, что фазово-расслоенное состояние в манганитах может

быть модифицировано оптическими методами. Так, в образцах состава $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.3}\text{MnO}_3$ фотовозбуждение, как в пике резонансного оптического поглощения, так и на частотах характерных фононных мод, инициирует переход диэлектрик–металл с возможностью стабилизации металлического состояния при пропускании электрического тока с силой тока выше определенной величины. Нами показано, что в соединении $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ интенсивное возбуждение светом с энергией фо-

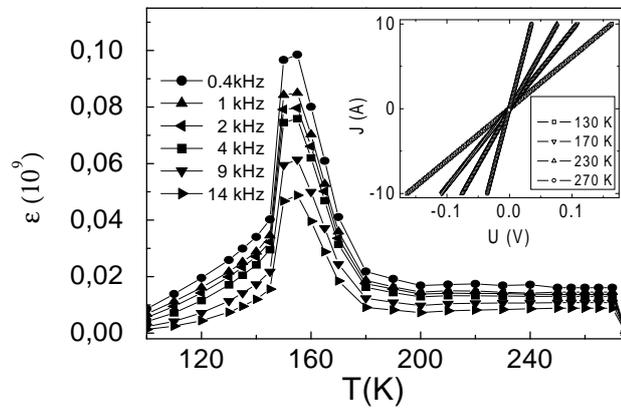


Рис. 4. Температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon(T)$ на различных частотах f в нулевом внешнем магнитном поле для LSMO-0.125 (на вставке показана вольт–амперная характеристика LSMO-0.125).

тона 1.55 эВ приводит к образованию неравновесной ферромагнитно-упорядоченной фазы, которой не существует в основном состоянии [А37]. Кроме того, нами были проведены исследования по инициированию локальных состояний в соединении $\text{La}_{0.89}\text{Sr}_{0.11}\text{MnO}_3$ при приложении внешнего электрического поля локально с помощью методов атомной силовой микроскопии [А35, А38]. При этом возникали локальные домены с зарядом на поверхности и проявляющие пьезоэлектрический отклик. Эти последние результаты [А35, А37, А38] указывают на перспективность поиска новых магнитоэлектрических свойств в материалах с зарядовыми неоднородностями и фазовым расслоением.

В заключении сформулированы следующие основные результаты и выводы диссертационной работы.

Основные результаты работы состоят в следующем:

- 1) Исследовано возникновение бегущих и стационарных автосолитонных состояний, а также периодической гетерофазной структуры вблизи фазовых переходов первого рода в условиях интенсивного освещения, возникающих в результате скоррелированной пространственной самоорганизации параметра порядка и концентрации электронов в ловушках.
- 2) Показано, что при увеличении уровня легирования возникают связанные состояния примесных атомов, которые существенным образом изменяют динамику локализации заряда на примесных уровнях. Это приводит к изменению наблюдаемой энергии активации и к высокой прыжковой проводимости.
- 3) Исследована динамика фазового перехода при изменении концентрации носителей заряда на ловушках с изменением температуры. Показано возникновение нетривиальных последовательностей фазовых переходов, либо возникновение особенностей в поведении обобщенной восприимчивости в области термолокализации электронов на ловушках.
- 4) Показано, что при быстром изменении температуры возникают ме-

тастабильные состояния электронной подсистемы. В результате, при быстром охлаждении фазовый переход происходит при более высокой температуре.

- 5) Показано, что в области несоизмерной фазы возникает пространственно-неоднородная структура концентрации электронов на ловушках, которая обуславливает проявление эффектов памяти или глобального гистерезиса.
- 6) Описано возникновение размытого фазового перехода в системе с дефектами, свойства которых изменяются с температурой. Низкочастотная дисперсия диэлектрических свойств объясняется связью релаксации параметра порядка с процессами термоактивации с уровней прилипания, имеющих широкое распределение по энергиям.
- 7) Определены основные причины появления размытого фазового перехода в системе твердых растворов германата-силиката свинца $Pb_5(Ge_{1-x}Si_x)_3O_{11}$. Показано, что релаксороподобное поведение возникает тогда, когда температура фазового перехода оказывается в температурной области термолокализации зарядов.
- 8) Впервые обнаружено изменение диэлектрической проницаемости под воздействием интенсивного освещения в монокристаллах $PbMg_{1/3}Nb_{2/3}O_3$ (PMN).
- 9) Показано, что зависимость времени задержки фазового перехода в однородное поляризованное состояние от температуры и величины внешнего электрического поля в низкотемпературной фазе релаксоров может быть описана в рамках модели, которая связывает эту задержку с медленными процессами делокализации носителей заряда во внешнем электрическом поле.
- 10) Фазовое расслоение с зарядовыми неоднородностями описаны в рамках феноменологической теории фазовых переходов с последовательным учетом дальнедействующего кулоновского взаимодействия. Построена фазовая диаграмма системы, и сделаны оценки выигрыша в

энергии такого состояния. Впервые показано, что повышение энергии за счет кулоновского взаимодействия оказывается относительно небольшим, вследствие сильного экранирования и малой плотности дополнительного заряда в области неоднородностей.

- 11) Впервые предсказаны и обнаружены чрезвычайно высокие значения диэлектрической проницаемости до 10^7 и коэффициента магнитоёмкостного эффекта до 10^5 % в полупроводниковых монокристаллах $\text{La}_{1-x}\text{Sr}_x\text{MnO}_3$ в ограниченной области температур, которая совпадает с областью фазового расслоения.

На основе полученных результатов сформулированы следующие выводы:

- 1) При фазовых переходах в системах с полупроводниковыми свойствами возникают неоднородные состояния, параметрами которых можно управлять при помощи освещения, что позволяет использовать такие системы в различных технических приложениях. Возникновение неоднородных гетерофазных состояний с заданной периодичностью позволяет создавать периодические доменные структуры, которые являются перспективными объектами для элементной базы, используемой в устройствах по преобразованию оптического излучения.
- 2) Свойства размытых фазовых переходов связаны с динамикой перезарядки состояний, образованных дефектами. Поэтому полезные свойства материалов с размытыми фазовыми переходами можно изменять, модифицируя определенные свойства дефектов или воздействуя на них светом.
- 3) Фазовое расслоение с зарядовыми неоднородностями приводит к появлению необычных диэлектрических и магнитоёмкостных свойств, что позволяет вести направленный поиск материалов с новыми магнитоэлектрическими свойствами. Кроме того, изменение диэлектрических характеристик вещества при переходе в состояние фазового расслоения с зарядовыми неоднородностями может стать основой нового метода определения и исследования таких состояний.

Список авторской литературы

- [A1] Мамин Р.Ф. Трансформация сегнетоэлектрических фазовых переходов под действием освещения / Р.Ф. Мамин, Г.Б. Тейтельбаум // Письма в ЖЭТФ. -1986.- Т.44, вып.7.- С.326-329.
- [A2] Мамин Р.Ф. Фазовые переходы в полупроводниках при быстром изменении температуры / Р.Ф. Мамин Г.Б. Тейтельбаум // ФТТ. - 1990. - Т.32, вып.9. - С.2627-2633.
- [A3] Мамин Р.Ф. Эффекты памяти в несоизмерной фазе в полупроводниках / Р.Ф. Мамин // Письма ЖЭТФ. - 1990. - Т.52, вып.6. - С.952-954.
- [A4] Мамин Р.Ф. Глобальный динамический гистерезис в несоизмерной фазе в полупроводниках / Р.Ф. Мамин // Письма ЖЭТФ. - 1991. - Т.53, вып.10. - С.499-503.
- [A5] Мамин Р.Ф. Несоразмерная фаза в полупроводниках / Р.Ф. Мамин // ФТТ. - 1991. - Т.33, вып.9. - С.2609-2615.
- [A6] Мамин Р.Ф. Сдвиг температуры фазового перехода в $\text{Sn}_2\text{P}_2\text{Se}_6$ при быстром изменении температуры. / Ю.С. Грезнев, Р.Ф. Мамин, С.Ф. Мотря // ФТТ. -1993. - Т.35, вып.1. - С.96-99.
- [A7] Мамин Р.Ф. Эффекты памяти в несоизмерной фазе в полупроводниках / Р.Ф. Мамин // Кристаллография. - 1993. - Т.38, вып.1. - С.140-143.
- [A8] Мамин Р.Ф. Влияние термозаполнения ловушек на устойчивость структурных фаз в полупроводниках / Р.Ф. Мамин // Письма в ЖЭТФ. - 1993. - Т.58, вып.7. - С.534-537.
- [A9] Mamin R.F. Memory effect in incommensurate phase and kinetic of electronic subsystem / R.F. Mamin // Ferroelectrics. - 1993. - V.143, n.1. - P.191-194.
- [A10] Мамин Р.Ф. Новый вид доменной структуры вблизи фотостимулированного фазового перехода автосолитоны / Р.Ф. Мамин // Письма в ЖЭТФ. - 1994. - Т.60, вып.1. - С.51-55.
- [A11] Mamin R.F. Autosolitons in photoferroelectrics / R.F. Mamin // Ferroelectrics Letters.- 1995. - V.18. - P.33-38.
- [A12] Mamin R.F. Kinetics of structural phase transition in semiconductor caused by redistribution of electrons on trapping levels / R.F. Mamin // Ferroelectrics.- 1995. - V.174. - P.23-30.

- [A13] Mamin R.F. Periodical structures and dynamic phenomena in ferroelectric-semiconductors / R.F. Mamin // *Ferroelectrics*.- 1996. - V.185, n.1. - P.87-90.
- [A14] Мамин Р.Ф. Периодическая доменная структура с чередованием фаз вблизи фазового перехода в фотосегнетоэлектриках / Р.Ф. Мамин // *Известия РАН, сер. физ.*- 1996. - Т.60, вып.10. - С.130-133.
- [A15] Грезнев Ю.С. Исследование динамики фазового перехода несо-размерная соразмерная фаза в сегнетоэлектриках-полупроводниках $\text{Sn}_2\text{P}_2(\text{Se}_{1-x}\text{S}_x)_6$ методом ЭПР / Ю.С. Грезнев, Р.Ф. Мамин, С.Ф. Мотря // *Известия РАН, сер. физ.*- 1996. - Т.60, вып.9. - С.190-192.
- [A16] Мамин Р.Ф. Возникновение гетерофазных структур вблизи фазовых переходов в фотосегнетоэлектриках / Р.Ф. Мамин // *ЖЭТФ*.- 1997. - Т.111, вып.4. - С.1465-1476.
- [A17] Мамин Р.Ф. К теории фазовых переходов в релаксорах / Р.Ф. Мамин // *ФТТ*.- 2001. - Т.43, вып.7. - С.1262-1267.
- [A18] Mamin R.F. Conductivity in boron-doped diamond / R.F. Mamin, T. Inushima // *Phys.Rev.B*.- 2001. - V.63, n.3. - P.3201-3204.
- [A19] Mamin R.F. Peculiarity of incommensurate phase connected with electronic system dynamics / R.F. Mamin // *Ferroelectrics*. - 2001. - V.250. - P.127-130.
- [A20] Mamin R.F. Delay time of phase transition in low-temperature phase of relaxors / R.F. Mamin, R. Blinc // *Ferroelectrics Letters*.- 2002. - V.29, n.1. - P.15-20.
- [A21] Mamin R.F. Localized charges and model of relaxor ferroelectrics / R.F. Mamin, S.A. Migachev, M.F. Sadykov, D.G. Zverev // *Ferroelectrics*. - 2003. - V.283, n.1. - P.97-107.
- [A22] Мамин Р.Ф. Фотостимулированные явления в релаксорах / Р.Ф. Мамин, С.А. Мигачев, М.Ф. Садыков и др. // *Письма в ЖЭТФ*.- 2003. - Т.78, вып.11. - С.1232-1236.
- [A23] Мамин Р.Ф. Время задержки в низкотемпературной фазе релаксоров / Р.Ф. Мамин, Р. Блинц // *ФТТ*.- 2003. - Т.45, вып.5. - С.897-900.
- [A24] Мамин Р.Ф. Феноменологическая модель релаксоров / Р.Ф. Мамин // *Известия РАН, сер. физ.*- 2003. - Т.67, вып.8. - С.1157-1160.

- [A25] Мамин Р.Ф. Фотостимулированные явления в $\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3$ / Р.Ф. Мамин, С.А. Мигачев, М.Ф. Садыков и др. // Известия РАН, сер. физ.- 2004. - Т.68, вып.7. - С.959-962.
- [A26] Мамин Р.Ф. Фотостимулированная проводимость в релаксорах / С.А. Мигачев, М.Ф. Садыков, Р.Ф. Мамин // ФТТ.- 2004. - Т.46, вып.10. - С.1845-1848.
- [A27] Mamin R.F. Some questions of relaxor theory / Mamin R.F. // Ferroelectrics.- 2004. - V. 299, n.1. - P.89-93.
- [A28] Zverev D.G. Optical properties of relaxor ferroelectrics / D.G. Zverev, S.A. Migachev, R.F. Mamin et. al. // Ferroelectrics.- 2003. - V.307. - P.137-141.
- [A29] Буш А.А. Трансформация диэлектрических свойств и возникновение релаксорного поведения в кристаллах $\text{Pb}_5(\text{Ge}_{1-x}\text{Si}_x)\text{O}_{11}$ / А.А. Буш, К.Е. Каменцев, Р.Ф. Мамин // ЖЭТФ. - 2005. - Т.127, вып.1. - С.156-170.
- [A30] Мамин Р.Ф. Гигантская диэлектрическая восприимчивость и магнитоёмкостной эффект в манганитах при комнатной температуре / Р.Ф. Мамин, Т. Игами, Ж. Мартон и др. // Письма в ЖЭТФ. - 2007. - Т.86, вып.10. - С.731-735.
- [A31] Mamin R.F. Giant dielectric permittivity and colossal magnetocapacitance in $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ single crystals, / R.F. Mamin, T. Egami, T. Marton, S.A. Migachev // Phys. Rev. B. - 2007. - V.75, n.11. - P.115129(1-4).
- [A32] Mamin R.F. Giant dielectric permittivity and colossal magnetocapacitance effect in complex manganites with high conductivity / R.F. Mamin, T. Egami, T. Marton, S.A. Migachev //Ferroelectrics. - 2007. - V.348, n.1. - P.7-12.
- [A33] Мамин Р.Ф. Дефекты со свойствами изменяющимися с температурой и особенности фазовых переходов / Р.Ф. Мамин // Известия РАН, сер. физ.- 2007. - Т.71, вып.10. - С.1398-1400.
- [A34] Inushima T. Impurity band structure of boron-doped homoepitaxial diamond / T. Inushima, R. F. Mamin, H. Shiomi // Phys.Rev.B.- 2009. - V.79, n.3. - P.045210(1-6).
- [A35] Mamin R.F. Locally induced charged states in $\text{La}_{0.89}\text{Sr}_{0.11}\text{MnO}_3$ single crystals / R.F. Mamin, I.K. Bdikin, A.L. Kholkin // Appl. Phys. Lett. - 2009. - V. 94, n. 22. - P. 222901(3).

- [A36] Кабанов В.В. Локализованные зарядовые неоднородности и фазовое расслоение вблизи фазового перехода второго рода / В.В. Кабанов, Р.Ф. Мамин, Т.С. Шапошникова // ЖЭТФ.- 2009. - Т.135, вып.2. - С.322-329.
- [A37] Ultrafast phase separation dynamics in $\text{La}_{0.875}\text{Sr}_{0.125}\text{MnO}_3$ single crystals / Т. Mertelj, Р. Mamin, R. Yusupov, D. Mihailovic // Phys.Rev.B.- 2011.- V. 83, n.11 - P. 113103(4).
- [A38] Мамин Р.Ф. Локально-индуцированные заряженные поляризационные состояния в манганитах / Р.Ф. Мамин, Д.А. Бизяев, А.А. Бухараев // Известия РАН, сер. физ.- 2011. - Т.75, вып.1. - С.10-13.
- [A39] Мамин Р.Ф. О возможности возникновения мультифункционального поведения вследствие зарядового и фазового расслоения / Р.Ф. Мамин // Тезисы докладов. XIX Всероссийская конференция по физике сегнетоэлектриков. - 2011. - О-04. - С.17.

Список цитированной литературы

- [1] Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники / В.М. Фридкин. - М: Наука, 1976.- 408 с.
- [2] Фридкин В.М. Фотосегнетоэлектрики / В.М. Фридкин. - М: Наука, 1979.- 264с.
- [3] Коваленко В.Ф. Фотоиндуцированный магнетизм / В.Ф. Коваленко, Э.Л. Нагаев // УФН.- 1986.- Т.148, вып.4. - С.561-602.
- [4] Нагаев Э.Л. Физика магнитных полупроводников / Э.Л. Нагаев.- М: Наука, 1979.- 431 с.
- [5] Граница фаз в сегнетоэлектрике SbSi как аналог электрического домена в полупроводнике / В.М.Фридкин, М.И.Горелов, А.А.Греков и др. // Письма в ЖЭТФ. - 1966. - Т.4, вып.11. - С.461-464
- [6] Автоколебательный режим сегнетоэлектрического фазового перехода в прустите при непрерывном освещении / И.М. Шмытько, В.Ш. Шехтман, В.И. Иванов, С.С. Хасанов // Письма в ЖЭТФ. - 1979.- Т.29, вып.7. - С.425-428.
- [7] Мамин Р.Ф. Термодинамическая теория фаз с несоразмерной структурой в полупроводнике / Р.Ф. Мамин, Г.Б. Тейтельбаум // ФТТ. - 1988. - Т.30, вып.12. - С. 3536-3540.

- [8] Расщепление сегнетоэлектрического фазового перехода в поле лазерного излучения и его самофокусировка / Ю.М. Высочанский, В.Г. Фурцев, М.М. Хома и др. // ЖЭТФ. - 1985. - Т.89, вып.3. - С.939-945.
- [9] Высочанский Ю.М. Точка Лифшица и диаграмма состояний сегнетоэлектриков / Ю.М.Высочанский, В.Ю.Сливка // УФН.- 1992.- Т.162, вып.2.- С.139-160.
- [10] Хасанов С.С. Образование модулированной структуры в прустите / С.С. Хасанов, В.Ш. Шехтман, И.М. Шмытько // ФТТ. - 1984. - Т.26, вып.3. - С.935-938.
- [11] Жигадло Н.Д. Индуцирование несоизмеримого состояния воздействием периодически изменяющегося температурного поля / Н.Д. Жигадло, В.В. Зарецкий // Письма в ЖЭТФ. - 1989. - Т.49, вып.9. - С.498-500.
- [12] Нагаев Э.Л. Основное состояние и аномальный магнитный момент электронов проводимости в антиферромагнитном полупроводнике / Э.Л. Нагаев // Письма в ЖЭТФ. - 1967. - Т.6, вып.1. - С.484-486.
- [13] Нагаев Э.Л. Манганиты лантана и другие магнитные проводники с гигантским магнитосопротивлением / Э.Л. Нагаев // УФН. - 1996.- Т.166, вып.8.- С.833-858.
- [14] Kugel K.I. Phase separation in Jahn-Teller systems with localized and itinerant electrons / K.I. Kugel, A.L. Rakhmanov, A.O. Sboychakov // Phys. Rev. Lett. - 2005. - V.95, n.26.- 267210.
- [15] Каган М.Ю. Неоднородные зарядовые состояния и фазовое расслоение в манганитах / М.Ю. Каган, К.И. Кугель // УФН.- 2001.- Т.171, вып.6. - С.577-596.
- [16] Гинзбург В.Л. Теория сегнетоэлектрических явлений / В.Л. Гинзбург // УФН. - 1949. - Т.38, вып.4. - С.490-525.
- [17] Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний / Л.И. Мандельштам. - М.: Наука, 1972.- 470 с.
- [18] Кернер Б.С. Самоорганизация в активных распределенных средах / Б.С. Кернер, В.В. Осипов // УФН. - 1990. - Т.160, вып.9. - С.2-73.