

На правах рукописи

Романов Владимир Викторович

**МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МЕТАСТАБИЛЬНЫХ ДЕФЕКТОВ В
ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТЕКЛАХ, КРИСТАЛЛАХ И НАНОСТРУКТУРАХ**

Специальность: 01.04.07 – физика конденсированного состояния

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор В.Ф. Агекян
доктор физико-математических наук, профессор А.И. Мелькер
доктор физико-математических наук, профессор А.К. Пржеvusкий

Ведущая организация – Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится 19 июня 2002 года в 16 часов 00_минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете по адресу:

195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГТУ

Автореферат разослан “07” мая 2002 года.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
доктор физ.-мат.наук, профессор

Ю.Ф. Титовец

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Стремительное развитие опто- и наноэлектроники определяет неослабевающее внимание к твердотельным материалам с полупроводниковыми свойствами. В последнее время наряду с объемными кристаллами основными объектами изучения стали также различные низкоразмерные системы – наноструктуры [1-3].

Создание новых приборов твердотельной наноэлектроники базируется, прежде всего, на возможности управлять электрическими свойствами полупроводниковых материалов. Однако изучение всей совокупности экспериментальных данных свидетельствует об их неразрывной связи с магнитными и оптическими свойствами [4], которые во многом определяются формированием собственных и (или) примесных дефектов [5,6]. В свою очередь, точечные и протяженные центры, которые представляют собой разновидности примесных и собственных дефектов в полупроводниковых кристаллах и стеклах, характеризуются взаимосвязанностью зарядовых (спиновых) корреляций и электрон-колебательного взаимодействия [7], которая является причиной метастабильных свойств и компенсации кулоновского отталкивания электронов на центре. Причем, компенсация кулоновского отталкивания электрон-колебательным взаимодействием может быть весьма интенсивной, что стимулирует спонтанную диссоциацию одноэлектронных парамагнитных состояний с образованием пустых и двухэлектронных заряженных состояний, которая характеризует образование центров с отрицательной корреляционной энергией [8].

Фундаментальной проблемой физики конденсированного состояния является поведение магнитного момента в процессе исчезновения и генерации парамагнитных одноэлектронных состояний, на которое существенное влияние оказывает метастабильность центра, возникающая вследствие изменения его позиции в решетке кристалла при перезарядке. Изучение температурных и полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости как в отсутствие оптических воздействий на образец, так и при использовании различных источников монохроматического и немонахроматического излучения позволяет во многих случаях решить эту проблему и идентифицировать магнитные свойства метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией. Результаты данных исследований представлены в настоящей диссертации, в которой магнитные, оптические и электрические свойства полупроводниковых стекол, кристаллов и наноструктур впервые рассматриваются в концепции поведения магнитного момента метастабильного центра с отрицательной корреляционной энергией, что определяет ее актуальность как в научном, так и в практическом отношении.

Цель диссертационной работы состояла в обнаружении и детальном исследовании магнитных свойств полупроводниковых стекол, кристаллов и

наноструктур, которые обусловлены наличием метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией вследствие взаимосвязанности зарядовых/спиновых корреляций и электрон-колебательного взаимодействия, что потребовало решения следующих задач:

создание установки для исследования магнитных свойств материалов под воздействием монохроматического и немонахроматического оптического излучения в широком спектральном диапазоне;

экспериментальное наблюдение и изучение метастабильных дефектов с отрицательной корреляционной энергией, образованных оборванными связями в халькогенидных стеклообразных полупроводниках;

изучение влияния DX – центров индия на магнитные свойства ионных кристаллов с полупроводниковыми свойствами CdF_2 ;

обнаружение и изучение магнитоупорядоченных квазимолекул Ln_2O_3 , а также образованных ими областей локального магнитоупорядочения – спин-поляронов в соединениях типа $A^{III}B^V$ и кристаллах $LiIO_3$, легированных редкоземельными элементами;

исследование магнитных свойств примесных сверхрешеток, состоящих из последовательности квантовых ям и разделяющих их двумерных сильнолегированных барьеров, на поверхности кремния (100);

исследование магнитных и оптических свойств кремниевых наноструктур, легированных эрбием.

Настоящая работа представляет собой первое комплексное исследование магнитных свойств полупроводниковых стекол, кристаллов и наноструктур в зависимости от зарядового и спинового состояния точечных и протяженных дефектов, которое определяет поведение магнитного момента при изменении температуры и внешнего магнитного поля.

Научная новизна работы заключена в создании основ нового направления в физике дефектов в полупроводниковых стеклах, кристаллах и наноструктурах - магнитные свойства метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией - и определяется следующими **положениями, которые выносятся на защиту:**

1. Температурные и полевые зависимости статической магнитной восприимчивости полупроводниковых стекол, кристаллов и наноструктур позволяют в условиях оптической накачки монохроматическим светом идентифицировать магнитные свойства метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией.

2. Метастабильные одноэлектронные состояния оборванных связей атомов халькогена и мышьяка, самокомпенсируются вследствие отрицательной корреляционной энергии, формируя электрические диполи, поле которых является ответственным за урбаховский край в спектральных зависимостях поглощения халькогенидных стекол.

3. Фотоиндуцированный парамагнетизм кристаллов $CdF_2\langle In \rangle$ возникает вследствие метастабильности DX -центров индия, обладающих отрицательной корреляционной энергией.

4. Основной вклад в магнетизм кристаллов $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$ вносят антиферроупорядоченные квазимолекулы Ln_2O_3 , которые трансформируются в ферроупорядоченное состояние посредством $s-f$ -обмена через электроны мелких доноров. Конкурирующим процессом образованию одиночных ферроупорядоченных квазимолекулярных центров является формирование в области высоких локальных концентраций Ln_2O_3 спин-поляронов, локализованных на мелких донорах.

5. Формирование в запрещенной зоне кристалла глубокого обменно-связанного уровня ферроупорядоченной квазимолекулы Ln_2O_3 стимулирует оже-рекомбинацию неравновесных носителей, которая резко усиливает внутрицентровую фотолюминесценцию ионов Ln^{3+} в кристаллах $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$.

6. Самоупорядоченные кремниевые сверхрешетки проявляют диамагнитные свойства, которые обусловлены диамагнетизмом Ландау невырожденного газа свободных дырок в квантовых ямах, туннелирующих через синглетные состояния дипольных центров бора, $B^+ - B^-$, внутри сильнолегированных двумерных барьеров.

7. $s-f$ -обмен является ответственным за усиление парамагнетизма кремниевых наноструктур, содержащих квазимолекулы Er_2O_3 , а также приводит к росту эффективности внутрицентральной люминесценции ионов Er^{3+} .

Научная и практическая ценность работы определяется применением температурных и полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости, полученных в условиях оптической накачки монохроматическим светом, для изучения метастабильных свойств дефектов свойств в полупроводниковых стеклах, кристаллах и наноструктурах и заключается

в идентификации магнитных свойств точечных и протяженных центров с отрицательной корреляционной энергией, спонтанной диссоциации одноэлектронных состояний оборванных связей и примесных центров в объеме и на поверхности полупроводниковых стекол и кристаллов, а также – в наноструктурах на их основе, процессов локального магнитоупорядочения в полупроводниковых кристаллах и наноструктурах, содержащих примеси редкоземельных элементов;

в получении экспериментальных данных о формировании электрических диполей в процессе самокомпенсации центров с отрицательной корреляционной энергией, которые ответственны за урбаховский край в спектральных зависимостях поглощения халькогенидных стекол, за фотоиндуцированный парамагнетизм

кристаллов $CdF_2\langle In\rangle$, за реконструкцию оборванных связей на поверхности монокристаллического кремния, за взаимосвязанность магнитных и оптических свойств двумерных сильнолегированных барьеров, а также – полупроводниковых кристаллов и наноструктур, содержащих примеси редкоземельных элементов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на Республиканском симпозиуме по физическим свойствам сложных полупроводников (Баку, 1978), на II Всесоюзном совещании по глубоким уровням в полупроводниках (Ташкент, 1980), на VII Всесоюзной конференции по физике соединений A^3B^5 (Новосибирск, 1981), на VII и VIII Всесоюзных симпозиумах по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов (Ленинград, 1982, Свердловск, 1985), на Всесоюзной конференции “Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов” (Кишинев, 1986), на VII Всесоюзной школе “Актуальные вопросы физики и химии редкоземельных полупроводников” (Махачкала, 1988), Всесоюзной школы по физике и химии РЗЭ (Красноярск, 1989), на Международном симпозиуме “Nanostructures: Physics and Technology” (Санкт-Петербург, 1996), на Международных конференциях NDTCS-97, 98, 99, 2000, 2001 (Санкт-Петербург), на 8^{ой} Международной конференции по центрам с мелкими уровнями в полупроводниках SLCS-98 (Монпелье, 1998), Всероссийской конференции по микро- и наноэлектронике МНЭ-98 (Звенигород, 1998), на научных семинарах кафедры экспериментальной физики СПбГТУ и Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 36 статей.

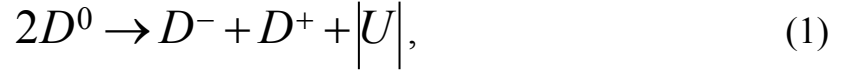
Структура и объем работы. Диссертация состоит из Введения, пяти глав, Заключение и библиографии. Она содержит 202 страницы, включая 69 рисунков, 2 таблицы и 121 наименование библиографии.

Содержание работы. Во введении обосновывается актуальность работы, формулируются цели и задачи работы, определяется её научная и практическая ценность и приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 излагаются результаты исследования магнитных свойств метастабильных дефектов, образованных оборванными связями в халькогенидных стеклообразных полупроводниках As_2S_3 , которые являются модельными объектами физики неупорядоченных систем, а оборванные связи атомов халькогена и мышьяка могут служить наглядными моделями глубоких дефектов.

Одноэлектронные версии глубоких дефектов в аморфных полупроводниках предсказывают высокую плотность локализованных состояний вблизи уровня Ферми, что подтверждается данными электрических и оптических измерений [9]. Однако ЭПР-исследования не выявили сколь-нибудь значительной концентрации неспаренных спинов в халькогенидных стеклах, что практически однозначно

идентифицирует отсутствие одноэлектронных локализованных состояний в запрещенной зоне [10]. Для устранения очевидного противоречия была выдвинута концепция отрицательной корреляционной энергии (*negative U*) [8, 11], в рамках которой предполагается, что одноэлектронный глубокий центр (D^0) спонтанно диссоциирует, формируя двухэлектронное (D^-) и пустое (D^+) состояния:



где U – хаббардовская корреляционная энергия ($U < 0$).

Прямым следствием образования *negative U* – центров является возможность генерации парамагнитных одноэлектронных состояний в неравновесных условиях. Такие парамагнитные центры были обнаружены в ЭПР – исследованиях, проведенных при оптической накачке монохроматическим светом с энергией вблизи урбаховского края оптического поглощения халькогенидных стекол α -Se, As_2Se_3 и As_2S_3 [12]. Однако практически открытым оставался вопрос о поведении магнитного момента в процессе образования двухэлектронных состояний *negative U* – центров, а также идентификации их моделей и возможной роли в фотоструктурных превращениях, возникающих в халькогенидных стеклах при длительной оптической накачке.

Для решения данной проблемы в настоящей работе были впервые использованы измерения температурных зависимостей статической магнитной восприимчивости в условиях оптической накачки монохроматическим светом. В §§ 1 и 2 описывается экспериментальная установка, позволяющая проводить измерения магнитной восприимчивости твердых тел в условиях оптического облучения монохроматическим и немонахроматическим светом с возможностью термостатирования в температурном диапазоне $3,2 \div 300 K$, а также источники излучения, использовавшиеся в проведенных экспериментах – в видимой ($\lambda = 0,53 \text{ мкм}$) и инфракрасной ($\lambda = 1,55 \text{ мкм}$) части спектра. Полученная в эксперименте температурная зависимость магнитной восприимчивости образца As_2S_3 (§ 3) демонстрирует два характерных пика ниже $T = 100 K$, которые идентифицируют спиновую нестабильность двух различных парамагнитных центров, представляющих собой оборванные связи атомов халькогена и мышьяка (рис.1, кривая 1). Для описания температурной зависимости магнитной восприимчивости полупроводниковых систем, содержащих метастабильные *negative U* – центры, было получено следующее выражение:

$$\chi = \frac{\mu_B^2 g^2 S(S+1)}{3kT} N_0 + \frac{2\mu_B^2 g^2 N_-}{3kT} \cdot \frac{\sum_S S(S+1) \exp\left(-\frac{aS(S+1)}{2kT}\right)}{\sum_S \exp\left(-\frac{aS(S+1)}{2kT}\right)}, \quad (2)$$

где первый член описывает парамагнетизм Кюри нейтральных оборванных связей, а второй – ван-флековский парамагнетизм отрицательно заряженных оборванных связей в синглетном состоянии, который проявляется вследствие их перехода в возбужденное высокоспиновое состояние в условиях обменного взаимодействия; α - константа обменного взаимодействия; концентрации остаточных нейтральных (N_0) и отрицательно заряженных (N_-) оборванных связей зависят от скорости охлаждения образца, что проявлялось в соответствующем температурном гистерезисе магнитной восприимчивости при $T < 100 \text{ K}$.

Облучение образцов при низкой температуре видимым светом ($\lambda = 0,53 \text{ мкм}$) приводило к оптической регенерации парамагнитных состояний центров (рис.1, кривая 2)

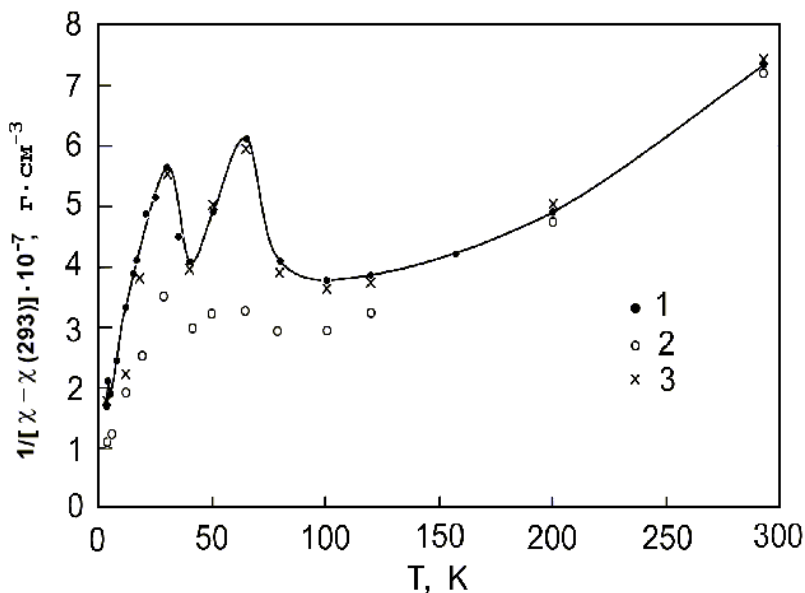
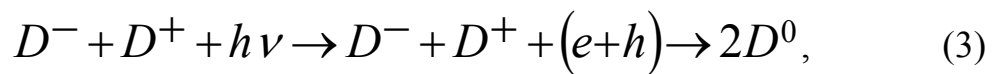
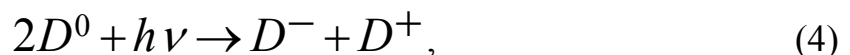


Рис.1.
Температурные зависимости магнитной восприимчивости As_2S_3 , демонстрирующие самокомпенсацию нейтральных парамагнитных дырочных и электронных центров халькогена и мышьяка

тогда как последующее облучение инфракрасным светом ($\lambda = 1,55 \text{ мкм}$) – к тушению парамагнетизма (рис.1, кривая 3)



что подтверждалось также соответствующей генерацией и тушением ЭПР и “красного” сдвига спектра поглощения (рис.2а).

Сравнительный анализ данных магнитной восприимчивости, ЭПР и оптически индуцированного поглощения, проведенный в рамках гамильтониана Андерсона [7, 11], позволил предложить модели центров с отрицательной корреляционной энергией, которые проявляют метастабильные свойства из-за наличия энергетического барьера между D^0 и D^- – состояниями, стабилизирующего одноэлектронное парамагнитное состояние после оптической накачки

монохроматическим светом (см.(2)). Кроме того, полученные результаты показали, что метастабильные свойства дырочных и электронных *negative U* – центров халькогена и мышьяка усиливаются в процессе их самокомпенсации вследствие формирования электрических диполей типа $As_2^+ - As_4^-$ и $S_1^+ - S_3^-$. В случае параллельной ориентации дипольные центры могут индуцировать достаточно

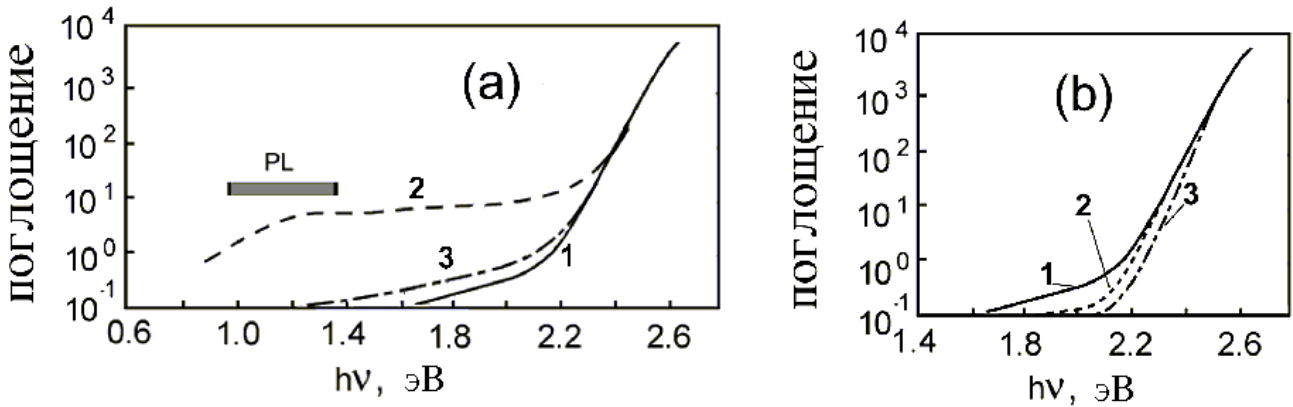


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента поглощения света в As_2S_3 , полученные при температуре $3,5 K$. (a): 1 - после охлаждения образца до $T=3,5 K$; 2 - после облучения монохроматическим светом с длиной волны $0,53 \text{ мкм}$ при $T=3,5 K$; 3 - после последующего облучения монохроматическим светом с $\lambda=1,55 \text{ мкм}$ при $T=3,5 K$. (b): 1 - после охлаждения образца до $T=3,5 K$; 2 - после двух последовательных циклов $300 K \rightarrow 3,5 K \rightarrow 300 K \rightarrow 3,5 K$ в условиях облучения монохроматическим светом с $\lambda=0,53 \text{ мкм}$; 3 - после трех циклов $300 K \rightarrow 3,5 K \rightarrow 300 K \rightarrow 3,5 K$ в условиях облучения монохроматическим светом с $\lambda=0,53 \text{ мкм}$

сильное внутреннее электрическое поле ($\sim 10^7 \div 10^8 \text{ В} \cdot \text{см}^{-1}$), которое является ответственным за “урбаховский хвост” ($\alpha \sim 100 \text{ см}^{-1}$) в спектральной зависимости коэффициента поглощения [9, 12]. После проведения последовательных циклов охлаждения образца в условиях оптической накачки видимым светом ($\lambda = 0,53 \text{ мкм}$) кривые температурной зависимости магнитной восприимчивости и спектры краевого поглощения наглядно демонстрировали нивелирование метастабильных свойств оборванных связей и соответствующее “просветление” образцов (рис.2b) вследствие исчезновения “урбаховского хвоста” в спектре краевого поглощения, что может быть связано с самокомпенсацией внутреннего электрического поля в результате оптически индуцированной антипараллельной ориентации *negative U* – диполей.

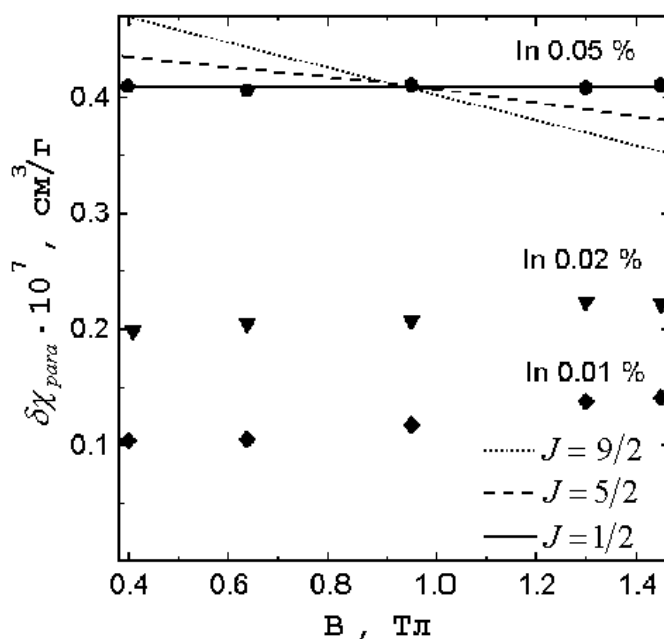
Глава 2 посвящена исследованию магнитных свойств фотохромных кристаллов $CdF_2\langle In \rangle$ в интервале температур $3,5 \div 300 K$, результаты которого позволяют установить метастабильную природу глубокого примесного уровня, создаваемого DX – центрами индия. Известно, что присутствие в кристаллах DX – центров обуславливает окраску кристалла CdF_2 , проявляющуюся в спектрах поглощения видимого диапазона. Однако интенсивное облучение кристаллов $CdF_2\langle In \rangle$ ($\lambda = 0,48 \text{ мкм}$) при низкой температуре ($T = 5 K$) приводит к трансформации глубокого DX – центра индия в мелкое водородоподобное состояние, что сопровождается “просветлением” кристалла и появлением ИК-полосы поглощения [13]. В этом случае ключевым является вопрос о зарядовом состоянии DX – центра индия. Если глубокий уровень принадлежит нейтральному состоянию, то DX – центр является бистабильным, и оптически индуцированное “просветление” кристалла $CdF_2\langle In \rangle$ не должно сопровождаться изменением его магнитных свойств. Однако если глубокий уровень сформирован DX^- – состоянием, образованным в процессе самокомпенсации *negative* U – центра индия, то его оптическая перезарядка приведет к усилению парамагнетизма кристалла $CdF_2\langle In \rangle$.

Решающим аргументом в пользу одной из этих гипотез должны служить результаты исследования магнитных свойств кристаллов $CdF_2\langle In \rangle$ в условиях оптической накачки ($\lambda = 0,48 \text{ мкм}$).

В § 1 настоящей главы приведены характеристики исследуемых образцов и описана методика проведения эксперимента.

Измерения магнитной восприимчивости аддитивно окрашенных кристаллов

Рис. 3. Полевая зависимость фотоиндуцированного парамагнитного вклада $\delta\chi_{para}$ в магнитную восприимчивость кристаллов $CdF_2\langle In \rangle$ с различным содержанием индия, измеренная при $T = 4 K$



$CdF_2\langle In \rangle$, проведенные при температуре $T=4K$ после их облучения, демонстрируют усиление парамагнетизма кристаллов (§ 2). Сопоставление экспериментальных данных с расчетными кривыми показывает, что теория наилучшим образом описывает эксперимент при значении $J=1/2$ (рис.3). Таким образом, однозначно подтверждается образование в процессе фотообесцвечивания кристаллов $CdF_2\langle In \rangle$ мелких доноров индия $(In^{3+} + e)$, которые возникают в результате фотоионизации синглетного состояния глубокого DX^- -центра, и, тем самым, идентифицируются его *negative U* – свойства.

В главе 3 излагаются результаты изучения примесного магнетизма полупроводниковых кристаллов $A^{III}B^V$ и кристаллов $\alpha-LiIO_3$, легированных редкоземельными металлами.

Исследованию кристаллов $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$ посвящено большое число работ, выполненных в различных лабораториях мира. Однако оставался открытым вопрос о взаимосвязи результатов оптических и электрических измерений с магнитными свойствами и структурой центра введенной редкоземельной примеси. Для построения адекватных моделей редкоземельных центров (§ 1) наряду с “собственным” магнетизмом и локальной симметрией центра необходимо учитывать влияние на магнитные свойства редкоземельной примеси процессов магнитоупорядочения, наблюдаемых при высоких локальных концентрациях лантаноидов. Причем, следует учитывать [14], что термодинамически равновесными будут такие состояния твердых растворов лантаноидов, в которых атомы редких земель образуют квазимолекулярные центры (*MCR*) типа Ln_2O_3 , тогда как редкоземельные центры, содержащие одиночные ионы, могут наблюдаться, когда содержание редкой земли превышает концентрацию присутствующих в кристалле неконтролируемых примесей.

Основным состоянием антиферроупорядоченной квазимолекулы Ln_2O_3 (*AMRC*), внутри которой ионы редкой земли обменно связаны через валентные электроны кислорода, является синглет. Однако эффект перекрытия возбужденных состояний соседних пар, наблюдающийся при их высокой локальной концентрации, частично снимает запрет с термоиндуцированных переходов синглет – высокоспиновое состояние, что приводит к появлению ван-флековского парамагнетизма кристаллов $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$. “Молекулярная” модель центра редкой земли позволяет объяснить наблюдающийся при высоких температурах (рис.4,5) слабый парамагнетизм кристаллов $InP\langle Yb \rangle$, который описывается вторым слагаемым в выражении (2).

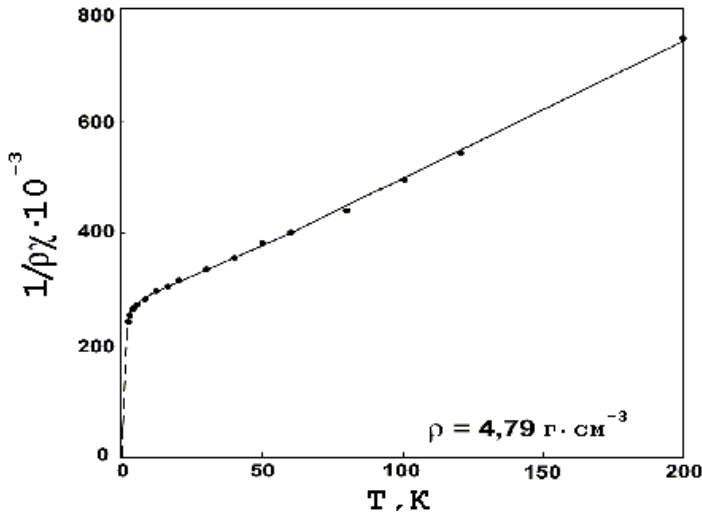


Рис. 4.
Температурная зависимость статической магнитной восприимчивости кристаллов $InP\langle Yb \rangle$ при статистически равномерном распределении редкоземельной примеси по объему.

Как температуры магнитных переходов, так и константы обменных взаимодействий, обнаруженные в ходе исследований статической магнитной восприимчивости кристаллов $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$, аномально велики. Это связано, прежде всего, с тем, что наблюдаемые магнитные переходы рассматривать, пренебрегая взаимодействием центра с кристаллической решеткой, которое в значительной степени компенсирует спиновые корреляции. Т.е. обменное взаимодействие ионов редкой земли, образующих квазимолекулу ($AMRC$), является взаимосвязанным с электрон-колебательным взаимодействием.

При низких температурах ключевую роль в формировании магнитных свойств кристаллов играет локализация свободных электронов на мелких донорах, которая как показали исследования температурных зависимостей магнитной восприимчивости, приводит к образованию либо одиночных ферроупорядоченных квазимолекул Ln_2O_3 ($FMCR$), либо спин-поляронов.

Если редкоземельный центр попадает в орбиту электрона, локализованного на мелком доноре, то ионы, формирующие антиферроупорядоченную квазимолекулу Ln_2O_3 , в результате $s-f$ -обмена через электрон донора переходят в ферроупорядоченное состояние, что сопровождается захватом донорного электрона на редкоземельный центр. В эксперименте ферроупорядоченные квазимолекулярные центры ($FMCR$) наблюдаются при статистически равномерном распределении магнитной примеси по кристаллу. Если же в орбиту электрона, локализованного на мелком доноре, попадает порядка $8 \div 10$ или более редкоземельных центров (MCR), причем, высокая локальная концентрация редкой земли может достигаться из-за неравномерного распределения введенной примеси, то в полумангнитном полупроводниковом кристалле возникают области локального магнитоупорядочения – связанные спин-поляроны (§ 2) (рис.5), образование которых сопровождается обнаруженным в оптических спектрах [15] сдвигом уровня мелкого донора ($\Delta E \sim 4 \text{ мэВ}$).

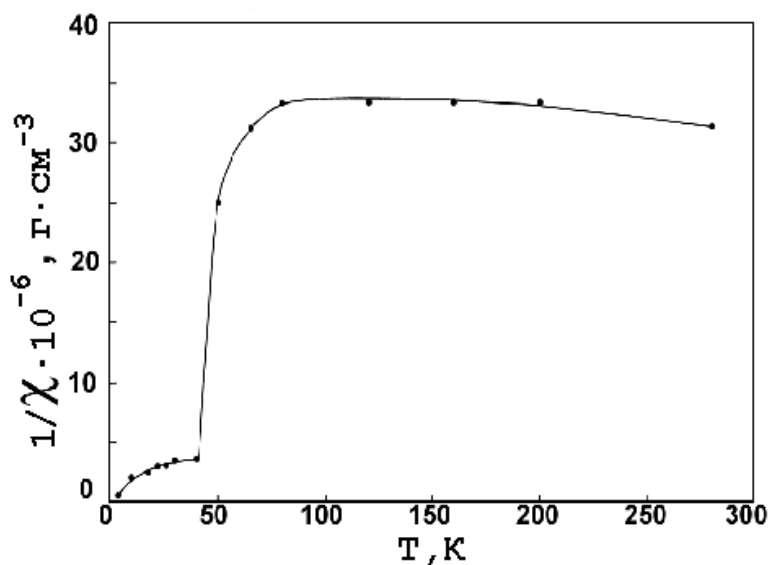


Рис.5.
Температурная зависимость статической магнитной восприимчивости, демонстрирующая образование спин-поляронов в кристаллах $InP\langle Yb \rangle$.

Следует отметить, что экспериментально идентифицированные в кристаллах $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$ одиночные ферроупорядоченные квазимолекулы Ln_2O_3 (рис.4) и связанные спин-поляроны (рис.5) характеризуются большими значениями констант $s-f$ - обмена вследствие сильного электрон - колебательного взаимодействия и могут рассматриваться как аналоги метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией. Кроме того, полученные температурные зависимости магнитной восприимчивости показывают, что при низких температурах кристаллы, легированные редкоземельными элементами, как правило, являются суперпарамагнетиками (рис.4,5).

Описание результатов экспериментального исследования кристаллов на основе концепции MCR позволяет полностью объяснить их оптические свойства (§ 3), претерпевающие изменения под воздействием различных внешних факторов. Причем, если широкая бесструктурная фотоэмиссионная полоса с энергией 1,35 эВ в спектре фотолюминесценции кристаллов $InP\langle Yb \rangle$ непосредственно связана с образованием спин-поляронов, то эффективность возбуждения внутрицентральной фотолюминесценции, в первую очередь, определяется наличием в кристалле ферроупорядоченных квазимолекул Ln_2O_3 . Причем, образующаяся при низких температурах донорно-акцепторная пара - мелкий донор + ферроупорядоченная квазимолекула Ln_2O_3 с электроном, захваченным с мелкого донора, стимулирует оже-процесс внутрицентрального возбуждения ионов лантаноидов.

Исследования кристаллов фосфидов индия и галлия, антимонида галлия, легированных редкоземельными элементами, показывают, что закономерности, обнаруженные при исследовании кристаллов $InP\langle Yb \rangle$ характерны и для твердых растворов на основе $A^{III}B^V$ других лантаноидов, что подтверждается

экспериментальными данными, приводимыми в § 4. Более того, обнаруженные закономерности позволяют объяснить магнитные свойства кристаллов иодата лития, легированного редкими землями, которые служат материалами для нелинейной оптики (§ 5).

В главе 4 исследуются магнитные свойства самоупорядоченных кремниевых сверхрешеток.

Этот тип сверхрешеток представляет собой последовательности кремниевых квантовых ям, сформированных между сильнолегированными δ -барьерами. Очевидно, что помимо вкладов двумерного газа свободных и связанных носителей в квантовых ямах и магнетизма разделяющих их барьеров, магнитные свойства исследуемых образцов определяются свойствами поверхности кремния (100), на которой с помощью неравновесной диффузии бора создаются самоупорядоченные сверхрешетки, а также границы раздела кремний-окисел. Все это, наряду с процессами локального магнитоупорядочения, предопределяет нетривиальные магнитные свойства таких систем, отражением которых является характер экспериментальных зависимостей магнитной восприимчивости от температуры и внешнего магнитного поля. Если объемный магнетизм кремниевой подложки (§ 1) обусловлен, как показывают проведенные оценки, ларморовской прецессией электронных орбит атомов во внешнем магнитном поле (рис.6), то вклад поверхности кристалла, определяется, прежде всего, высокой концентрацией оборванных связей. Двумерная реконструкция оборванных связей, происходящая

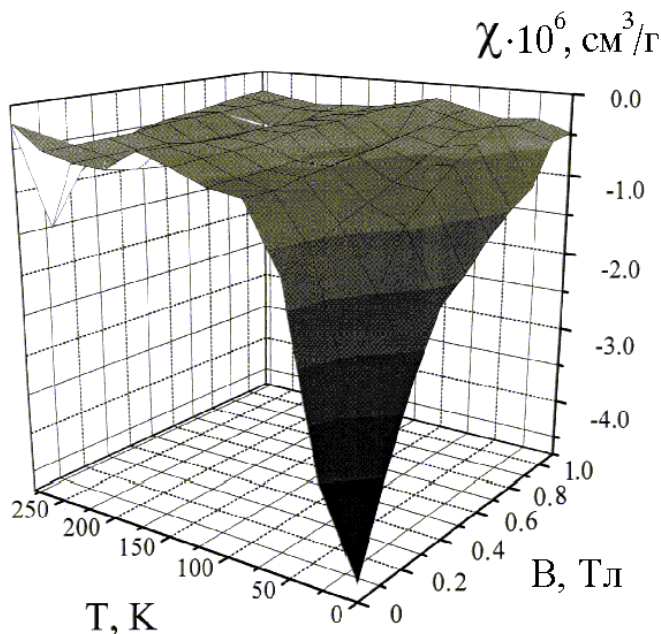
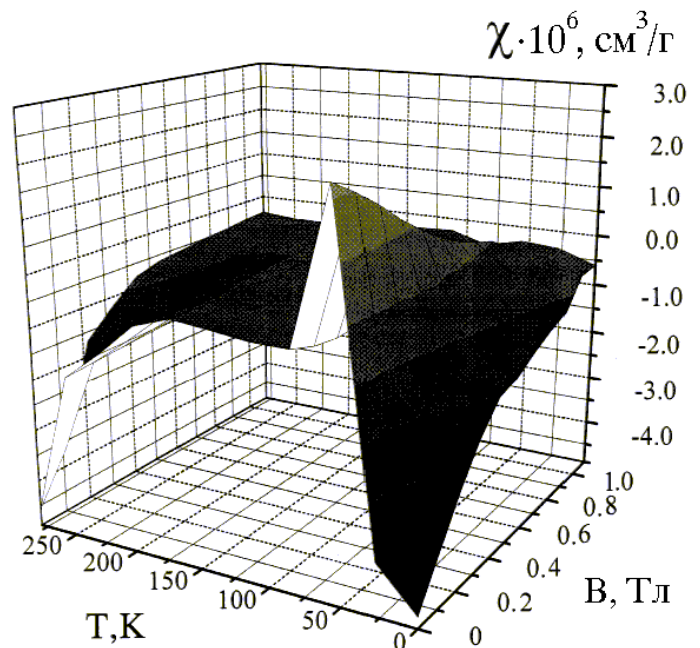


Рис. 6.
Температурные и полевые зависимости статической магнитной восприимчивости монокристалла кремния (100)

вследствие ян-теллеровских низкосимметричных искажений решетки, компенсирующих зарядовые корреляции, может приводить к формированию центров с отрицательной корреляционной энергией (димеров) (§ 2), аналогичных по своим свойствам *negative U* – центрам в халькогенидных стеклах, описанным в гл.1. Причем существует возможность образования как синглетных, так и триплетных

состояний димера [16]. Вероятно, что именно димеры в синглетном состоянии, обладающие отрицательной корреляционной энергией, являются причиной обнаруженного в настоящей работе усиления диамагнетизма поверхности кремния из-за туннелирования через них одиночных носителей тока. В слабых магнитных полях подобное туннелирование, как показало изучение температурных и полевых зависимостей магнитной восприимчивости, приводит к усилению диамагнитных свойств поверхности кремния (100), описываемых в рамках диамагнетизма Ландау невырожденного низкоразмерного газа свободных носителей тока, в то время как в сильных магнитных полях газ свободных носителей близок по своим свойствам к вырожденному. Исследование подложки кремния (100) (рис.7) с предварительно проведенным окислением (§ 3) показывает, что за исключением низкотемпературного интервала ($T < 20 K$), где поверхность раздела $Si-SiO_2$ проявляет диамагнитные свойства, обусловленные, по-видимому, туннелированием одиночных электронов и дырок через спаренные связи $Si-O$, её вклад в магнитную восприимчивость исследуемой низкоразмерной системы может быть описан выражением, аналогичным (4), если $N_0 \equiv N_{P_b}$, где N_{P_b} – концентрация подчиняющихся закону Кюри изолированных одноэлектронных P_b -центров, а $N_- \equiv N_{pair}$, т.е. второе слагаемое описывает вклад синглетных пар оборванных связей с концентрацией N_{pair} , проявляющих ван-флековский парамагнетизм при возбуждении в триплетное состояние, что соответствует переходу электрона из связывающей на антисвязывающую орбиталь.

Рис. 7.
Температурные и полевые зависимости магнитной восприимчивости монокристалла $Si(100)$ с нанесенным слоем диоксида кремния



Измерения магнитной восприимчивости показывают, что самоупорядоченные примесные сверхрешетки в кремнии проявляют диамагнитные свойства (рис.8), которые также усиливаются при низких температурах в слабых магнитных полях вследствие туннелирования носителей тока через *negative-U* примесные диполи ($B^+ - B^-$), обладающие C_{3v} симметрией (§ 4).

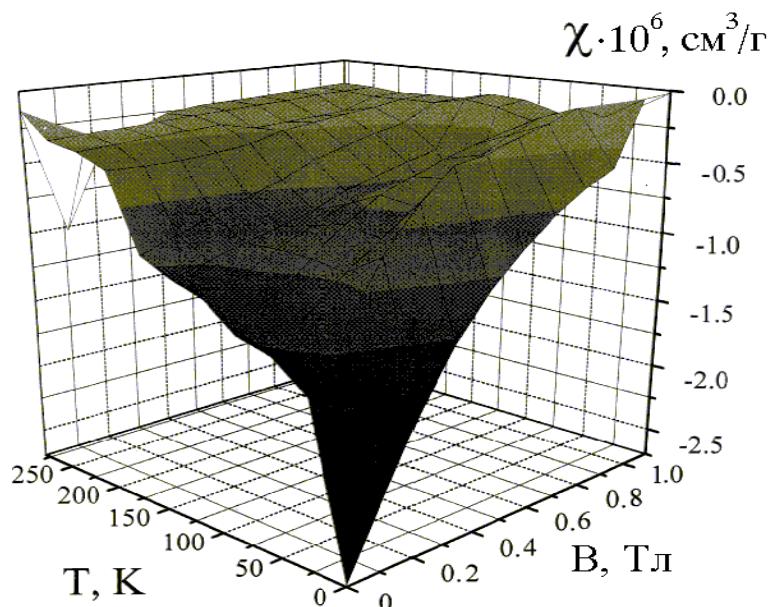


Рис. 8.

Температурная и полевая зависимости статической магнитной восприимчивости монокристалла кремния с самоупорядоченными сверхрешетками

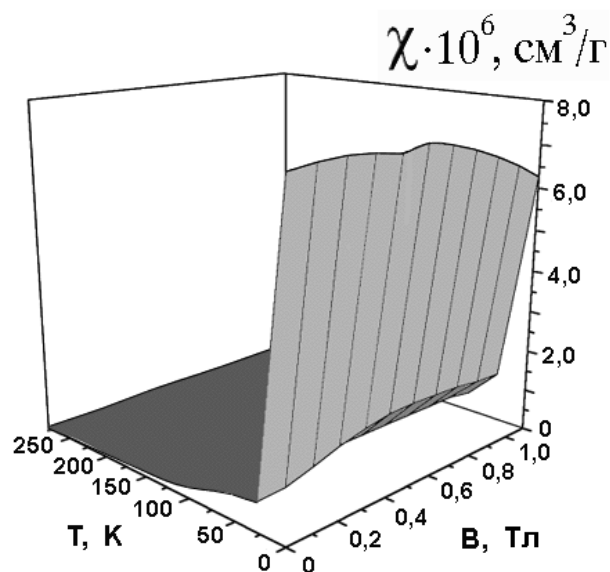
$$(T_{\text{диффузии}} = 1100 \text{ } ^\circ\text{C})$$

Глава 5 посвящена исследованию магнитных свойств самоупорядоченных кремниевых наноструктур, содержащих центры эрбия.

К наиболее интересным явлениям в таких системах следует отнести эффект Кондо, возникающий при туннелировании носителей через квантовые точки, содержащие примесные центры с незаполненными d и f - оболочками, а также – индуцированное вращение магнитных моментов этих центров вследствие обменного

Рис. 9.

Температурные и полевые зависимости статической магнитной восприимчивости кремниевых наноструктур n -типа, содержащих центры эрбия, поверхности $Si(100)$ p -типа ($\rho = 40 \text{ Ом}\cdot\text{см}$)



рассеяния туннелирующих носителей тока. Жесткие ограничения на движение носителей тока в примесных сверхрешетках могут способствовать резкому усилению косвенного $s-f$ -обменного взаимодействия, которое является ответственным за генерацию магнитных моментов квазимолекул Ln_2O_3 , а локализация электронов и дырок на центрах редких земель в полупроводниковых наноструктурах может сильно стимулировать их внутрицентровое возбуждение и люминесценцию вследствие $sp-f$ -гибридизации волновых функций [17]. В этом случае, благодаря взаимосвязанности магнитных и оптических свойств, для целей практической нано- и оптоэлектроники становятся весьма перспективными кремниевые наноструктуры, содержащие центры эрбия, поскольку энергия внутрицентровых переходов иона Er^{3+} (${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$, 1,54 мкм) соответствует минимуму энергетических потерь в оптических волокнах.

Исследование магнитных и оптических свойств самоупорядоченных кремниевых наноструктур, содержащих центры эрбия, проводилось посредством измерения температурных и полевых зависимостей статической магнитной восприимчивости в отсутствие оптического воздействия и при облучении монохроматическим светом (§ 1), а также – с помощью техники ИК-фурье-спектроскопии (§ 2). Легированные эрбием наноструктуры, с размерами от 1 до 10 нм, формируются внутри сверхмелких n^+ - и p^+ -диффузионных профилей, приготовляемых путем неравновесной диффузии фосфора и бора в предварительно легированную эрбием поверхность кремния (100).

В отличие от данных исследований объемных полупроводниковых монокристаллов (глава 3), температурные зависимости магнитной восприимчивости кремниевых наноструктур (рис. 9) демонстрируют в области низких температур не только вклад ферроупорядоченных квазимолекулярных центров Er_2O_3 , но и паулиевский парамагнетизм вырожденного двумерного газа носителей тока [110]. Другим важным отличительным признаком магнитных свойств наноструктур является подавление ван-Флекковского парамагнетизма (4) при высоких температурах, которое в целом ряде случаев сопровождается парадоксальным, на первый взгляд, уменьшением парамагнитной составляющей магнитной восприимчивости [115-117].

В сверхузких квантовых ямах ($W \leq 3 \text{ нм}$), где энергетические зазоры между квантоворазмерными подзонами сравнимы или превышают энергию перехода ${}^4I_{13/2} \leftrightarrow {}^4I_{15/2}$, а ширина энергетических уровней мультиплетной f -структуры много меньше энергии U с учетом ЭКВ, наблюдался эффект Кондо, состоящий в рассеянии электронов с переворотом спина, которое сопровождается “перебрасыванием” магнитных моментов между основным (синглетным, $\uparrow\downarrow$) и возбужденным ($\uparrow\uparrow$) состояниями квазимолекулы Er_2O_3 . При низких температурах в сверхузких квантовых ямах обменное рассеяние доминирует над процессом формирования ферроупорядоченных состояний квазимолекул Er_2O_3 . В этом случае ход обнаруженной температурной зависимости статической магнитной восприимчивости при $T < T_k$ определяется паулиевским парамагнетизмом двумерных электронов, а при $T > T_k$ - ван-флековским парамагнетизмом центров Er_2O_3 . Подобная температурная зависимость магнитной восприимчивости была наблюдаена при исследовании примесных сверхрешеток, состоящих из сверхузких продольных кремниевых квантовых ям. Однако частота “перебросов” – частота генерации магнитного момента квазимолекулярного редкоземельного центра – не позволяет резко увеличить магнитный момент и, тем самым, способствовать прямому возбуждению внутрицентральной люминесценции ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$. Эта цель была достигнута при использовании квазимолекул Er_2O_3 , помещенных в квантовые точки. Внутри кремниевых квантовых точек, формирующихся в области пересечения продольных и поперечных квантовых ям, необходимо также учитывать возможность генерации магнитного момента вследствие одноэлектронных (однодырочных) перезарядок. В этом случае локализация электронов (дырок) при низких температурах внутри квантовых точек способствует образованию ферроупорядоченных состояний квазимолекул Er_2O_3 , что проявляется в характерной зависимости Кюри. Определяющий вклад оже-процесса, основанного на $sp-f$ -гибридизации волновых функций, в генерацию магнитного момента был обнаружен при исследовании магнитной восприимчивости в условиях облучения образцов монохроматическим инфракрасным (1,55 мкм) и видимым (0,47 мкм) светом. В первом случае наблюдается подавление эффективного обменного рассеяния с переворотом спина, что, по-видимому, связано с одновременным прямым возбуждением перехода ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и переходом локализованного носителя из основного состояния в возбужденное и отражается в уменьшении магнитной восприимчивости. Оптическая накачка видимым светом стимулирует оже-процесс, увеличивая концентрацию носителей в квантовой яме, которые ответственны за генерацию магнитного момента при туннелировании через

квантовые точки, содержащие квазимолекулы Er_2O_3 , что проявляется в соответствующем увеличении магнитной восприимчивости.

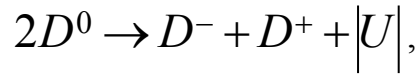
Таким образом, исследование магнитных свойств кремниевых наноструктур, содержащих центры эрбия, показало, что обменное рассеяние носителей тока с переворотом спина стимулирует генерацию магнитных моментов квазимолекул Er_2O_3 внутри кремниевых квантовых ям, тогда как туннелирование одиночных электронов (дырок) через заряженные квантовые точки приводит к возникновению магнитного момента как вследствие формирования ферроупорядоченного состояния квазимолекулярного центра Er_2O_3 , так и оже-процесса возбуждения квазимолекулы Er_2O_3 из синглетного в высокоспиновое состояние. Оже-процесс, ответственный за генерацию магнитного момента центра Er_2O_3 , индуцированный $sp-f$ -гибридизацией волновых функций, может привести также к эффективной фото- и электролюминесценции. Действительно, люминесценция была обнаружена при обратном напряжении, приложенном к n^+p -переходу, состоящему из квантовых ям, содержащих квантовые точки с квазимолекулами Er_2O_3 . Полученная спектральная зависимость позволила идентифицировать мультиплетную структуру редкоземельного центра, которая соответствует тригональной симметрии квазимолекулы Er_2O_3 . Осциллирующий характер интенсивности электролюминесценции показывает, что условие резонансного туннелирования определяет вероятность оже-процесса возбуждения ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ переходов ионов Er^{3+} в квазимолекуле Er_2O_3 . Следует отметить, что характеристики обнаруженной электролюминесценции наглядно демонстрируют роль $sp-f$ -гибридизации в реализации эффективных оптических эмиттеров на основе кремниевых наноструктур.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Создана установка для проведения измерений статической магнитной восприимчивости в условиях оптической накачки монохроматическим светом с целью изучения магнитных свойств метастабильных дефектов с отрицательной корреляционной энергией в интервале температур $3,5 \div 300 K$.

2. Температурные зависимости статической магнитной восприимчивости халькогенидных стекол As_2S_3 , полученные в условиях оптической накачки, а также - спектры оптически индуцированного поглощения позволили идентифицировать процессы самокомпенсации метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией, образованных оборванными связями халькогена и мышьяка.

3. Экспериментально установлено, что наблюдаемая самокомпенсация является следствием спонтанной диссоциации при понижении температуры метастабильного одноэлектронного глубокого центра D^0 , обладающего отрицательной корреляционной энергией, с формированием двухэлектронного D^- и пустого D^+ состояний:



где U – хаббардовская корреляционная энергия ($U < 0$).

4. Предложена модель глубокого метастабильного центра с отрицательной корреляционной энергией, в рамках которой двухэлектронные адиабатические потенциалы и эквивалентные зонные схемы демонстрируют механизмы спонтанной диссоциации при охлаждении халькогенидных стекол, а также – оптического тушения и регенерации одноэлектронных состояний оборванных связей при низких температурах.

5. Показано, что метастабильные оборванные связи халькогена и мышьяка самокомпенсируются с образованием электрических диполей, поле которых формирует урбаховский край в спектральных зависимостях поглощения. Обнаружено, что оптически индуцированная трансформация параллельно ориентированных электрических диполей в антипараллельные, которая контролировалась по изменениям в температурных зависимостях магнитной восприимчивости, приводит к исчезновению “урбаховского хвоста” в спектрах краевого поглощения, демонстрирующих “просветление” халькогенидных стекол.

5. Впервые проведены магнитооптические измерения температурной и полевой зависимостей статической магнитной восприимчивости кристаллов CdF_2 , содержащих DX – центры индия.

6. Обнаружен фотоиндуцированный парамагнетизм кристаллов $CdF_2 \langle In \rangle$, возникающий вследствие метастабильности DX – центров индия, обладающих отрицательной корреляционной энергией.

7. Впервые получены температурные и полевые зависимости статической магнитной восприимчивости кристаллов соединений $A^{III}B^V$, легированных редкоземельными элементами.

8. Экспериментально установлено, что основной вклад в магнетизм кристаллов $A^{III}B^V \langle Ln \rangle$ вносят квазимолекулы Ln_2O_3 , внутри которых пары ионов Ln^{3+} антиферроупорядочены вследствие обменного взаимодействия Блумбергера-Роуланда через валентные электроны кислорода.

9. Обнаружено, что при низких температурах квазимолекулы Ln_2O_3 захватывают электроны с мелких доноров, которые посредством $s-f$ - обмена трансформируют пару ионов Ln^{3+} из антиферро- в ферроупорядоченное состояние.

Конкурирующим процессом образованию одиночных ферроупорядоченных квазимолекулярных центров является формирование в области высоких локальных концентраций Ln_2O_3 спин-поляронов, локализованных на мелких донорах.

10. Впервые показано, что одиночные ферроупорядоченные квазимолекулярные центры Ln_2O_3 и спин-поляроны, локализованные на мелких донорах, характеризуются в кристаллах $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$ большими значениями констант $s-f$ - обмена вследствие сильного электрон – колебательного взаимодействия и могут рассматриваться как аналоги метастабильных центров с отрицательной корреляционной энергией.

11. Впервые показано, что образование областей локального магнитоупорядочения – спин-поляронов позволяет полностью описать фотоэмиссионные спектры кристаллов $InP\langle Yb \rangle$.

12. Впервые показано, что формирование в запрещенной зоне кристалла глубокого обменно-связанного уровня ферроупорядоченного квазимолекулярного центра Ln_2O_3 стимулирует оже-рекомбинацию неравновесных носителей, которая резко усиливает внутрицентровую фотолюминесценцию ионов Yb^{3+} в кристаллах $InP\langle Yb \rangle$.

13. Установлено, что формирование спин-поляронов, локализованных на мелких донорах, приводит к суперпарамагнетизму кристаллов $A^{III}B^V\langle Ln \rangle$ при низких температурах.

14. Данные ЭПР и поведение температурных зависимостей магнитной восприимчивости кристаллов $\alpha-LiIO_3$, содержащих примеси редких земель, свидетельствуют об интенсивном формировании антиферроупорядоченных квазимолекулярных центров редкоземельных элементов при их введении в кристалл.

15. Обнаружены диамагнитные свойства поверхности монокристаллического кремния (100), которые обусловлены диамагнетизмом Ландау невырожденного двумерного газа свободных носителей тока, туннелирующих через синглетные состояния димеров, сформированных в результате реконструкции поверхностных оборванных связей.

16. Установлено, что граница раздела кремний – окисел демонстрирует парамагнитные свойства вследствие процессов магнитоупорядочения как одноэлектронных, так и двухэлектронных состояний оборванных связей, которые описываются в рамках парамагнетизма Кюри и ван-Флекковского парамагнетизма.

17. Обнаружено, что самоупорядоченные примесные сверхрешетки в кремнии проявляют диамагнитные свойства, которые усиливаются при низких температурах в слабых магнитных полях.

18. Показано, что подобное поведение может быть обусловлено диамагнетизмом Ландау невырожденного газа свободных дырок в квантовых ямах, туннелирующих через синглетные состояния примесных диполей $B^+ - B^-$, которые обладают свойствами центров с отрицательной корреляционной энергией внутри сильнолегированных двумерных барьеров.

19. Впервые исследованы магнитные свойства центров эрбия в кремниевых наноструктурах, демонстрирующие усиление парамагнетизма в условиях эффективного $s-f$ - взаимодействия в низкоразмерных системах.

20. Показано, что обменное рассеяние носителей тока с переворотом спина стимулирует генерацию магнитных моментов квазимолекул Er_2O_3 внутри кремниевых квантовых ям, тогда как туннелирование одиночных электронов (дырок) через заряженные квантовые точки приводит к возникновению магнитного момента как вследствие формирования ферроупорядоченного состояния квазимолекулярного центра Er_2O_3 , так и возбуждения квазимолекулы Er_2O_3 из синглетного в высокоспиновое состояние вследствие оже-процесса, обусловленного $sp-f$ - гибридизацией волновых функций.

21. Обнаружена эффективная внутрицентровая электролюминесценция иона Er^{3+} , входящего в состав квазимолекулы Er_2O_3 , содержащейся в кремниевой наноструктуре, которая обусловлена усилением $sp-f$ -гибридизации волновых функций в низкоразмерных системах.

22. Спектральная зависимость внутрицентральной электролюминесценции иона Er^{3+} позволила идентифицировать его мультиплетную структуру в решетке кремния, которая соответствует тригональной симметрии квазимолекулы Er_2O_3 .

Библиографический список цитированной литературы

1. Chenming Hu // Nanotechnology, 1999, v.10, p.113-116.
2. T.J. Thornton // Rep. Prog. Phys., 1994, v.58, p.311-316.
3. F. Capasso, S. Datta // Physics Today, 1990, v.43, p.74-81.
4. C. Weisbuch, B. Vinter // Quantum semiconductor structures. Academic Press, Boston, 1991, 362p.
5. S.T. Pantelides // Deep centers in semiconductors. N.Y., Gordon & Breach, 1986, 777p.
6. В.Ф. Мастеров // ФТП, 1984, т.18, №1, с.3-23.
7. N.T. Bagraev, V.A. Mashkov // Mat. Sci. Forum, 1986, v.10-12, p.435-444.
8. G.D. Watkins // Negative- U properties for defects in semiconductors. Festkoerperprobleme, 1984, v.XXIV, p.263-291.
9. Н. Мотт, Э. Дэвис // Электронные процессы в некристаллических веществах, М., Мир, 1982, 662с.

10. S.C. Agarwal // Phys. Rev. B, 1973, v.7, p.685-688.
11. P.W. Anderson // Phys. Rev. Lett. 1975, v. 34, p.953-955.
12. S.G. Bishop, U. Strom, P.C. Taylor // Phys. Rev. B, 1977, v. 15, p.2278-2294.
13. A.I. Ryskin, A.S. Shcheulin, B. Koziarska, J.M. Langer, A. Suchocki,
I.I. Buczinskaya, P.P. Fedorov, B.P. Sobolev // Appl. Phys. Lett., 1995, v.67, p.31-35.
14. Н.Т. Баграев // Изв. АН СССР, сер. физ., 1983, т. 47, №12, с.2331-2337.
15. G. Aszodi, J. Weber, Ch. Uihlein, L. Pu-lin, H. Ennen, U. Kaufmann,
J. Schneider, J. Windscheif // Phys. Rev. B, 1985, v.31, No.12, p. 7767-7771.
16. J. Robertson // Adv. Phys., 1983, v.32, No.3, p.361-452.
17. R.N. Bhargava, D. Gallagher, X. Hong, A. Nurmikko // Phys. Rev. Lett., 1994,
v.72, No.3, p.416-469.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков. Магнитная восприимчивость кристаллов фосфида галлия, легированных редкоземельными элементами. ФТП, 1978, т.12, №8, с.1616-1618.
2. В.А. Касаткин, Ф.П. Кесаманлы, В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков // Поведение редких земель в фосфиде галлия. В сб. “Тезисы докладов Республиканского симпозиума по физическим свойствам сложных полупроводников”. Баку, 1978. с.4.
3. В.А. Касаткин, Ф.П. Кесаманлы, В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков // Влияние примесей лантаноидов на свойства *GaP*. Изв. АН СССР, Неорган. материалы, 1980, т.16, №11, с.1901-1905.
4. В.В. Романов, Б.Е. Саморуков // Магнитная восприимчивость кристаллов *GaP(Dy)*. Изв. ВУЗов, Физика, 1980, №9, с.103-104.
5. В.А. Касаткин, В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков, К.Ф. Штельмах // О состоянии примеси *Yb* в кристаллах *InP*. ФТП, 1982, т.16, с.173-175.
6. В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков, К.Ф. Штельмах // ЭПР и парамагнитная релаксация гадолиния в *InP*. ФТП, 1982, т.17, с.948-950.
7. Л.Ф. Захаренков, В.А. Касаткин, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков, К.Ф. Штельмах // Спектроскопия ионов лантаноидов в фосфидах галлия и индия. В сб. “Тезисы докладов VII Всесоюзного симпозиума по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов”. Ленинград, ЛПИ, 1982, с.167.
8. В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, К.Ф. Штельмах // Парамагнитный резонанс и релаксация трехвалентного иттербия в фосфиде индия. ФТТ, 1983, т.25, с.1435-1438.
9. Л.Ф. Захаренков, А.М. Зыков, В.В. Романов, Б.Е. Саморуков // Поведение марганца в фосфиде индия. Изв. АН СССР, Неорган. материалы, 1983, т.19, с. 1245-1249.
10. В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, К.Ф. Штельмах // Анализ параметров

- спектров ЭПР центров лантаноидов в фосфиде индия. В сб. “Тез. докл. Всесоюзного симпозиума по спектроскопии кристаллов, активированных ионами редкоземельных и переходных металлов”. Свердловск, 1985, с.104.
11. В.В. Романов, К.Ф. Штельмах. Распад твердых растворов лантаноидов в фосфиде индия. В сб. Тезисы докладов Всесоюзной конференции “Физические основы надежности и деградации полупроводниковых приборов”, Кишинев, 1986, с.71.
 12. Б.М. Бутгаев, А.В. Голубков, В.В. Романов, М.В. Романова, И.А. Смирнов // Электросопротивление и магнитная восприимчивость $Tm_{1-x}La_xS$. В сб. “Тезисы докладов Всесоюзной школы по физике и химии РЗЭ”, Красноярск, 1989, с.14-15.
 13. И.М. Аскеров, В.Ф. Мастеров, В.В. Романов, К.Ф. Штельмах // ЭПР и магнитная восприимчивость дефектных кристаллов $A^{III}B^{IV}$, легированных марганцем. ФТП, 1990, т.23, с. 1305-1307.
 14. Б.М. Бутгаев, А.В. Голубков, В.В. Романов, М.В. Романова, И.А. Смирнов // $Tm_{1-x}La_xS$ - новая концентрированная Кондо-система. ФТТ, 1990, т.32, с.2354-2362.
 15. К.Ф. Штельмах, Л.Ф. Захаренков, В.В. Романов, И.А. Терлецкий, С.В. Штельмах // Исследование состава, структуры и магнитных свойств фосфида индия, легированного европием. ФТП, 1990, т.24, № 8, с.1482-1485.
 16. В.В. Романов, И.А. Терлецкий, К.Ф. Штельмах // О состоянии европия в фосфиде индия. ФТП, 1990, т.24, с.1584-1589.
 17. Н.Т. Баграев, Д.М. Дараселия, Д.Л. Джапаридзе, В.В. Романов, Т.И. Санадзе // Магнитные свойства монокристаллов $\alpha-LiIO_3$, содержащих ионы редкоземельных элементов, ФТТ, 1990, т.32, с.2814-2816.
 18. N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, M.P. Korobkov, V.V. Romanov // Double-hole tunneling in single-hole silicon transistor: Cooper pair charging. Abstracts of the Int. symp. “Nanostructures”: Physics and Technology. Edited by Zh. Alferov and L. Esaki, St.Petersburg, Russia, 1996, p.400-403.
 19. N.T. Bagraev, L.E. Klyachkin, V.V. Romanov // High temperature single-hole silicon transistors. Preprints of Int. workshop on NDTCS-97, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia, 1997, p.C2-8.
 20. S.A. Kazanskii, A.I. Ryskin, V.V. Romanov // Paramagnetic susceptibility of semiconducting $CdF_2:In$ crystals: Direct evidence of negative- U nature of the DX -like center. Appl. Phys. Lett., 1997, v. 70, p. 1272-1274.
 21. С.А. Казанский, А.И. Рыскин, В.В. Романов // Парамагнитная восприимчивость аддитивно окрашенных фотохромных кристаллов $CdF_2:In$. ФТТ, 1997, т. 39, с. 1205-1209.
 22. V.Yu. Davidov, V.F. Masterov, I.G. Ozerov, V.V. Romanov, N.A. Sobolev, K.F. Shtelmah // Magnetic properties of implanted erbium layers in semiconductors. Preprints of Int. workshop on NDTCS-98, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia, 1997, p.B-13.

23. N.T. Bagraev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A. Naeser, V.V. Romanov // "High temperature single-hole silicon transistors", in Int. workshop on NDTCS-97, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia. Proceedings of SPIE, 1998, v.3345, p.166-174.
24. N.T. Bagraev, V.E. Gasumyants, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A. Naeser, V.V. Romanov, S.A. Rykov, E.V. Vladimirskaya // Pair charge correlations localized on shallow-level centers inside self-assembly silicon quantum wells. Abstracts of the 8th Int. conf. on shallow level centers in semiconductors (SLCS-98), Montpellier, France, 1998, p.46.
25. Н.Т. Баграев, А.Д. Буравлев, Е.В. Владимирская, В.Е. Гасумянц, В. Гельхофф, Л.Е. Клячкин, А.М. Маляренко, А. Незер, В.В. Романов, С.А. Рыков // Квантовые точечные контакты в кремниевых наноструктурах. Тезисы Всероссийской конф. "Микро- и наноэлектроника - 98" (МНЭ-98), Звенигород, 1998, с.46.
26. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, V.E. Gasumyants, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A. Naeser, V.V. Romanov, S.A. Rykov, E.V. Vladimirskaya // Pair charge correlations in silicon nanostructures. Preprints of Int. workshop on NDTCS-98, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia, 1998, p.B 3-4.
27. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, V.E. Gasumyants, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, A. Naeser, V.V. Romanov, S.A. Rykov, E.V. Vladimirskaya // Pair charge correlations in silicon nanostructures, in Int. workshop on NDTCS-98, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia, Proceedings of SPIE, 1999, v.3687, p.105-111.
28. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, M.M. Mezdrogina, A. Naeser, V.V. Romanov, S.A. Rykov // Optical and magnetic properties for erbium-related centers in self-assembly silicon nanostructures. Preprints of Int. workshop on NDTCS-99, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia. Proceedings of SPAS, 1999, v.3, p.B20-21.
29. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, M.M. Mezdrogina, A. Naeser, V.V. Romanov, S.A. Rykov // Optical and magnetic properties for erbium-related centers in self-assembly silicon nanostructures. Physica B, 1999, v.274, p.967-970.
30. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, M.M. Mezdrogina, A. Naeser, V.V. Romanov, S.A. Rykov // Optical and magnetic properties for erbium-related centers in self-assembly silicon nanostructures, in Int. workshop on NDTCS-1999, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia. Proceedings of SPIE, 2000, v.4064, p.119-124.
31. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, M.M. Mezdrogina, V.V. Romanov, A.P. Skvortsov // Light emission from erbium doped nanostructures embedded in silicon microcavities. Preprints of Int. workshop on NDTCS-2001, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia. Proceedings of SPAS, 2001, v.5, p.B18-19.
32. N.T. Bagraev, V.V. Romanov // Magnetic properties and luminescence of

- Yb* - related centers in InP. Preprints of Int. workshop on NDTCS-2001, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia. Proceedings of SPAS, 2001, v.5, p.B22-23.
33. N.T. Bagraev, L.N. Blinov, V.V. Romanov // Magnetic properties for metastable negative- U defects in amorphous semiconductors, in Int. workshop on NDTCS-2000, edited by A. Melker, St.Petersburg, Russia. Proceedings of SPIE, 2001, v.4348, p.119-124.
 34. N.T. Bagraev, A.D. Buravlev, W. Gehlhoff, L.E. Klyachkin, A.M. Malyarenko, M.M. Mezdrogina, V.V. Romanov, A.P. Skvortsov // Light emission from erbium doped nanostructures embedded in silicon microcavities. Physica B, 2001, v.308, p. 365-368.
 35. N.T. Bagraev, L.N. Blinov, V.V. Romanov // Magnetic properties for metastable negative- U defects in amorphous semiconductors. Sol. St. Comm., 2002, v.121, p.417-421.
 36. Н.Т. Баграев, Л.Н. Блинов, В.В. Романов // Самокомпенсация метастабильных центров в халькогенидных полупроводниковых стеклах. ФТТ, 2002, т.44, с.11-17.