

На правах рукописи

**СОМОВА НАТАЛЬЯ ЮРЬЕВНА**

**ОБМЕННОЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ И КОЛЛЕКТИВНЫЕ СВОЙСТВА  
ЭКСИТОНОВ В НАНОСИСТЕМАХ EuO-SrO**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Москва - 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н.Толстого»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Головнев Юрий Филиппович**

Официальные оппоненты: **Вахитов Роберт Миннисламович**, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет», заведующий кафедрой теоретической физики физико-технического института

**Ситников Александр Викторович**, доктор физико-математических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры физики твердого тела факультета радиотехники и электроники

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Юго-Западный государственный университет» (ФГБОУ ВО «ЮЗГУ»)

Защита состоится «15» февраля 2017 г. в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана» по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, МГТУ имени Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э.Баумана и на сайтах [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru), [www.bmstu-kaluga.ru](http://www.bmstu-kaluga.ru).

Автореферат разослан: «\_\_» 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к. т. н., доцент

Лоскутов Сергей Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Развитие спинtronики после открытия гигантского магнетосопротивления дало много других эффектов, связанных с управлением и воздействием на спин электрона. Эта область научных исследований расширяется в новых направлениях, например, создание лазера в данном диапазоне длин волн, что слабо представлено в научной литературе, в основе которой лежат новые экспериментальные данные для гетероструктур ферромагнитный полупроводник - парамагнитный полупроводник. Современные научные исследования явлений переноса спина открывают новые горизонты для практических применений. Использование свойств спина и когерентности его в наноразмерных структурах способствует тому, что спинtronике и экситонике подлежит занять важнейшее место в науке и технологи XXI века.

Так же в последнее время среди объектов физики конденсированного состояния значительный интерес представляют гетеросистемы из нанослоев. В таких материалах поведение электронов ( $e$ ) и дырок ( $h$ ) изменяется радикальным образом из-за квантово-размерного эффекта, где зоны проводимости и валентные зоны дробятся дополнительным периодическим потенциалом на минизоны, что приводит к перераспределению плотности  $e$  и  $h$  в области гетерограниц.

Обменное взаимодействие носителя заряда и электронов, локализованных на  $4f^7$  – оболочках ионов  $Eu^{2+}$  при температуре ниже точки Кюри  $T_k$  определяет магнитные свойства ферромагнитных полупроводников. Для ферромагнитного полупроводника  $EuO$  характерны магнитные (триплетные) экситоны, время жизни которых на несколько порядков больше времени жизни экситонов в немагнитных кристаллах, т.к. спины электронов и дырок выстраиваются параллельно друг другу из-за ферромагнитного характера обмена при  $T < T_k$ . В работе показано, что энергия состояния с параллельными спинами меньше и экситоны находятся в триплетном состоянии.

**Цель диссертационного исследования** – исследовать природу обменного взаимодействия и его влияние на коллективные свойства триплетных экситонов в наногетеросистемах на основе ферромагнитных полупроводников  $EuO-SrO$ , которые влияют на образование магнитных экситонов. Для достижения поставленной цели в работе **решались следующие задачи**:

- определение условия образования наносистем из ферромагнитного полупроводника  $EuO$  и парамагнитного полупроводника  $SrO$ ;
- анализ возникновения  $s-f$  и  $d-f$  – обменного взаимодействия и его влияние на основные параметры магнитных экситонов наногетеросистемы  $EuO – SrO$ : энергию связи, силу осциллятора, время жизни и образование магнитных поляронов.
- теоретически исследовать влияние обменного взаимодействия на коллективные свойства триплетных экситонов.
- рассмотреть условия конденсации магнитных экситонов и образование бозе-эйнштейновского конденсата (БЭК) и электронно-дырочной жидкости (ЭДЖ) и построить соответствующие диаграммы.

- анализ кинетики образования ортоэкситонов в наносистемах  $EuO - SrO$ : определение времени энергетической и спиновой релаксации, влияние на них интерфейсного и химического состава гетеропереходов.

**Научная новизна работы** состоит в том, что в ней впервые:

- исследованы наногетеросистемы  $EuO - SrO$ ;
- изучено влияние на свойства экситонов и их коллективные свойства обменного взаимодействия;
- дан анализ условий образования бозе – эйнштейновского конденсата для наносистемы  $EuO - SrO$ ;
- проведен достаточно полный теоретический анализ, который позволяет считать, что наносистема  $EuO - SrO$  может быть использована в практических приложениях: спиновом светодиоде, транзисторах и других устройствах.

**Теоретическая и практическая значимость работы** определяется тем, что

- проведен отбор гетеропары ферромагнитный полупроводник - парамагнитный полупроводник с максимальным соответствием кристаллических параметров;

- определены параметры и условия применения наноразмерных гетеросистем на основе ферромагнитных полупроводников в различных областях микроэлектроники;

- предложенная модель сверхрешетки  $EuO - SrO$  может использоваться при создании современных устройств памяти, спиновых транзисторах и светофиодах.

**Методология и методы исследования:**

Направление исследований, связанное с переносом спина электрона в начале 2000 г. стало наиболее актуальным исследованием в физике.

Методы и приближения, которые используются при анализе и расчетах в работе, подробно изложены в монографиях: Метфессел З. и Маттис Д., Нагаева Э.Л., Москаленко С.А., Слэтера Д.К., Хакена Г., Хермана М. и др., а также в трех монографиях Головнева Ю.Ф.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

- обоснование и выбор сверхрешетки на основе ферромагнитного полупроводника  $EuO$  и парамагнитного полупроводника  $SrO$ ;

- определение влияния обменного взаимодействия на энергию связи, силу осциллятора и время жизни магнитного экситона;

- анализ влияния обменного взаимодействия на коллективные свойства магнитных экситонов и их конденсацию (ЭДЖ и образование БЭК).

**Достоверность полученных результатов** обеспечена корректной постановкой задач с использованием соответствующих уравнений физики, применение для их решения теоретически обоснованных методов, а также согласием результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными.

**Личный вклад автора.** Автором работы получены основные результаты и сформулированы научные положения, выносимые на защиту. Им также проведен анализ возможности использования полученных результатов теоретических исследований в практических приложениях и подготовлены все материалы к опубликованию. Выбор объектов исследования наносистем, и исследование их

основных свойств выполнены с участием Головнева Ю.Ф., Нургулеева Д.А. и Лаковцева А.Б.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы обсуждались и докладывались на VI Международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела» ФТТ- 2013 (Минск, 2013); II Международной конференции «Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии», посвященная памяти профессора А.Н.Никитина ММСН II (Тула, 2014); научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, магистрантов, соискателей ТГПУ им. Л.Н.Толстого «Университет XXI века: исследования в рамках научных школ» (Тула, 2013), VII, VIII Всероссийской школе – семинар для студентов, аспирантов и молодых ученых по направлению «Диагностика наноматериалов и наноструктур» Рязанский государственный радиотехнический университет (Рязань, 2014, 2015 гг.), 16 всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто - и наноэлектронике (Санкт-Петербург, 2014), XI Региональная научно-практическая конференция аспирантов, соискателей, молодых учёных и магистрантов «Исследовательский потенциал молодых ученых: взгляд в будущее» (Тула, 2015).

**Публикации.** Основные результаты диссертации отражены в 23 работах, в том числе 6 статей в ведущих рецензируемых научных журналах из Перечня ВАК РФ и 1 монография. Общим объемом 7,75 п.л.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, применения, общих выводов, списка используемой литературы, включающего 137 наименований, и изложена на 130 страницах машинописного текста, в том числе 37 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выносимые на защиту, указаны научная и практическая значимость результатов.

**Первая глава** отражает современное состояние изученности темы, критически рассмотрены результаты исследований обменного взаимодействия в сверхрешетках на основе ферромагнитных полупроводников, выявлены вопросы, требующие решения в данной работе.

Первопричиной перехода от изучения индивидуальных свойств экситонов к исследованию их колективного поведения является обменное взаимодействие, которое особенно существенно проявляется в спиновых сверхрешетках. Часть разделов монографии Хермана посвящена гетероструктурам с квантовыми ямами, диссертации Бричкина А.С., Минцева А.В. и др., которые обобщенно можно назвать как полумагнитный полупроводник – парамагнитный полупроводник (пм – пп). Целью этих работ являлось экспериментальное исследование влияния *sp* - *d* обменного взаимодействия на энергию и тонкую структуру экситонных состояний в полумагнитных наногетероструктурах.

Полумагнитные полупроводники могут быть широкозонными  $Cd_{1-x}Mn_xTe$  и узкозонными  $Hg_{1-x}Mn_xTe$ , а магнитными добавками к ним могут быть ионы переходных металлов  $Mn$ ,  $Fe$ ,  $Co$ ... или редкоземельных элементов  $Eu$ ,  $Sm$ ,  $Yb$ ... За

последние 35 лет подробно изучены оптические и магнитные характеристики материалов этого класса. В частности, открыто гигантское спиновое расщепление зонных расстояний, магнитополярный эффект и гигантское фарадеевское вращение плоскости по поляризации света. Заметное влияние на магнитные и оптические свойства этих материалов оказывает система магнитных ионов, с которой связаны электроны и дырки через  $sp-d$  – обменное взаимодействие. Эта связь действует на спиновое состояние последних и приводит к различным магнитооптическим эффектам. Отличительной особенностью полумагнитных полупроводников является наличие системы магнитных ионов, которые оказывают большое влияние на электрические, оптические и магнитные свойства материала. Электроны и дырки связаны с магнитной системой, в свою очередь это влияет на спиновое состояние носителей и приводит к различным магнитооптическим эффектам.

Отличительной чертой гетероструктур с ферромагнитными слоями является наличие косвенного обменного взаимодействия предполагающее, что в состав незаполненных  $d-f$ -оболочек входят локализованные электроны, связь между которыми осуществляется электронами проводимости. Спины электронов проводимости вносят вклад в полный момент ферромагнитного кристалла, который по своему значению мал с вкладом локализованных электронов, в свою очередь свободные электроны определяют его характер и делают возможным магнитное упорядочение, так как они переносят взаимодействие, при своем движении по кристаллу, между спинами локализованных электронов.

Наиболее перспективными наносистемами являются спиновые сверхрешетки как в плане теоретического изучения, так и в практическом их применении. Особенно среди них следует выделить наноструктуры на основе ферромагнитных полупроводников. Если ряд наносистем типа  $EuS-PbS$ ,  $SmS-EuS$  на сегодня изучены достаточно подробно, то практически совсем не исследованы наноструктуры на основе ферромагнитного полупроводника  $EuO$ , который по ряду параметров ( $T_k$ , положению  $4f^7$ -уровней, энергии связи экситонов и т.д.) выгодно в практическом приложении отличается от других ферромагнитных полупроводников.

**Во второй главе** рассмотрена гетероструктура на базе ферромагнитного полупроводника  $EuO$  и парамагнитного полупроводника  $SrO$ . Они имеют одинаковые кристаллические решетки – кубические гранецентрированные решетки типа  $NaCl$ . Параметр кристаллической решетки у полупроводников практически одинаков, у  $EuO$   $a=0,514\text{ \AA}$ , а у  $SrO$   $a=0,515\text{ \AA}$ , поэтому рассогласование кристаллических решеток  $EuO$  и  $SrO$   $\Delta a \approx 0,2\%$  (по модели Алферова и Кремера рассогласование должно быть не более 0,5%).

Соединение  $EuO$  обладает полупроводниковыми свойствами и является ферромагнетиком с точкой Кюри 70 K и даже до 150 K (в зависимости от стехиометрии кислорода).

Запишем эффективный электронный гамильтониан с учетом обменного поля:

$$\hat{H} = \sum_n \hat{H}_n + \frac{1}{2} \sum_{n,m} V_{n,m}, \quad (1)$$

где  $V_{nm}$  – оператор кулоновского и обменного взаимодействий двух ионов ( $n \neq m$ ),  $\hat{H}_n$  - оператор энергии отдельного иона, который можно определить по формуле:

$$\begin{aligned} \hat{H}_n = & \sum_{\gamma} (\varepsilon_f + \Delta\varepsilon_{\gamma} + \sigma\mu_B g H_{\phi}) a_{n\gamma\downarrow}^+ a_{n\gamma\sigma}^- + \dots \\ & + \frac{1}{2} \sum_{\gamma_1, \dots, \gamma_4} \langle n\gamma_1, n\gamma_2 | n\gamma_3, n\gamma_4 \rangle a_{n\gamma\sigma_1}^+ a_{n\gamma_2\sigma_2}^+ a_{n\gamma_3\sigma_2}^- \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $H_{\phi}$  – обменное поле,  $a^+$  (a) – операторы рождения (уничтожения) электронов с соответствующим направлением спина,  $\mu_B$  – магнетон Бора,  $g$  – фактор,  $\sigma = \pm \frac{1}{2}$ ,  $(\varepsilon_f + \Delta\varepsilon_{\gamma})$  –

энергия магнитного электрона на орбитали  $\gamma$  (сумма энергии электрона в свободном ионе и добавки из-за взаимодействия его с соседями),  $\gamma$  - орбиталь.

При возбуждении светом  $\hbar\omega$  в слое  $EuO$  электрон переходит с  $4f^7$ - зоны на  $5d$ - уровень, который находится под дном зоны проводимости и кулоновским притяжением образует с дыркой активный магнитный экситон. При данном образовании экситон оказывается в синглетном состоянии, следовательно, время жизни такого экситона резко уменьшается. Такие экситоны называют «крыхлыми» и наблюдать их экспериментально вызывает большие трудности (Рис.1).

Оптически активным состоянием магнитного экситона должно быть  $5d-5d$  – типа (Рис.2), т.к. возникает выигрыш в трансляционной энергии. Электрон локализуется в точке  $X_3$ , а энергия межъямного (триплетного) экситона включает энергию  $d-f$ –обменного взаимодействия:

$$\hat{H}_{ob} = -2 \sum_n J_{in}^d \hat{\vec{S}}_{e_i} \hat{\vec{S}}_{Eu_n}. \quad (3)$$

В (3)  $\hat{\vec{S}}_{e_i}$  и  $\hat{\vec{S}}_{Eu_n}$  – спиновые операторы электрона и европия,  $J_{in}^d$  – константа обменного взаимодействия.

Тогда получим следующую модель: свободную молекулу и свободный ион  $Eu^{2+}$ . Молекула будет состоять из центрального иона  $Eu^{3+}$ , двенадцати ближайших соседних ионов  $Eu^{2+}$  и добавочного электрона. Спины связаны  $d-f$ -обменным взаимодействием:

$$\hat{H} = -2\vec{S}_e [J_0 S_c + J_1 S_u], \quad \vec{S}_u = \sum_n \vec{S}_{Eu_n}. \quad (4)$$

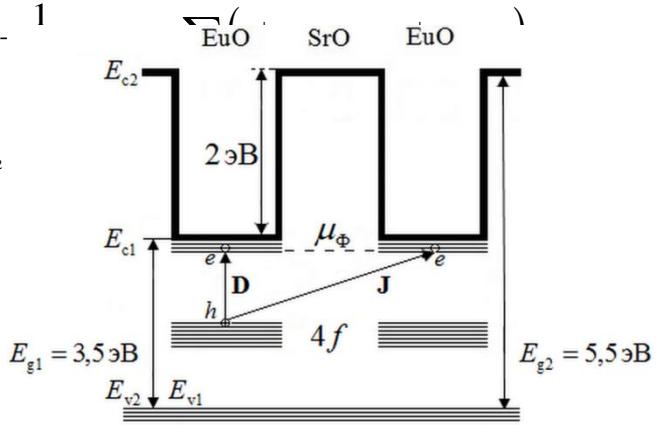


Рис. 1. Механизмы образования прямых и межъбарьерных экситонов в сверхрешетке  $EuO-SrO$

В (4) суммирование проводится по спинам ближайших атомов  $\text{Eu}_n^{2+}$  (их 12). Взаимодействия описываются методом молекулярного поля, а представление о межъямном экситоне и туннелирующем электроне дается через образовавшийся магнитный полярон

Направление спина дырки в  $4f$ -зоне и спина электрона на  $5d$ -уровне совпадают (триплетный экситон). Так как в узкой  $4f$ -зоне находится тяжелая дырка триплетного экситона, то такое возбуждение приводит к статическому образованию. В соседней квантовой яме добавочный электрон является оптически активным электроном  $d-d$  типа и обладает таким же типом симметрии, что и дырка ( $^7P$ ). Энергия, такого межъямного триплетного экситона, будет включать в себя энергию  $d-f$ -обменного взаимодействия:

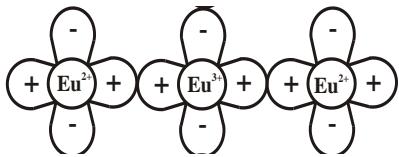


Рис.2. Механизмы образования магнитного экситона

обменного взаимодействия:

$$\hat{H}_{\text{об}} = -2 \sum_n J_{in}^d \vec{\sigma}_i \vec{S}_n ,$$

где  $\vec{\sigma}_i$  и  $\vec{S}_n$  – спиновые операторы добавочного электрона магнитного экситона и  $4f$ -атомов европия в  $n$ -узле,  $J_{in}^d$  – константа обменного взаимодействия.

Ширина запрещенной зоны при отсутствии легирования у  $\text{SrO}$  составляет 5,8 эВ, а у  $\text{EuO}$  она равна 3,6 эВ, то есть окись стронция является барьерным слоем, а квантовая яма образована нанослоем  $\text{EuO}$ , который при температуре ниже точки Кюри ( $T_c \approx 70 \text{ K}$ ) является ферромагнитным. Что приводит к снижению энергии  $5d$ -состояний ионов  $\text{Eu}^{2+}$  до 0,5 эВ при нижайшем переходе  $4^7f ({}^8S_{7/2}) \rightarrow 4^6f ({}^7F_0) 5d_{t_{2g}}$ . В этом случае при туннелировании через барьер  $\text{SrO}$  могут образоваться межъямные экситоны.

Путем легирования кислородом окиси стронция ( $\text{Sr}_{0,94}\text{O}_{0,06}$ ) можно получить другой стехиометрический состав, который приводит к уменьшению ширины его запрещенной зоны до 1,7 эВ, а у монослоя  $\text{EuO}_{1,06}$  до 2,6 эВ. В этом случае  $\text{EuO}$  становится барьером, а квантовая яма образуется нанослоями  $\text{SrO}$ . В таком случае при поглощении излучения в сверхрешетки будут образовываться межбарьерные триплетные экситоны. При этом узкая зона из  $4f(\uparrow)$ -уровней будет находиться практически на уровне дна зоны проводимости  $\text{Sr}_{0,94}\text{O}_{0,06}$ . (Рис.3).

В такой гетеросистеме в нанослоях окисла европия можно наблюдать прямые и межъямные экситоны, которые благодаря разрешенным электродиполь-

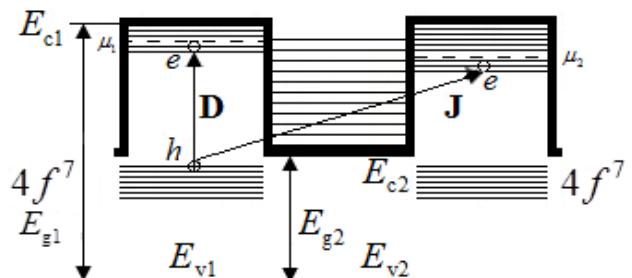


Рис.3. Схема энергетических уровней  $\text{EuO}_{1,06} - \text{Sr}_{0,94}\text{O}_{0,06} - \text{EuO}_{1,06}$  и переходов экситонных электронов при оптическом возбуждении

ным  $4f \rightarrow 5d$  переходами при  $T < T_k$  и энергии возбуждения не выше 1,1 эВ в обменном поле  $H_{\phi}$  будут магнитными.

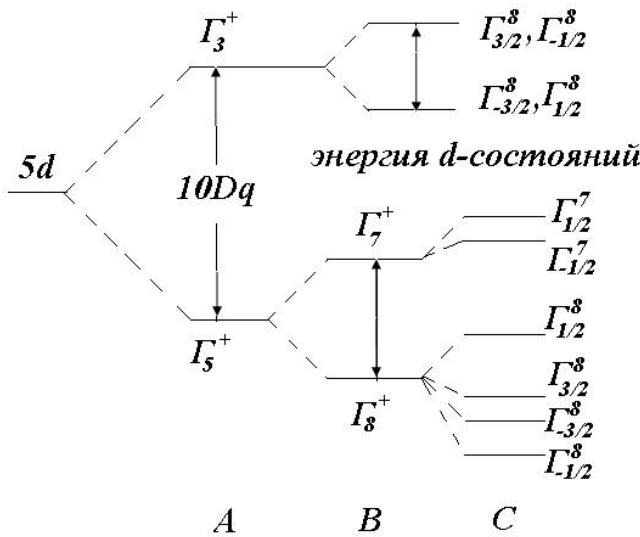


Рис. 4. Схема уровней 5d-состояний в EuO. А – расщепление кристаллическим полем; В – расщепление вследствие спин-орбитального взаимодействия; С – расщепление в обменном поле

нов благодаря зависимости электрического дипольного момента от спина, когда рождаются два экситона или два магнона. Спектр поглощения обнаруживает заметный максимум, который соответствует  $4f^7 \rightarrow 4f^65d$  – переходу, а красное смещение связывается с возбужденными состояниями и обусловлено изменениями перекрытия  $\Gamma_5$  – электронных орбит. В частности пик поглощения при 1,5 эВ идентифицируют как триплет в соответствии с поведением, ожидаемым для  $4f^7 - 4f^65d$  – перехода. При этом обменное расщепление полосы  $\Gamma_5$  дает значение 0,25 эВ. Структура полос и схема расположения 5d-уровней показана на Рис. 4.

Спиновое вырождение основного состояния  $j$  – го иона европия снимается полем  $\vec{H}_{\phi}(i)$  вследствие Зеемановского расщепления

$$\hat{H}(j) = 2\mu_B \vec{S}_j \vec{H}_{\phi}(j), \quad (5)$$

Магнитооптические эффекты в экситонной области спектра ферромагнитных полупроводников часто интерпретируются на основе зеемановского расщепления (Рис.5), возникающего вследствие воздействия внешнего магнитного поля. В этом случае происходит ферромагнитное спиновое упорядочение, увеличивается энергия связи и время жизни экситонных состояний.

Анализ коллективных свойств ортоэкситонов продолжается и при теоретическом изучении их возможности туннелирования в наносистемах  $EuO - SrO - EuO$  при различном стехиометрическом составе. Показано, что туннелирование могут совершать только экситонные электроны, а экситонные дырки  $h$  из-за узости  $4f^7$  – зон, а значит большой  $m_h$ , не могут преодолеть соответствующие барьеры.

**В третьей главе** показано, что обменное взаимодействие играет большую роль в проблеме триплетных экситонов

благодаря зависимости электрического дипольного момента от спина, когда рождаются два экситона или два магнона. Спектр поглощения обнаруживает заметный максимум, который соответствует  $4f^7 \rightarrow 4f^65d$  – переходу, а красное смещение связывается с возбужденными состояниями и обусловлено изменениями перекрытия  $\Gamma_5$  – электронных орбит. В частности пик поглощения при 1,5 эВ идентифицируют как триплет в соответствии с поведением, ожидаемым для  $4f^7 - 4f^65d$  – перехода. При этом обменное расщепление полосы  $\Gamma_5$  дает значение 0,25 эВ. Структура полос и схема расположения 5d-уровней показана на Рис. 4.

Спиновое вырождение основного состояния  $j$  – го иона европия снимается полем  $\vec{H}_{\phi}(i)$  вследствие Зеемановского расщепления

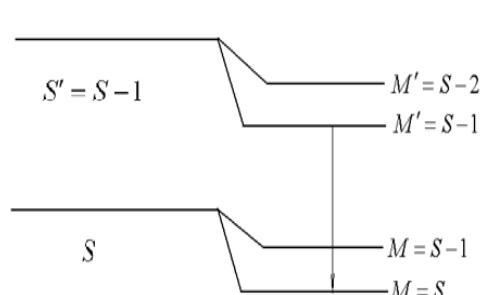


Рис. 5. Схема зеемановского расщепления и возбужденного уровней в молекулярном поле

В халькогенидах европия, электрон триплетного экситона находится в сильном магнитном поле  $4f$ -электронов, находящихся в запрещенной зоне, поэтому в подобной структуре следует ожидать описанные магнитооптические эффекты без приложения внешнего магнитного поля, что подтверждается экспериментами.

Объяснение влияния обменного взаимодействия на спектр можно свести к рассмотрению эффекта Зеемана с помощью теории молекулярного поля  $H_{\phi} = -\frac{J_{ie}\bar{S}_e}{\mu_B}$ , действующего на  $\vec{S}_i$ . Здесь  $\mu_B$  - магнетон Бора;  $\hat{\vec{S}}_e$  - операторы спина на соседних ионах, замененные их средним значением  $\bar{S}_e$  в наимизшем состоянии;  $J_{ie}$  - обменный интеграл. Тогда спиновое вырождение основного состояния  $i$ -го иона европия будет сниматься полем  $\vec{H}_{\phi}(i)$  вследствие зеемановского расщепления:

$$\hat{H}(i) = 2\mu_B \vec{S}_i \vec{H}_{\phi}(i). \quad (6)$$

Задача с центральным ионом  $Eu^{3+}$ , двенадцатью ближайшими соседями  $Eu^{2+}$  и  $5d_{t_{2g}}$  – состояниями экситонного электрона можно решить точно. В этом случае и магнитные, и аномальные свойства такой системы рассматриваются с помощью модели обменного (молекулярного) поля. Спиновый гамильтониан такой системы имеет вид:

$$\vec{H}_{\phi} = -\sum_{n>m} J_{mn} S_n S_m - 2 \sum_{d,n} J_{d,n} \sigma_d S_n - 4 \sum_{d,d'} J_{d,d'} \sigma_d \sigma_{d'} \quad (7)$$

где первый член описывает прямой обмен между  $4f^7$ -электронами  $n$  и  $m$  узлов, второй –  $d-f$ -обменную связь между  $5d_{t_{2g}}$  – электроном и  $4f^7$ -электронами и третий – обменную связь между  $5d_{t_{2g}}$  и  $5d'_{t_{2g}}$  – электронами. В нашей задаче достаточно рассмотреть модель с центральными ионом  $Eu^{3+}$ , ближайшими соседями  $Eu^{2+}$  и  $5d_{t_{2g}}$  электроном.

Еще в работе Метфесель Э., Маттис Д. «Магнитные полупроводники» было отмечено, что для разрешенных электрических дипольных переходов  $4f$ - $5d$  характерна большая сила осциллятора. Расчеты ее для  $Eu^{2+}$  были сделаны по

формуле  $f = \frac{mc}{\pi e^2 N} \int \alpha d\nu$ , где  $N$  – число ионов, способных возбуждаться;  $\alpha$  – коэффициент поглощения,  $\nu$  – частота света; и дало действительно большие значения  $f = 0,01 \div 0,03$ . Для сравнения можно привести значение силы осциллятора для желтой серии  $Cu_2O$  ( $n=2$ )  $f_2 = 2,8 \cdot 10^{-6}$ .

Для межъядерного экситона расчет силы осциллятора на один электрон был проведен по формуле  $f_{v_0} = \frac{2m}{\hbar^2} (E_v - E_0) |F_v(0)|^2 |r_{nm}|^2$ , где  $|F_v(0)|^2$  – вероятность нахождения электрона на определенном узле, а  $F_v$  – волновая функция водородоподобного атома;  $(E_v - E_0)$  – энергия возбуждения.

Перед тем, как исследовать коллективные свойства триплетных экситонов, целесообразно было рассмотреть обменное взаимодействие  $s-f$  и  $d-f$  типа и его

влияние на зеемановское расщепление и образование  $4f^7$  - зоны (0,5 эВ) в запрещенной зоне  $EuO$ . Влияние этого взаимодействия на важные параметры ортоэкситонов: энергию связи, силу осциллятора, время жизни экситонов и другие параметры. Это позволяет использовать наносистемы  $EuO - SrO$  в практических приложениях.

**В четвёртой главе** проделан теоретический анализ коллективных свойств наносистем  $EuO - SrO$ , который показывает, что получение бозе-эйнштейновской конденсации при  $T < T_k$  наиболее целесообразно проводить в нанослоях  $EuO$ . Здесь по Боголюбову и Келдышу отчетливо проявляется эффект отталкивания ортоэкситонов.

В предлагаемой наногетеросистеме можно получить качественное описание двух фазовых переходов: переход экситонного газа в состояние электронно-дырочной жидкости и образование бозе-эйнштейновской конденсации экситонов.

Исходя из этой модели дадим качественное описание фазового перехода в состояние БЭК ортоэкситонов, которое описывается гамильтонианом  $\hat{H}$ :

$$\hat{H} = \sum_{\vec{k}} (E_{ex}(\vec{k}) - \mu_{ex}) a_{\vec{k}}^+ a_{\vec{k}} + \frac{1}{V} \sum_{\vec{k}, \vec{p}, \vec{q}} u a_{\vec{k}+\vec{q}}^+ a_{\vec{p}-\vec{q}}^+ a_{\vec{p}} a_{\vec{k}}, \quad (8)$$

где  $E_{ex}(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_{ex}} - R_y^{ex}$ ,  $u = 26\pi/3 a_{ex}^3 R_y^{ex}$ ,  $a_{\vec{k}}^+$  и  $a_{\vec{k}}$  - операторы рождения и уничтожения экситонов,  $E_g$  - ширина запрещенной зоны в ферромагнитном полупроводнике  $EuO$ ,  $m_{ex}$  - масса экситона,  $u$  - энергия экситон-экситонного взаимодействия диполь-дипольного типа (отталкивания),  $R_y^{ex}$  - энергия связи экситона (экситонный Ридберг с обратным знаком),  $a_{ex}$  - радиус экситона.

При переходе к расчету фазовой диаграммы будет использована известная формула:

$$P = - \left( \frac{\partial \bar{\Omega}}{\partial V} \right)_T, \quad (9)$$

где  $P$  – давление,  $V$  - объем,  $T$  - температура и  $\Omega$  – термодинамический потенциал, который необходимо рассчитать, используя сумму состояний  $z$  из выражения:  $\Omega = -k_B T \ln z$ , где  $z = S p e^{-\frac{\hat{H}}{k_B T}}$ .

Здесь пробный гамильтониан  $\hat{H}_n$  берется диагональным с неопределенной собственно энергетической частью  $\sum_{ex}(\vec{k})$ :

$$\hat{H}_n = \sum_{\vec{k}} [E_{ex}(\vec{k}) - \mu_{ex} + \sum_{ex}(\vec{k})] a_{\vec{k}}^+ a_{\vec{k}}, \quad (10)$$

где  $\sum_{ex}(\vec{k})$  находится из условия минимума  $\bar{\Omega}$

$$\frac{d\bar{\Omega}}{d \sum_{ex}(\vec{k})} = 0$$

Окончательно для термодинамического потенциала имеем:

$$\bar{\Omega} = -\frac{1}{2} \sum_{\vec{k}} \sum_{ex} \bar{n}_{ex}(\vec{k}) + k_B T \sum_{\vec{k}} \ln \left[ 1 - \exp \left( -\frac{E_{ex}(\vec{k}) - \mu_{ex} + \sum_{ex}}{k_B T} \right) \right]. \quad (11)$$

В дальнейших расчетах, будем использовать метод среднего поля по Хаугу и вариационный принцип Боголюбова, что приведет к следующей зависимости расстояния (безразмерного)  $\bar{r}$  между двумя экситонами:

$$\bar{r} = \frac{1}{\sqrt[3]{n_{ex} \cdot a_{ex}^3}}.$$

Анализ этой зависимости показал, что если температура станет ниже критической, то как следует из выражения  $\bar{\beta} = R_y^{ex}/2k_B T$

$$k_B T_k^{eh} = 0,71 R_y^{ex},$$

будут сосуществовать две стабильные фазы:

- фаза малой плотности, состоящая из газообразных ортоэкситонов;
- фаза высокой плотности, представляющая собой электронно-дырочную плазму.

**В пятой главе** дан подробный анализ кинетической модели с учетом туннелирования экситонных электронов  $e$ , где отражено влияние на туннелирование состава интерфейса, энергетической и спиновой релаксации и дано примерное время туннелирования  $e$  и рекомбинации  $e - h$ .

Проделан анализ влияния ферромагнитного порядка на основные параметры туннелирования и проведены расчеты прозрачности барьеров для разного направления спина, туннелирующего электрона

В резонансном туннелировании экситонных электронов участвуют те из них, энергии которых находятся вблизи уровня Ферми в пределах температурного размытия (Рис. 1). Из Рис. 1 видно, что ДКЯ наногетероструктуры  $EuO - SrO$  -  $EuO$  удовлетворяет условию резонансного туннелирования экситонного электрона из одной квантовой ямы через барьер  $SrO$  в соседнюю с образованием непрямого экситона  $I$ , т.к. в первой яме остается тяжелая дырка.

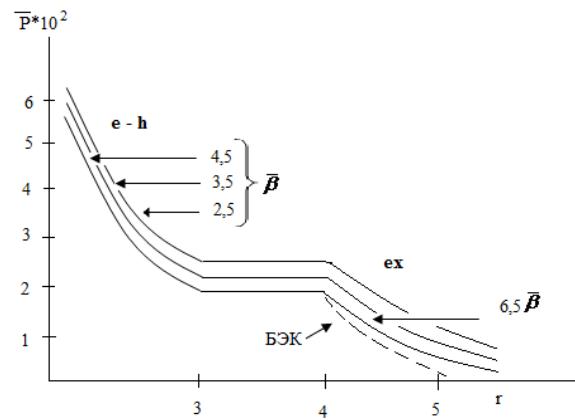


Рис. 6. Зависимость безразмерного расстояния между экситонами от безразмерного давления в сверхрешетках  $EuO - SrO$

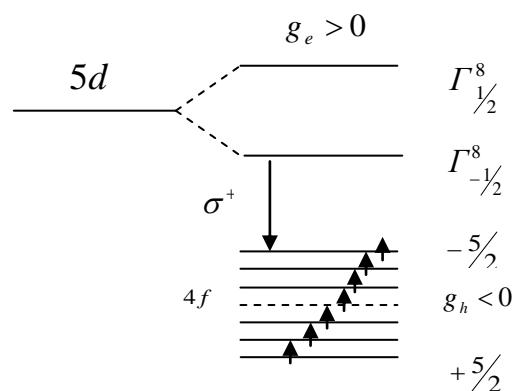


Рис.7. Схема оптического перехода  $\sigma^+$  в магнитной квантовой яме

Релаксация экситонов (энергетическая и спиновая) будет обусловлена обменным взаимодействием и приведет к  $\sigma^+$ -поляризованной компоненте в спектре при  $\vec{H}_{\phi} > 1$  Тл, что должно реализоваться в гетеросистеме из нанослоев  $EuO$  и  $SrO$  (Рис. 7).

При больших полях  $\vec{H}_{\phi}$  в  $\sigma^+$ -поляризованных спектрах люминесценции должна наблюдаться только излучательная рекомбинация экситонов из магнитных ям ( $EuO$ ) на низкоэнергетическом крыле линии фотолюминесценции, что свидетельствует об их сравнимой интенсивности в соседних ямах и об эффективной межъямной релаксации резонансно возбужденных экситонов. Это свидетельствует о межъямной релаксации (туннелировании) экситонов, возбужденных резонансно, что находит объяснение при анализе спиновой и энергетической релаксации в спин-зависимом потенциале сверхрешеток  $EuO/SrO$ .

Использованное упрощение для ДКЯ (двойных квантовых ям) дает хорошее количественное описание образования экситонных состояний с глубоким локализующим потенциалом  $V = 2$  эВ, например, рассчитать энергию связи экситона с учетом  $d-f$ -обменного взаимодействия дает:

$$E_x = \frac{\hbar^2 K^2}{2(m_e^* + m_h^*)} - \frac{\mu e^2}{2\hbar^2 \varepsilon_2 n^2} - \frac{A}{2}(S_e + S_h), \quad (12)$$

где  $\mu = \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*}$  - приведенная масса экситона,  $S_e$  и  $S_h$  - спин  $e$  и  $h$ ,  $n$  - главное квантовое число. Ближайшие ионы европия в  $EuO$  соединены  $t_{2g}$  - орбиталами. Это понижает энергию  $5d$  - состояния на 0,5 эВ. Результаты анализа магнитооптических эффектов в  $EuO$  показывают, что полоса поглощения похожа на полосы, обусловленные  $4f - 5d$  - переходами в  $Eu^{2+}$  не только по форме и силе осциллятора, но и по магнитооптическим параметрам.

В нашем случае отличительной особенностью стационарной кинетической модели будет дополнительный член, который отражает туннелирование экситонных электронов в соседнюю магнитную яму в молекулярном поле  $\vec{H}_{\phi} > 1$  Тл за время  $t$ . Выбор его даст качественное описание этого процесса, а уравнение для кинетической модели следует записать так:

$$\frac{dn^+}{dt} = N_g - \frac{n^+}{t_p} + \frac{n^-}{t_{c-p}} - \frac{n^+}{t_{c-p}} \exp\left(-\frac{\Delta E}{KT}\right) - \frac{n^+}{t}, \quad (13)$$

где  $\Delta E = g_{ex} \mu_B H_{\phi}$ ,  $g_{ex} \approx 2$ ;  $n^+$  и  $n^-$  - населенности состояний на нижнем ( $\sigma^+$ ,  $I \approx +3$ ) и верхнем ( $\sigma^-$ ,  $I \approx -1$ ) уровнях;  $N_g$  - скорость генерации экситонных электронов на нижнем уровне,  $\Delta E$  - зеемановское расщепление состояний экситона,  $t_{c-p}$  - время спиновой релаксации,  $t_p \approx 100$  нс. Вероятность туннелирования экситонного электрона «через» локализованные состояния барьера  $SrO$  определяется формулой Брейта-Вигнера

$$T_{pes}(\varepsilon - \varepsilon_0) = \frac{\Gamma^2}{(\varepsilon - \varepsilon_0)^2 + \Gamma^2}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_0$  - энергия локализованных состояний,  $\Gamma$  – ширина уровня в барьере (его толщина  $d$ ).

Следует отметить, что в гетероструктуре на основе оксидов европия и стронция можно создать высокую концентрацию триплетных экситонов с большим временем жизни. Достичь достаточно высоких плотностей экситонов (до  $10^{14} \text{ cm}^{-2}$ ) позволяет ограничение в плоскости квантовых ям. Поэтому рассмотренные гетеросистемы имеют практическое приложение в таких приборах как спиновых транзисторах и светодиодах. Энергия порядка экситонной энергии связи достаточно для изменений их оптических параметров, а так же они отличаются высокой чувствительностью.

Анализ коллективных свойств ортоэкситонов продолжается и при теоретическом изучении их возможности туннелирования в наносистемах  $\text{EuO}-\text{SrO}-\text{EuO}$  при различном стехиометрическом составе. Показано, что туннелирование могут совершать только экситонные электроны, а экситонные дырки  $h$  из-за узости  $4f^7$ -зон, а значит большой массе  $h$ , не могут преодолеть соответствующие барьеры.

Подробный анализ туннелирования экситонных электронов дан в кинетической модели, где отражено влияние на туннелирование е состава интерфейса, энергетической и спиновой релаксации и дано примерное время туннелирования е и рекомбинации  $e - h$

**В заключении** рассмотрены основные характеристики полевого транзистора (ПТ), п-каналом которого является сверхрешетка  $\text{SrO}-\text{EuO}$  на толстой подложке из  $\text{SrO}$ .

Так как одним из важных достоинств полевого транзистора является его высокое входное сопротивление, то сразу под затвором находится барьерный слой  $\text{SrO}$  сверхрешетки  $\text{SrO}-\text{EuO}$ , где роль квантовых ям выполняют слои  $\text{EuO}$ . Они же инжектируют в п-канал при знаке «плюс» на затворе электроны, концентрация которых, благодаря  $4f$ -уровням в запрещенной зоне, достигает  $10^{26} \text{ m}^{-3}$ .

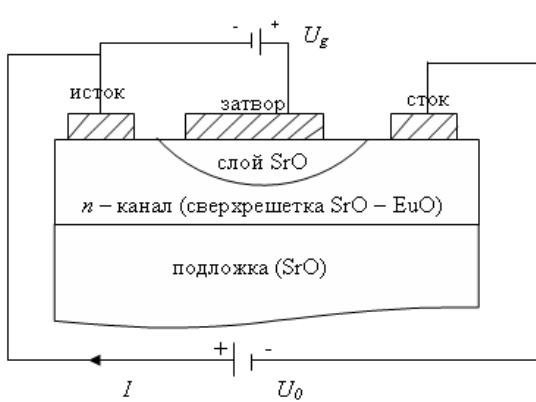


Рис.8. Конструкция полевого транзистора с п-каналом из сверхрешетки  $\text{SrO}-\text{EuO}$ . Толстая подложка из-готовлена из  $\text{SrO}$

вакансий в  $\text{EuO}_{1-\delta}$ . Эти пленки могут быть использованы при изготовлении светодиодов разного «цвета». При температуре ниже 150 K образуются экситоны с

При температуре ниже точки Кюри ( $\approx 70 \text{ K}$ ) в этих слоях действует обменное взаимодействие, которое ориентирует спины туннелирующих электронов через тонкие барьеры  $\text{SrO}$  ( $\approx 10 \text{ \AA}$ ) в одном направлении. В таком случае все слои  $\text{EuO}$  в сверхрешетке будут намагниченны обменным взаимодействием сонаправленно и ток  $I$  увеличивается во много раз.

Повышение температуры Кюри пленок  $\text{EuO}$  до 150 K объясняется магнитными примесными состояниями, образующимися около кислородных

энергией до 2 эВ. Тогда при их рекомбинации такой светодиод будет получать свет с относительно большой длиной волны. Если температура станет выше точки Кюри и ферромагнитное состояние исчезнет, то будет возникать экситоны, когда электрон будет переходить через всю запрещенную зону  $E_g = 3$  эВ. Рекомбинация электрон – дырка даст излучение света такого светодиода в области более коротких длин волн (синий цвет). Таким образом, изменение температуры приведет к смене светового спектра светодиода на основе ферромагнитного полупроводника.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Определены условия образования практически идеальных наносистем из ферромагнитного полупроводника  $EuO$ , имеющего кубическую границентрированную решетку типа  $NaCl$  (пространственная группа  $O_h^5 = Fm\bar{3}m$ ), где каждый ион  $Eu^{2+}$  находится в центре октаэдра анионов (имеет 6 ближайших соседей – анионов) и парамагнитного полупроводника  $SrO$  с такой же сингонией. При этом параметр кристаллической решетки  $EuO$  равен  $a_{EuO} = 5,144 \text{ \AA}$ , а соответствующий размер  $SrO$  имеет величину  $a_{SrO} = 5,145 \text{ \AA}$ . Их разница составляет 0,2%, что находится в «идеальном» соответствии с «картой мира» Кремера и Алферова, по которой расхождение постоянных решеток на гетеропереходе не должно превышать 0,5%.
2. Проведен подробный анализ возникновения  $s - f$  и  $d - f$  взаимодействий и их влияние на основные параметры ортоэкситонов в наногетеросистеме  $EuO - SrO$  при температуре ниже точки Кюри ( $T < T_k$ ). При выполнении этих условий у триплетных экситонов существенно возрастает энергия связи  $E_x$  и сила осциллятора  $f$ , а также время жизни магнитных экситонов увеличивается на три порядка. Обменное взаимодействие также способствует образованию магнитных поляронов при переходе экситонных электронов в соседние квантовые ямы.
3. Теоретически показано, что обменное взаимодействие существенно влияет на коллективные свойства ортоэкситонов, выстраивая их вдоль направления соответствующего молекулярного поля  $\vec{H}_{\phi}$ , что способствует отталкивательному эффекту между триплетными экситонами и удовлетворяет корреляции в их поведении.
4. Дан подробный анализ бозе-эйнштейновской конденсации (БЭК) ортоэкситонов и условия образования электронно-дырочной жидкости с учётом отталкивания между магнитными экситонами и применением метода среднего поля (по Хаугу) и вариационного принципа Боголюбова для термодинамического потенциала. Результаты этого анализа подробно проиллюстрированы соответствующими диаграммами.
5. В рамках модели туннелирования экситонных электронов в соседние квантовые ямы дан анализ кинетики ортоэкситонов в наносистемах  $EuO-SrO$ . С учётом исследований других авторов определено приближенное время энергетиче-

ской и спиновой релаксации, а также влияние на них переходного слоя (интерфейса) и химического состава гетероперехода  $\text{EuO}-\text{SrO}$ .

### **Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:**

1. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Лаковцев А.Б. Экситоны в ферромагнитных полупроводниках // Университет XXI века: исследования в рамках научных школ: Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, аспирантов, магистрантов, соискателей ТГПУ им. Л.Н.Толстого Тула: Изд-во ТГПУ им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 43-48 (0,38п.л./0,13п.л.).
2. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Лаковцев А.Б. Триплетные экситоны в ферромагнитных полупроводниках // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф. в 3 т. Т. 2. Минск: Ковчег, 2013. С. 112-114 (0,19п.л./0,06п.л.).
3. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Экситоны высокой плотности в ферромагнитном полупроводнике  $\text{EuO}$  // Актуальные проблемы физики твердого тела: сб. докл. Междунар. науч. конф. в 3 т. Т. 2. Минск: Ковчег, 2013. С. 110-111(0,13п.л./0,04п.л.).
4. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Лаковцев А.Б. Триплетные экситоны в ферромагнитных гетеросистемах  $\text{EuO}-\text{SrO}$  // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С.72-75 (0,25п.л./0,08п.л.).
5. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Типы экситонов в ферромагнитных наносистемах  $\text{EuO}-\text{SrO}$  // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 58-63 (0,38п.л./0,13п.л.).
6. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Туннельные свойства экситонов в ферромагнитных наносистемах  $\text{EuO}-\text{SrO}$  // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 64-68 (0,3п.л./0,1п.л.).
7. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Лаковцев А.Б. Бозе-Эйнштейновская конденсация межъямных экситонов в гетеросистеме  $\text{EuO} - \text{SrO}$  // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 68-71 (0,25п.л./0,08п.л.).
8. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Осцилляции намагниченности и состояний триплетных экситонов в сверхрешетках  $\text{EuO}-\text{SrO}$  // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 76-78 (0,18п.л./0,09п.л.).

9. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Конденсация экситонов в сверхрешетках EuO-SrO // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 79-86 (0,5п.л./0,25п.л.).
10. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Лаковцев А.Б. Конденсация композитных бозонов в ферромагнитных полупроводниках // Многомасштабное моделирование структур, строение вещества, наноматериалы и нанотехнологии: Материалы II Междунар. конф., посвященной памяти проф. А.Н.Никитина. Тула: Изд. Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2013. С. 88-91 (0,25п.л./0,08п.л.).
11. Сомова Н.Ю. Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Математические проблемы в расчетах экситонных спектров ферромагнитных гетеросистем // Диагностика наноматериалов иnanoструктур: сборник трудов VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Рязань: РГРТУ, 2014. Т. III. С.227-231 (0,3п.л./0,1п.л.).
12. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Транспортные свойства наноразмерных систем на основе ферромагнитных полупроводников // Диагностика наноматериалов и nanoструктур: сборник трудов VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Рязань: РГРТУ, 2014. Т. III. С.237-240 (0,25п.л./0,08п.л.).
13. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Типы экситонов в ферромагнитных наносистемах EuO-SrO // Диагностика наноматериалов и nanoструктур: сборник трудов VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Рязань: РГРТУ, 2014. Т. III. С.232-236 (0,3п.л./0,1п.л.).
14. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Влияние обменного взаимодействия на экситонный спектр в наноразмерных сверхрешетках EuO-SrO // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2013. Вып. 3. С.209-212 (0,25п.л./0,12п.л.).
15. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Фазовая диаграмма ортоэкситонов в нанослое EuO// Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2014. Вып. 1. Часть 1. С.264-270 (0,4п.л./0,2п.л.).
16. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Образование межъямных экситонов в двойных квантовых ямах EuO-SrO-EuO // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2015. Вып. 2. С.91-97 (0,4п.л./0,2п.л.).
17. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Межъямное туннелирование экситонов в полупроводниковых гетероструктурах с ферромагнитными слоями // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественно-математические и технические науки». 2014. Вып.4 (147). С. 42-49 (1п.л./0,3п.л.).
18. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Осцилляции намагниченности и экситонного спектра при облучении ферромагнитных полупроводников. // Физика полупроводников и nanoструктур, полупроводниковая опто- и наноэлектроника: Тезисы докладов 16 всерос. молод. конф. 24-28 ноября 2014 года. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2014. С.5 (0,06п.л./0,03п.л.).

19. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Влияние магнитных поляронов на экситонный спектр в наноразмерных гетеросистемах EuO-SrO // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественно-математические и технические науки». Майкоп: Изд-во АГУ, 2014. Вып.2 (137). С. 40-45 (0,75п.л./0,25п.л.).
20. Сомова Н.Ю. Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Образование магнитных поляронов в наносистеме EuO-SrO-EuO // Диагностика наноматериалов иnanoструктур: сборник трудов VIII Всероссийской школы-семинара студентов, аспирантов и молодых ученых. Рязань: РГРТУ, 2015. Т. III. С. 253-258 (0,38п.л./0,12п.л.).
21. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф., Нургулеев Д.А. Типы экситонов в сверхрешетках на основе EuO и SrO // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия «Естественно-математические и технические науки». Майкоп: Изд-во АГУ, 2015. Вып.3 (166). С. 32-37 (0,38п.л./0,12п.л.).
22. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Характеристики спинового полевого транзистора // Исследовательский потенциал молодых ученых: взгляд в будущее: Сб. материалов XI Регион. науч. - практ. конф. аспирантов, соискателей, молодых учёных и магистрантов. Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2015. С.293-295 (0,19п.л./0,09п.л.).
23. Сомова Н.Ю., Головнев Ю.Ф. Магнитный экситон: Моногр. Тула: Изд-во Тул. гос. пед. ун-та им. Л.Н.Толстого, 2014. 207 с (12п.л./5п.л.).

Сомова Наталья Юрьевна

Обменное взаимодействие и коллективные свойства  
экзитонов в наносистемах EuO – SrO

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 31.08.2016 г. Формат бумаги 60×84 1/16.  
Бумага типографская № 2. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0.  
Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО ТГПУ им. Л.Н.Толстого  
г. Тула, пр-т Ленина, 125