



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Санкт-Петербургский политехнический  
университет Петра Великого»  
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,  
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, 195251  
тел.: +7(812)297 2095, факс: +7(812)552 6080  
office@spbstu.ru

«УТВЕРЖДАЮ»  
Проректор  
по научной работе

Виталий Владимирович Сергеев

«\_\_\_» декабря 2018 г.

Г отзыв ведущей организации Г

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Димитриева Григория Семеновича «Исследование спиновых взаимодействий в разбавленном магнитном полупроводнике (Ga, Mn)As методами горячей фотолуминесценции и неупругого рассеяния света с переворотом спина», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – Физика полупроводников

Диссертационная работа Димитриева Г. С. посвящена исследованию спин-зависимых магнитных явлений в объемных магнитных полупроводниках (Ga, Mn)As, в объемном GaAs, легированном Mn, и в квантовых ямах на основе (Ga, Mn)As.

Актуальность темы диссертации заключается в необходимости создания носителей информации с более низким потреблением энергии, обладающих меньшими размерами, энергонезависимостью, высокой плотностью и скоростью записи по сравнению с существующими устройствами. Одной из идей, позволяющих реализовать такие устройства, является использование в качестве носителя информации спиновой степени свободы носителей заряда в разбавленных магнитных полупроводниках, т.е. в твердых растворах в которых магнитные атомы замещают часть атомов немагнитной кристаллической решетки. Включение небольшого количества магнитных примесей в немагнитный полупроводник приводит к проявлению магнитных свойств без значительных изменений оптических и электронных свойств полупроводника. Такие полупроводники обладают большим

потенциалом для создания устройств с эффективным управлением намагниченностью и спиновой инжекцией. Разбавленный магнитный полупроводник  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$  в настоящее время рассматривается в качестве модельного материала для спинтроники и магнитоэлектроники, так как в нём наблюдаются такие спин-зависимые явления как спиновая поляризация, магнитная анизотропия, анизотропное магнитное сопротивление и др. С практической точки зрения большим преимуществом  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$  является его совместимость с арсенидом галлия, являющимся вторым по распространенности в практическом применении в электронике полупроводником после кремния.

В связи с этим с научной точки зрения исследование спин-зависимых явлений в магнитных полупроводниках является актуальной задачей. Особая практическая важность таких исследований связана с развитием технологий создания квантовых компьютеров, прецизионных сенсоров, магниторезистивной памяти STT-RAM и др.

В работе получен ряд важных результатов, имеющих научную новизну, среди которых можно отметить следующие:

Методом неупругого рассеяния света с переворотом спина исследованы магнитооптические свойства полупроводниковых структур GaAs, легированных акцепторной примесью Mn. Показано, что в спектрах неупругого рассеяния света в магнитных полях присутствуют пики, соответствующие переходам между мультиплетами основного и первого возбужденного уровней Mn, которые возникают за счет случайного локального поля даже в отсутствие внешней одноосной деформации. Из сравнения теоретических и экспериментальных зависимостей рамановского сдвига линий неупругого рассеяния света с переворотом спина от магнитного поля определены g-факторы основного и первого возбужденного уровней нейтрального акцепторного уровня Mn в объемном GaAs и величина деформационного потенциала константы p-d взаимодействия между заряженным ионом Mn и дыркой валентной зоны.

При исследовании спектров фотолюминесценции эпитаксиальных слоев разбавленных магнитных полупроводников  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$  в условиях внешнего магнитного поля и/или одноосной деформации обнаружено два различных участка зависимости магнитного поля насыщения от деформации, что связано с резким изменением вектора намагниченности вдоль внешнего магнитного поля после некоторого критического значения угла между магнитным полем и вектором намагниченности. Дальнейшее увеличение магнитного поля не влияет ни на поляризацию, ни на угол между внешним магнитным полем и намагниченностью. Помимо этого из анализа насыщения зависимости степени циркулярной поляризации горячей фотолюминесценции от магнитного поля при разных значениях внешней деформации сделан вывод об уменьшении степени поляризации фотолюминесценции в насыщенном магнитном поле с увеличением деформации, что объясняется перемешиванием состояний дырок, связанных на акцепторах. Данное комбинированное воздействие внешнего магнитного поля и одноосной деформации на направление вектора намагниченности в разбавленном магнитном полупроводнике  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}$  изучено впервые.

Методом поляризованной горячей фотолюминесценции в магнитных полях исследованы ферромагнитные свойства структур с квантовыми ямами на основе разбавленного магнитного полупроводника  $(\text{Ga}, \text{Mn})\text{As}/\text{AlAs}$  и на основе легированных квантовых ям  $\text{GaAs}:\text{Mn}/\text{AlAs}$ . Спектр межзонной фотолюминесценции легированных



квантовых ям GaAs:Mn/AlAs демонстрирует наличие большого количества пиков, связанных с переходами с уровней размерного квантования электронов на связанный акцепторный уровень, а также пика, соответствующего рекомбинации возбужденного электрона из точки рождения с одиночным акцептором Mn. Сильный энергетический сдвиг (160 мэВ) данного пика от энергии фотовозбуждения объясняется значительным энергетическим зазором между вершиной валентной зоны и примесной зоной Mn, а также тем, что возбуждение идет не на дно валентной зоны, а в состояния со значительным значением квазиимпульса. Данное предположение подтверждено спектрами фотолюминесценции объемного разбавленного магнитного полупроводника (Ga, Mn) As, в котором данный пик отстоит от энергии накачки на 110 мэВ, что примерно соответствует энергии ионизации примеси Mn в GaAs. Из анализа зависимостей степени поляризации горячей фотолюминесценции от магнитного поля показано, что размерное квантование, с одной стороны, изменяет электронную структуру акцептора Mn, а с другой стороны подавляет циркулярную и линейную поляризацию фотолюминесценции (по сравнению с объемным материалом). Этот эффект связан со случайными деформационными или электрическими полями в квантовых ямах и, естественно, проявляется сильнее в более узких квантовых ямах. Описанные выше магнитооптические исследования в ферромагнитных квантовых ямах проведены впервые.

Методом неупругого рассеяния света с переворотом спина исследована поперечная релаксация спина иона Mn и перенормировка эффективного g-фактора иона Mn в ферромагнитном разбавленном полупроводнике (Ga, Mn) As. Из анализа ширины пика на спектре неупругого рассеяния света определены зависимости времени поперечной спиновой релаксации иона Mn от магнитного поля и температуры; показано, что при температуре выше температуры Кюри это время определяется флуктуацией спина в ансамбле дырок, а при температуре ниже температуры Кюри это время определяется спиновой релаксацией дырок за счет спин-орбитального взаимодействия. Данные результаты являются оригинальными и получены впервые.

#### Достоверность результатов

Достоверность и надежность результатов обеспечивается использованием современного высокоточного метода молекулярно-пучковой эпитаксии при выращивании структур, использованием широкого набора экспериментальных методик, включающих метод поляризованной фотолюминесценции, а также метод неупругого рассеяния света с переворотом спина. Достоверность полученных результатов подтверждается воспроизводимостью экспериментальных данных и согласием результатов эксперимента и теоретического моделирования.

Научная и практическая значимость полученных результатов несомненна. Частично она уже была описана в предыдущих разделах отзыва. Отметим также следующее:

Показано, что направлением вектора намагниченности в разбавленном магнитном полупроводнике (Ga, Mn) As можно управлять внешней деформацией и внешним магнитным полем. Определены постоянные магнитной анизотропии и магнитострикции, которые необходимо знать для управления намагниченностью, что может быть использовано для создания магнитных устройств чтения и записи.

Показано, что ферромагнетизм в структурах с квантовыми ямами на основе разбавленного магнитного полупроводника (Ga,Mn)As/AlAs в значительной степени



обусловлен дырками, локализованными в примесной зоне акцептора Mn, а не свободными дырками валентной зоны. В то же время спиновая поляризация дырок примесного уровня в двумерном разбавленном магнитном полупроводнике определяется преимущественно внутренними случайными полями, а не влиянием размерного квантования. Из анализа спектров неупругого рассеяния света с переворотом спина в ферромагнитном разбавленном полупроводнике (Ga, Mn)As сделан вывод о существенном влиянии обменного взаимодействия спиновых систем Mn и дырок на уменьшение g-фактора на 5% при переходе из парамагнитной в ферромагнитную фазу.

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. Интересным результатом является обнаружение коротковолнового сдвига экситонного пика фотолюминесценции легированного объемного GaAs:Mn при одноосной деформации. Однако в работе отсутствуют даже качественные оценки влияния внешнего давления на энергетическое положение экситона.

2. В работе показано, что размерное квантование уменьшает спиновую поляризацию дырок в магнитных полупроводниках. Значит ли это, что для практического применения лучше подходят объемные материалы, где слабее влияние случайных деформационных полей?

3. На спектрах фотолюминесценции легированного объемного GaAs:Mn автором обнаружены пики, соответствующие фоновым повторениям. Почему такие особенности не обнаружены на спектрах фотолюминесценции квантовых ям GaAs:Mn/AlAs, хотя идентифицированы оптические переходы носителей заряда со второй и третьей подзоны размерного квантования на нейтральный акцептор Mn?

4. В работе имеются элементы небрежного оформления. Так, например, очень часто используются необщепринятые аббревиатуры, которые затрудняют восприятие текста. Несмотря на то, что работа написана без грамматических ошибок, в нескольких местах пропущены слова.

Указанные замечания не носят принципиального характера и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Результаты работы полностью и своевременно опубликованы в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендуемых ВАК при Минобрнауки России, прошли апробацию в форме докладов и обсуждений на российских и международных конференциях и семинарах. Автореферат правильно и полностью отражает содержание диссертации.

Таким образом, диссертационная работа «Исследование спиновых взаимодействий в разбавленном магнитном полупроводнике (Ga, Mn)As методами горячей фотолюминесценции и неупругого рассеяния света с переворотом спина» является законченным научным исследованием, соответствует профилю Совета Д 002.205.02 (специальность 01.04.10 – физика полупроводников), полностью отвечает требованиям ВАК при Минобрнауки России, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 01.04.10 — физика полупроводников, а её автор Димитриев Григорий Семенович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертационная работа Димитриева Г. С. заслушана и обсуждена на научном семинаре кафедры "Физика полупроводников и наноэлектроника" института физики, нанотехнологий и телекоммуникаций федерального государственного автономного

образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого» 16 ноября 2018.

Отзыв заслушан и утвержден на заседании кафедры "Физика полупроводников и наноэлектроника" 16 ноября 2018 г., протокол № 3.

Старший научный сотрудник кафедры "Физика полупроводников и наноэлектроника",  
кандидат физико-математических наук  
тел. +7 (812) 552 96 71  
e-mail: [mvin@spbstu.ru](mailto:mvin@spbstu.ru)

Максим Яковлевич Винниченко

Заведующий кафедрой  
"Физика полупроводников и наноэлектроника",  
профессор, доктор физико-математических наук  
тел. +7 (812) 552 96 71  
e-mail: [dmfir@rphf.spbstu.ru](mailto:dmfir@rphf.spbstu.ru)

Дмитрий Анатольевич Фирсов

Секретарь кафедры  
"Физика полупроводников и наноэлектроника"  
тел. +7 (812) 552 96 71  
e-mail: [iischipacheva@mail.ru](mailto:iischipacheva@mail.ru)

Ирина Игоревна Щипачева