

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Димитриева Григория Семёновича «**Исследование спиновых взаимодействий в разбавленном магнитном полупроводнике (Ga,Mn)As методами горячей фотолюминесценции и неупругого рассеяния света с переворотом спина**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – «физика полупроводников»

Актуальность темы исследования

Поиск и разработка новых материалов спинтроники привлекают значительный интерес исследователей, поскольку такие материалы являются базой для построения приборов на спин-зависимых явлениях – элементов микроэлектроники нового поколения, характеризующихся повышенным быстродействием и сниженным энергопотреблением. Исследованный в работе соискателя (Ga,Mn)As долгое время считался одним из основных материалов спинтроники: он сочетает в себе ферромагнитные и полупроводниковые свойства, совместим с материалами микроэлектронной базы, также можно отметить уже хорошо отработанную технологию его получения. В последние годы прогресс в изучении (Ga,Mn)As несколько замедлился. Это связано, в том числе, с отсутствием единого мнения относительно механизмов магнитного упорядочения и спиновой поляризации носителей заряда в (Ga,Mn)As: и до настоящего времени данный вопрос является предметом дискуссии. Диссертационная работа соискателя посвящена изучению взаимодействий, имеющих место в (Ga,Mn)As между ионами Mn и дырками, определению параметров материала, важных для построения модели ферромагнетизма. Таким образом, результаты работы являются важным шагом к пониманию ферромагнетизма в (Ga,Mn)As, а, следовательно, актуальность темы исследования не вызывает сомнений.

Структура диссертации

Рецензируемая диссертационная работа Димитриева Г.С. состоит из введения, пяти глав и заключения. В первой главе диссертации приводится описание использованных методов исследования. В их число входят методы фотолюминесценции и нелокального рассеяния света с переворотом спина (НРСПС). Приводится обоснование применения этих методов и краткий обзор их возможностей. Также в главе 1 приведены описание экспериментальной установки, список образцов для исследований.

Вторая глава посвящена исследованию арсенида галлия, легированного атомами Mn до концентрации $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (т.е. ниже предела растворимости). Такой материал является хорошим модельным объектом для изучения одиночного нейтрального акцептора Mn в

матрице GaAs. В рамках исследований второй главы состояния нейтрального акцептора (комплекс Mn^{2+} и дырка) изучены методом НРСПС, а для модуляции состояний акцептора использовались внешние воздействия: введение образца во внешнее магнитное поле и приложение упругих напряжений. В результате были изучены основное и возбуждённое состояния нейтрального акцептора, определён g-фактор для мультиплета с полной величиной углового момента $F=1$.

В третьей главе изучалась магнитная анизотропия в легированном GaAs:Mn и твёрдом растворе (Ga,Mn)As с содержанием Mn до 6 %. Для управления магнитной анизотропией использовалось приложение упругих напряжений к структурам. Изучалась зависимость поляризации горячей фотолюминесценции (ГФЛ) от магнитного поля и влияние на эту зависимость упругих напряжений. Установлено, что упругие деформации существенным образом влияют на магнитополевые зависимости ГФЛ, при этом меняется как степень циркулярной поляризации насыщения, так и магнитное поле, в котором степень поляризации выходит на насыщение. Для объяснения полученных результатов была предложена модель, учитывающая влияние напряжений на магнитную анизотропию, получено хорошее согласование результатов моделирования и экспериментальных данных. Таким образом, был предложен механизм управления магнитными характеристиками (Ga,Mn)As посредством приложения упругих напряжений.

В четвёртой главе исследовалось влияние размерного квантования в структурах (Ga,Mn)As на спиновую поляризацию дырок. С этой целью были сформированы сверхрешётки (Ga,Mn)As/AlAs, изучались спектры их ГФЛ в геометриях Фойхта и Фарадея. Для анализа изменения магнитополевых зависимостей циркулярной поляризации ГФЛ привлекалась модель, предполагающая локализацию дырок в примесной зоне твёрдого раствора (Ga,Mn)As, которая позволила хорошо описать экспериментальные результаты. Вывод о локализации дырок в примесной зоне представляется очень важным для анализа механизмов ферромагнетизма в (Ga,Mn)As в целом.

В пятой главе исследовалась поперечная спиновая релаксация иона Mn^{2+} , эволюция g-фактора в ферромагнитном (Ga,Mn)As в широком диапазоне температур. Изучались спектры НРСПС структур при различных температурах, анализировались сдвиги и уширения линий. Путём сопоставления экспериментальных результатов с теоретической моделью были установлены доминирующие механизмы спиновой релаксации при температурах ниже и выше точки Кюри, получены зависимости времени поперечной спиновой релаксации ионов Mn от температуры и магнитного поля, проведена оценка коэффициента спиновой диффузии для дырок в (Ga,Mn)As.

Отмечу наиболее важные результаты, полученные в работе

- 1) С точки зрения методологии эксперимента очень важным представляется демонстрация широких возможностей методов горячей фотолюминесценции и нелокального рассеяния с переворотом спина в сочетании с приложением упругих напряжений и внешнего магнитного поля для анализа спиновой структуры разбавленных магнитных полупроводников. Методический результат, полученный соискателем в ходе его работы, показывает значительный потенциал указанных выше методов для анализа не только систем $(\text{Al},\text{Mn})\text{B}_5$, но и других видов разбавленных магнитных полупроводников.
- 2) Установлены механизмы влияния одноосной деформации на магнитную анизотропию $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$, в том числе, определены постоянные магнитной анизотропии и магнитострикции. Данный результат представляется важным с практической точки зрения, т.к. в настоящий момент активно изучаются различные способы управления магнитным состоянием материалов помимо внешнего магнитного поля.
- 3) В результате исследований методом поляризованной фотолюминесценции горячих электронов и теоретического анализа результатов исследования сделан важный вывод для структур с квантовыми ямами $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}/\text{AlAs}$, который заключается в том, что ферромагнетизм в наноразмерных слоях разбавленного магнитного полупроводника обусловлен дырками, локализованными в примесной зоне акцептора Mn. При этом спиновая поляризация дырок связывается со случайными полями в большей степени, чем с эффектами размерного квантования. Такой результат представляется важным шагом для понимания механизмов магнитного упорядочения в системах на основе $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$.

Отмеченные выше результаты работы Г.С. Димитриева являются новыми. Их новизна, научная и практическая ценность подтверждаются публикациями соискателя в рецензируемых научных журналах: Phys. Rev. B, Физика твёрдого тела, Solid State Communications. Достоверность не вызывает сомнений, так как они получены с применением комплекса дополняющих друг друга методов исследования.

Замечания к диссертационной работе

- 1) В Главе 3 при рассмотрении методов управления магнитной анизотропией автор упоминает управление электрическим полем (стр.47) и относит к числу этих методов подход, применённый для структур $(\text{Ga},\text{Mn})\text{As}$, прикрепленных к пьезоэлектрику (ссылки на работы [13,18,19] в диссертации). Но в этих работах электрическое поле управляет магнитными характеристиками только с технической точки зрения. С точки зрения физики, магнитные характеристики управляются не электрическим полем, а упругими напряжениями, которые возникают при приложении к пьезоэлектрику электрического поля. Возможности

управления магнитными характеристиками непосредственно с помощью электрического поля показаны в цитируемой и рассмотренной соискателем работе [17].

2) В Главе 4 при рассмотрении влияния размерного квантования на циркулярную поляризацию краевой фотолуминесценции GaAs, слаболегированного марганцем, автор анализирует действие внутренних случайных полей и приводит описание рис.4.8, на котором представлена зависимость степени поляризации от приведённой величины случайного поля для объёмных и размерно-квантованных структур. Автор рассматривает два крайних случая ($\delta \rightarrow 0$ и $\delta \rightarrow \infty$), в последнем случае степень циркулярной поляризации квантовой ямы близка к нулю. Однако исследованные структуры представляют собой промежуточную ситуацию, для которой степень поляризации размерно-квантованной структуры ниже, чем для объёмного образца, но не равна нулю. Рассмотрения этой ситуации в рамках данного обсуждения (на стр.80) не выполнено, хотя оно просится. Описание главы в целом позволяет сделать нужные выводы относительно экспериментальных результатов, но дополнительное рассмотрение ситуации, отличной от $\delta \rightarrow 0$ и $\delta \rightarrow \infty$, облегчило бы понимание главы.

3) В Главе 2 на стр.30-35 проводится описание состояний нейтрального акцептора Mn в GaAs с различными значениями полного углового момента F. Такое же описание, но несколько более подробное, приводится в главе 4 (раздел теоретическое моделирование). Приведения этого описания в подробном виде и один раз в начале работы было бы достаточно.

4) Хотя работа, в целом, написана очень грамотно, хорошим языком, но в ней встречаются редкие ошибки и опечатки. Самое существенное из того, что было замечено – приведение единиц измерения на английском языке (на стр.49 при описании технологических параметров исследованных структур – 200 nm x 100 um).

Высказанные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Димитриева Г.С. Представленная работа выполнена на высоком научном и технологическом уровне, основные результаты и личный вклад автора достаточно полно и правильно отражены как в самой диссертации, так и в автореферате.

Содержание диссертации достаточно полно отражено в реферируемых российских и иностранных журналах, а также в материалах конференций. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации. Диссертация полностью отвечает требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, в том числе критериям II раздела Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года, № 842, а автор диссертационной работы Димитриев Григорий Семёнович заслуживает присуждения ему степени кандидата физико-

математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников.

28.12.2018

Дорохин Михаил Владимирович,
д.ф.-м.н. по спец. 01.04.10 Физика полупроводников
зав.лаб. Научно-исследовательский физико-технический институт
Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования "Национальный
исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского"

_____ М.В. Дорохин

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, просп. Гагарина 23, корп.3
тел. 8(831)4623120
e-mail: dorokhin@nifti.unn.ru

Подпись М.В. Дорохина заверяю

Учёный секретарь Федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского"

к.с.н.

_____ Л.Ю. Черноморская