

ОТЗЫВ
официального оппонента о диссертации
Димитриева Григория Семеновича

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

Рецензируемая диссертация посвящена изучению спин-зависимых явлений в пленках и структурах на основе разбавленного магнитного полупроводника (Ga,Mn)As. Несмотря на то, что изучение магнитных примесей и их влияния на оптические и магнитооптические свойства полупроводниковых структур вот уже более 40-ти лет является предметом интенсивных исследований теоретиков и экспериментаторов во всем мире, интерес к ним продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение структур, построенных на основе разбавленных магнитных полупроводников позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для совершенствования уже имеющихся и создания новых типов приборов для обработки и хранения информации, совместимых с полупроводниковой электроникой на базе соединений АЗВ5, а так же стимулирует развитие новых технологий.

Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно, является **актуальной**, а поскольку, несмотря на прогресс в области исследования разбавленных магнитных полупроводников, их энергетический

спектр и магнетооптические свойства изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований.

Первая глава диссертации посвящена методическим вопросам проводимых исследований. В ней описаны: методы спектроскопии комбинационного рассеяния света с переворотом спина и «горячей» фотолюминесценции, экспериментальные установки, условия эксперимента, методики обработки полученных результатов измерения.

В оригинальной части диссертации, **главы 2- 5**, рассматриваются три основные задачи. Первая из них — определение тонкой структуры одиночного нейтрального акцептора Mn в объёмном GaAs:Mn в зависимости от внешней одноосной деформации и магнитного поля с учетом внутренних случайных полей, обусловленных присутствием случайных локальных деформаций и/или ионизованными центрами Mn^{2+} . В рамках решения этой задачи найдено расщепление основного состояния акцептора Mn с полным моментом 1 под воздействием случайного локального поля. Экспериментально определены расщепления состояний нейтрального акцептора Mn с полными угловыми моментами 1 и 2 под действием деформации и/или магнитного поля. Установлено, что одноосная сжимающая деформация уменьшает обменное взаимодействие между 3d-электронами внутренней оболочки иона Mn^{2+} и дыркой валентной зоны.

Вторая задача, заключалась в изучении магнитной анизотропии и динамики взаимодействующих спиновых подсистем Mn и дырок в ферромагнитных пленках (Ga,Mn)As. В результате проведенных исследований, установлена зависимость ориентации намагниченности пленок от величины

одноосной деформации и напряженности перпендикулярного пленке магнитного поля. Показано, что напряженность магнитного поля, в котором происходит насыщение степени наведенной полем циркулярной поляризации, определяется смешиванием состояний дырок с различным угловым моментом за счет случайных встроенных кристаллических полей и одноосной деформации кристалла (Ga,Mn)As. Определены постоянные магнитной анизотропии и магнитострикции. Сделан вывод о том, что дефазировка спиновой подсистемы ионов Mn^{2+} обусловлена обменным взаимодействием со спинами дырок. Автор экспериментально показал, что механизм поперечной спиновой релаксации спинов Mn^{2+} зависит от температуры. В ферромагнитном состоянии (Ga,Mn)As (при температурах ниже температуры Кюри) дефазировка спиновой подсистемы ионов Mn^{2+} определяется спиновой релаксацией дырок за счет спин-орбитального взаимодействия. В парамагнитном состоянии эта дефазировка определяется спиновыми флуктуациями ансамбля дырок.

И, наконец, третья задача диссертации заключалась в изучении влияния размерного квантования на спиновую поляризацию дырок в (Ga,Mn)As. Автором показано, что ферромагнетизм в квантовых ямах (Ga,Mn)As/AlAs обусловлен дырками, локализованными в примесной зоне, формирующейся состояниями атомов Mn. Установлено, что степень спиновой поляризации дырок в этих квантовых ямах определяется как модификаций энергетического спектра электронной структуры акцептора Mn, так и случайными деформационными и электрическими полями в плоскости квантовых ям.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны, инициируют

проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что совокупность полученных в работе результатов и сделанные на их основе выводы значительно расширяют существующие представления об энергетическом спектре магнитных примесей, спиновой динамике электронных возбуждений и механизмах ориентации намагниченности в пленках и структурах на основе разбавленных магнитных полупроводников A3B5. По результатам проводимых исследований созданы предпосылки для создания магнитомеханических устройств на основе ферромагнитных пленок (Ga,Mn)As, направление намагниченности которых управляется деформацией и внешними магнитными полями что, безусловно, имеет важное **прикладное значение**

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. В главе 2 в спектре неупругого рассеяния света (рис. 2.4 а) идентифицирована линия, обозначенная как Δ_{F1-F1} , которая объяснена как расщепление δ основного состояния акцептора $F=1$ в поле случайных деформаций или электрических полей. Казалось бы, что случайные деформации должны приводить к сильному уширению этой линии. В приведённом на рисунке 2.4а спектре ширина этой линии заметно уже ожидаемой для случая случайных деформаций. Этот вопрос требует пояснения.
2. При обсуждении влияния деформации на основное состояние комплекса $Mn^{2+} + h$ в диссертации не отмечено, учитывалось ли влияние деформации на сам ион марганца или только на валентную дырку, связанную на нём.
3. В главе 4 про ферромагнитные квантовые ямы (Ga,Mn)As/AlAs говорится, что акцептор марганца кроме размерного квантования испытывает влияние

случайных полей. Какова природа этих полей? Она такая же, как и в случае легированного GaAs, или имеет другую природу?

4. На рисунке 5.7 приведена зависимость времени спиновой релаксации от температуры. Почему-то эта зависимость обрывается на температурах 180К. Интересно, что будет происходить с константой T_{Mn} при дальнейшем увеличении температуры.

В целом, текст диссертации и автореферата написан ясным языком, однако местами автор злоупотребляет неудачными формулировками. Например, на странице 11 автореферата написано «В отличие от легированного случая в ферромагнитном образце насыщение поляризации наступает уже в малых магнитных полях....». Читателю остается только догадываться, что имел в виду автор под «легированным случаем».

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация Г.С. Димитриева, представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой содержится решение задачи, имеющей существенное значение для понимания энергетического спектра магнитных примесей и механизмов ориентации намагниченности в структурах, построенных на основе разбавленных магнитных полупроводников АЗВ5. Достоверность и обоснованность результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов исследований, полученных различными экспериментальными методами.

Основные результаты диссертации опубликованы в российских и международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях. Автореферат правильно передает содержание диссертации. По содержанию, объему, новизне, научной и

практической значимости полученных в работе результатов диссертация отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 01.10.2018), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Название и содержание работы соответствуют паспорту специальности, а её автор Г.С. Димитриев, безусловно, **заслуживает присуждения** искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 — физика полупроводников.

Ведущий научный сотрудник лаборатории молекулярно-лучевой эпитаксии соединений A_3B_5 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН

д.ф.-м.н.,

Доцент по специальности физика полупроводников

Тимур Сезгирович Шамирзаев

01.04.10 – физика полупроводников

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись и фамилию сотрудника ИФП СО РАН
Т.С. Шамирзаева удостоверяю

Зам. директора ИФП СО РАН

к.ф.-м.н.

А.В. Каламейцев