

Отзыв официального оппонента на диссертационную работу
Некрасова Сергея Васильевича
«Оптическая ориентация спинов в полупроводниковых квантовых точках
InP/(In,Ga)P и (In,Al)As/AlAs»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.07 — «физика конденсированного состояния»

В настоящее время значительное внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям оптических и электронных свойств полупроводниковых структур пониженной размерности, которые являются перспективными кандидатами для использования в полупроводниковой наноэлектронике. Одним из наиболее интересных и перспективных явлений, наблюдаемых в полупроводниковых наноструктурах, является явление оптической ориентации спинов носителей заряда. Актуальность таких исследований обусловлена возможностью применения явления оптической ориентации в устройствах спинтроники, обладающих рядом преимуществ по сравнению с приборами классической электроники, например быстродействием, низким энергопотреблением и высокой плотностью базовых элементов.

Диссертационная работа С.В. Некрасова посвящена экспериментальному изучению спиновых свойств полупроводниковых квантовых точек A_3B_5 , проявляющихся при оптической ориентации спинов и выстраивании экситонов. В работе выполнено последовательное экспериментальное исследование особенностей динамики поляризации фотолюминесценции, спиновых биений и тонкой структуры экситонных уровней в квантовых точках InP/(In,Ga)P и (In,Al)As/AlAs. Достоверность результатов обусловлена тщательно выполненными экспериментальными измерениями, подробным и аккуратным сопоставлением результатов измерений с существующими теоретическими моделями, сравнением результатов с результатами других научных групп, а также многократной апробацией результатов работы на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит 86 страниц, включая 28 рисунков, и список литературы из 62 наименований.

Во введении сформулированы цель и основные задачи работы, обоснованы актуальность, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлены выносимы на защиту положения, приведено краткое содержание диссертационной работы.

В первой главе описаны методики проведения эксперимента и приведено описание экспериментальных установок, использованных в работе. Также в первой главе дано описание исследованных образцов квантовых точек.

Во второй главе подробно описаны теоретические модели, используемые для объяснения появления отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции в квантовых точках различных размеров для случаев нерезонансного и квазирезонансного возбуждения. Представлены результаты исследований динамики отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции для ансамбля квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ в отсутствие внешнего магнитного поля, а также, когда к исследуемому образцу приложено внешнее магнитное поле в геометрии Фарадея. Обнаружено, что в динамике фотолюминесценции отрицательно заряженных трионов в ансамбле квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ проявляются быстрое и медленное времена затухания. Продемонстрировано формирование отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции. Показано, что в динамике отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции отрицательно заряженных трионов отсутствуют осцилляции, если магнитное поле приложено в геометрии Фойхта. Обнаружено уширение кривой Ханле при наличии динамической поляризации ядер.

В третьей главе выполнено исследование динамики поляризации фотолюминесценции нейтральных экситонов, а также положительно и отрицательно заряженных экситонов в ансамбле квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$. Исследовано влияние ядерного квадрупольного взаимодействия на спиновую динамику электронов. Показано, что ядерное квадрупольное взаимодействие может приводить к динамической поляризации ядер в нулевом внешнем магнитном поле. Обнаружено и объяснено наличие монотонно затухающего во времени вклада в сигнал фотолюминесценции и биений в динамике поляризации фотолюминесценции для положительно заряженных экситонов. Осцилляции циркулярной поляризации наблюдаются не относительно нулевого значения поляризации, а относительно монотонно затухающего вклада в поляризацию.

В четвертой главе выполнены исследования особенностей выстраивания экситонов и оптической ориентации фотолюминесценции ансамбля квантовых точек $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ в магнитном поле и в случае, когда магнитное поле отсутствует. Проведено исследование тонкой структуры уровней прямых и непрямых экситонов в k -пространстве. Экспериментально определена величина анизотропного обменного расщепления состояний оптически активных экситонов в прямозонных в k -пространстве квантовых точках. Продемонстрировано, что в непрямозонных в k -пространстве квантовых точках $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ расщепления состояний, обусловленные изотропным и анизотропным

обменным взаимодействием для оптически активных экситонов пренебрежимо малы. Исследованы особенности спиновой релаксации электронов в прямозонных в k -пространстве квантовых точках.

В заключении диссертационной работы приведены основные результаты и выводы.

Автором получен ряд новых и оригинальных результатов. К ним можно отнести следующее:

1. Обнаружение немонотонной зависимости отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции от магнитного поля, приложенного в геометрии Фарадея, для квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$, обусловленной анизотропным обменным взаимодействием электронов и дырок в оптически активных экситонах.

2. Продемонстрировано, что при наличии ядерного квадрупольного взаимодействия в квантовых точках $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ происходит стабилизация динамически поляризованных спинов ядер и спинов электронов.

3. Экспериментально определена величина анизотропного обменного расщепления состояний оптически активных экситонов в прямозонных в k -пространстве квантовых точках $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$, а также показано, что в непрямозонных в k -пространстве квантовых точках $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ расщепления состояний, обусловленные изотропным и анизотропным обменным взаимодействием для оптически активных экситонов пренебрежимо малы.

К достоинствам работы также следует отнести подробное сравнение результатов экспериментальных измерений с результатами теоретических расчетов, а также сопоставление с данными, полученными при проведении экспериментов как российскими, так и международными научными группами, работающими по тематике диссертационной работы.

В качестве замечаний по диссертационной работе С.В. Некрасова можно отметить следующее:

1. В первой главе описаны параметры квантовых точек, однако нет данных о дисперсии размеров квантовых точек и их энергетическом спектре. Кроме того, следовало бы расположить данные о квантовых точках перед описанием экспериментальных установок, что позволило бы лучше понять выбранные в ходе выполнения эксперимента параметры.

2. Во второй главе проведено моделирование динамики среднего по ансамблю спина тяжелой дырки в поперечном магнитном поле. В качестве параметров моделирования использованы среднеквадратичное отклонение и математическое ожидание поперечного g -фактора тяжелой дырки. Какими физическими процессами можно объяснить отличие от нуля

математического ожидания поперечного g -фактора тяжелой дырки (большой разброс), чем обоснован выбор величины разброса 0.3, как изменятся результаты при варьировании величины разброса.

3. Во второй главе на рисунке 2.13 приведены стационарные зависимости поляризации фотолюминесценции от магнитного поля в геометрии Фойхта при постоянной и модулированной циркулярной поляризации возбуждения. С ростом величины магнитного поля происходит переключение знака поляризации фотолюминесценции, которое не обсуждается в работе.

4. В третьей главе выполнен экспериментальный и теоретический анализ зависимости циркулярной поляризации фотолюминесценции от времени в различных магнитных полях (см. Рис.3.3). В малых магнитных полях на малых временах наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и теоретических кривых, что позволяет хорошо описать максимальную величину циркулярной поляризации, однако на больших временах имеется существенное различие. С ростом поля наблюдается обратная картина. Оказывается, что максимальное значение циркулярной поляризации, измеренное экспериментально, значительно превосходит величину, получаемую в ходе теоретических расчетов (различие амплитуды первого максимума). Однако, при больших временах теоретические и экспериментальные кривые демонстрируют хорошее совпадение. Чем можно объяснить такое несоответствие? Можно ли разделить в ходе экспериментальных измерений вклады в фотолюминесценцию от положительно и отрицательно заряженных трионов, возможно, это приведет к устранению несоответствия?

5. В четвертой главе обсуждается сосуществование прямозонных и непрямозонных в k -пространстве квантовых точек $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$, однако не объясняется какие механизмы могут приводить к появлению двух типов квантовых точек в ходе единого цикла их роста.

6. На рисунке 4.2 схема зонной структуры квантовых точек в зависимости от размера приведена без значений энергии и размеров квантовых точек. В связи с этим возникает вопрос о величинах расщепления между Γ с и X состояниями, не может ли в исследуемой системе происходить их смешивание?

7. На рисунке 4.6 следовало бы привести зависимости степени циркулярной поляризации и линейной поляризации от энергии, которые и обсуждаются в тексте работы, а не их компоненты.

8. Работа не лишена ряда грамматических ошибок, а также некоторой неаккуратности в оформлении, а частности подписи на всех рисунках представлены на английском языке.

Представленные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы, являющуюся законченным и оригинальным научным исследованием. Полученные результаты являются актуальными, новыми и представляют значительный научный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Актуальность, новизна, практическая значимость, личный вклад автора и достоверность полученных в работе результатов не вызывают сомнения. Основные результаты диссертационной работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, докладывались на российских и международных конференциях, опубликованы в статьях в научных изданиях, входящих в международные базы данных. Материал, изложенный в диссертационной работе, представлен понятно. Автореферат в полной мере отражает содержание диссертационной работы.

Диссертационная работа С.В. Некрасова «Оптическая ориентация спинов в полупроводниковых квантовых точках $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ » соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 "Физика конденсированного состояния" согласно Положению о присуждении ученых степеней в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, а ее автор, заслуживает присуждения ему искомой ученой степени по специальности 01.04.07 – «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент

Доцент физического факультета
ФГБОУ ВО МГУ имени М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук



Владимир Николаевич Манцевич

Подпись В.Н. Манцевича удостоверяю

Декан физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
профессор,
доктор физико-математических наук



Н. Н. Сысоев

Адрес официального оппонента:

119991 Москва, ул. Ленинские Горы, д. 1, корп. 2



Тел.: 8 (495) 939-50-72

эл. почта: vmantsev@gmail.com