

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Некрасова Сергея Васильевича «Оптическая ориентация спинов в полупроводниковых квантовых точках $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ », представленную в диссертационный совет диссертационного совета 34.01.01 ФТИ им. А.Ф. Иоффе на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 — физика конденсированного состояния

Диссертационная работа Некрасова С.В. посвящена экспериментальным исследованиям спиновых явлений в полупроводниковых квантовых точках A_3B_5 . В настоящее время актуальность этой темы обусловлена потенциальной возможностью использования спиновых свойств для реализации новых информационных технологий.

Новизна работы состоит в полученных закономерностях и обнаружении новых эффектов, а именно: определены физические механизмы, определяющие динамику отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции ансамбля квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ в магнитном поле; исследовано влияние ядерного квадрупольного взаимодействия на динамику поляризации фотолюминесценции заряженных и нейтральных экситонов в ансамбле квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$; показано, что в фотолюминесценции ансамбля квантовых точек $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ сосуществуют подансамбли с прямозонными и непрямозонными в k -пространстве оптическими переходами, к которым можно обращаться независимо, используя селективное возбуждение фотолюминесценции; обнаружено, что смешивание Γ - и X -состояний электронов в зоне проводимости оказывает существенное влияние на поляризационные свойства фотолюминесценции; исследованы механизмы спиновой релаксации экситонов в прямозонных и непрямозонных квантовых точках; показано, что разная величина анизотропного обменного взаимодействия в экситонах в прямозонных и непрямозонных квантовых точках $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ приводит к выстраиванию экситонов или к оптической ориентации стационарной фотолюминесценции.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы.

Во введении описаны цели, содержание, результаты и новизна работы. Кроме этого, представлен исторический обзор работ по оптической ориентации спинов.

В первой главе описаны основные экспериментальные методы, использованные для изучения спиновой динамики. Глава содержит описание трех экспериментальных установок, а также двух типов образцов, содержащих полупроводниковые квантовые точки $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$.

В исследованиях использовался метод спектроскопии поляризованной фотолюминесценции с возможностью приложения магнитного поля, в частности, метод оптической ориентации. Также исследовалась динамика

фотолюминесценции при импульсном возбуждении квантовых точек. Для изучения влияния динамической поляризации ядер на спиновую поляризацию носителей в квантовых точках поляризация возбуждающего излучения модулировалась фотоупругим модулятором. Исследования проводились при криогенных температурах от 2 до 10 К.

Вторая глава диссертации посвящена изучению динамики отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции ансамбля квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$. В начале главы представлен обзор литературы, посвященный спиновой динамике экситонов в магнитном поле в геометрии Фойхта и моделям формирования отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции. Далее во второй главе приведены оригинальные экспериментальные результаты изучения динамики отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции ансамбля квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ в зависимости от магнитного поля. В стационарных экспериментах по исследованию спектроскопии поляризованной фотолюминесценции обнаружено, что в подансамбле относительно больших квантовых точек образца $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ наблюдается отрицательная циркулярная поляризация при квазирезонансном фотовозбуждении носителей, что свидетельствует о возбуждении в квантовых точках трионов или тетрионов. Получены зависимости поляризации фотолюминесценции от плотности мощности оптической накачки и обнаружено, что увеличение отрицательной циркулярной поляризации с мощностью связано с ориентацией спинов резидентных электронов в квантовых точках, возникающей вследствие рекомбинации резидентных электронов с фотовозбужденными дырками, в результате чего происходит замещение резидентных электронов фотовозбужденными. Представлены результаты изучения спектра возбуждения фотолюминесценции. Показано, что при приближении энергии возбуждения к энергии детектирования фотолюминесценции циркулярная поляризация из отрицательной становится положительной. Обнаружено, что зависимость отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции от магнитного поля в геометрии Фарадея имеет двухконтурный немонотонный характер. Показано, что увеличение отрицательной циркулярной поляризации в малых полях связано с замедлением спиновой релаксации электронов. Уменьшение отрицательной циркулярной поляризации в больших полях происходит, когда зеемановское расщепление экситонных состояний превосходит анизотропное обменное расщепление состояний оптически активного экситона.

Исследована временная зависимость интенсивности и степени циркулярной поляризации фотолюминесценции квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и проведено исследование динамики отрицательной циркулярной поляризации фотолюминесценции в магнитном поле в геометрии Фойхта. Проанализирован вклад спиновой ориентации электронов в поляризацию фотолюминесценции отрицательно заряженных экситонов. В ходе анализа спиновой динамики X^- трионов в магнитном поле показано, что ларморовская прецессия электронных

спинов не вызывает осцилляций поляризации фотолюминесценции ансамбля X^- трионов. В результате моделирования экспериментальных зависимостей установлено, что отсутствие осцилляций поляризации фотолюминесценции X^- трионов может быть вызвано хаотичными деформациями в плоскости квантовых точек (при этом средний g -фактор дырки обращается в ноль), или достаточно большим разбросом дырочного g -фактора по ансамблю дырок относительно его среднего значения. Исследована зависимость интегральной по времени поляризации фотолюминесценции от периода возбуждающих лазерных импульсов. Показано, что при накоплении спиновой ориентации резидентных электронов отрицательная циркулярная поляризация фотолюминесценции увеличивается. Рассмотрено влияние ядерного поля на деполяризацию стационарной фотолюминесценции. Измерен эффект Ханле при наличии и в отсутствие динамической поляризации ядер.

В третьей главе диссертации представлены результаты изучения влияния ядерного квадрупольного взаимодействия на спиновую динамику электронов в положительно и отрицательно заряженных, а также нейтральных экситонах в подансамбле относительно небольших квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$. Данный эффект изучен по особенностям динамики поляризованной фотолюминесценции квантовых точек $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ в магнитном поле.

В начале третьей главы представлен обзор литературы, посвященной спиновой релаксации в режиме длинных и коротких времен корреляции. Затем приведены результаты экспериментального исследования влияния магнитного поля на спиновые свойства заряженных экситонов. Рассмотрены стационарные зависимости циркулярной поляризации фотолюминесценции от магнитного поля при наличии динамической поляризации ядер и в ее отсутствие. Из экспериментальных результатов следует, что даже при наличии внешнего магнитного поля в геометрии Фойхта поле Оверхаузера ориентировано вдоль оси роста структуры, совпадающей с направлением возбуждения. Сделан вывод, что причиной стабилизации ядерных спинов вдоль оси роста квантовых точек является наличие ядерного квадрупольного взаимодействия, вызванного деформацией. Проведено сравнение время-разрешенных зависимостей циркулярной поляризации фотолюминесценции при наличии динамической ядерной поляризации и в ее отсутствие в различных магнитных полях. Предложена модель, описывающая весь массив экспериментальных результатов, предполагающая, что существует два независимых вклада в фотолюминесценцию, соответствующих X^+ и X^- трионам.

Затем приведен обзор литературы, посвященный влиянию ядерного квадрупольного взаимодействия на спиновую систему ядер и электронов. И проведено количественное описание динамики поляризации фотолюминесценции в отсутствие динамической ядерной поляризации. Показано, что спины электронов релаксируют во флуктуационных ядерных полях в режиме длинных времен корреляции. Динамика поляризации фотолюминесценции была аппроксимирована численно рассчитанными

зависимостями, из которых оценено характерное значение среднеквадратичной флуктуации ядерного поля, которое по порядку величины совпадает с полушириной стационарной кривой Ханле. В диапазоне полей 80 - 320 мТ динамика поляризации фотолюминесценции определяется спином электрона в X^+ трионе, в следствие чего достигается хорошее согласие теории и эксперимента. Показано, что наличие двух вкладов в ФЛ (X^+ и X^-) может являться причиной расхождения теории и эксперимента в малых полях (< 60 мТ).

В четвертой главе представлены результаты исследования выстраивания экситонов и оптической ориентации фотолюминесценции ансамбля квантовых точек (In,Al)As/AlAs в магнитном поле и в его отсутствие.

Так же, как и в предыдущих главах, в начале четвертой главы представлен обзор литературы. Он посвящен проблеме непродолжительного времени жизни экситона в прямозонных квантовых точках. Одним из вариантов решения данной проблемы является использование квантовых точек с непрямыми в импульсном пространстве оптическими переходами. Далее в этой главе представлены оригинальные результаты исследования спектров и динамики фотолюминесценции квантовых точек (In,Al)As/AlAs. Обнаружено, что спектр состоит из излучения как минимум двух типов комплексов с существенно отличающимся временем жизни. Детальный анализ спектров фотолюминесценции, полученных при селективном возбуждении, показывает, что наличие таких вкладов в фотолюминесценции связано с наличием в ансамбле квантовых точек подансамблей с прямыми и непрямыми в импульсном пространстве оптическими переходами. С целью описания экспериментальных спектров рассчитана зависимость энергетического зазора Γ и X электронов от энергии фотона возбуждающего света для непрямозонных квантовых точек (In,Al)As/AlAs. Для этого смоделирована энергия основного состояния дырок, Γ и X электронов в квантовых точках (In,Al)As/AlAs в зависимости от размера и состава квантовых точек в приближении эффективной массы для простой зоны. Приближение учитывает напряжение, деформационные потенциалы и непараболичность электронной дисперсии. Получено хорошее совпадение теории и эксперимента в отсутствие в теории подгоночных параметров.

Представлены результаты исследования оптической ориентации спинов и выстраивания экситонов в селективно возбуждаемых прямозонных и непрямозонных квантовых точках. Получены сведения о структуре уровней экситонов и спиновой релаксации. Обнаружено, что в спектрах фотолюминесценции непрямозонных квантовых точек наблюдается высокая степень циркулярной поляризации. Этот эффект определяется тем, что анизотропное обменное взаимодействие X электрона с Γ дыркой незначительно в не прямых экситонах в квантовых точках. Анализ экспериментальных зависимостей выстраивания экситонов и оптической ориентации фотолюминесценции прямозонных квантовых точек в магнитном поле в

геометрии Фарадея позволил оценить величину анизотропного обменного расщепления уровней прямых экситонов. С целью исследования спиновой релаксации в непрямозонных квантовых точках (In,Al)As/AlAs изучена оптическая ориентация фотолюминесценции в магнитном поле в геометрии Фойхта и Фарадея. Совокупность экспериментальных данных и рассмотрение различных механизмов спиновой релаксации показывают, что анизотропное обменное взаимодействие в таких экситонах незначительно и релаксация спинов происходит во флуктуационных эффективных магнитных полях в режиме длинного времени корреляции.

В Заключение приведены основные результаты диссертационной работы.

Результаты работы были представлены на всероссийских и международных научных конференциях и опубликованы в научных статьях в известных рецензируемых научных изданиях Физика Твердого Тела и Physical Review B.

В диссертации С.В. Некрасова достаточно полно описаны и проанализированы использованные методы и представлены полученные результаты. Диссертация иллюстрирована большим количеством рисунков, подтверждающих сделанные в работе выводы. В тоже время к работе имеются замечания:

1. На мой взгляд не точно сформулировано первое защищаемое положение, а именно: «Отсутствие биений обусловлено тем, что: (i) спин триона в основном состоянии определяется тяжелой дыркой». В действительности биений нет, потому что разброс частот спиновой прецессии дырки превышает среднее значение частоты прецессии, что подробно разбирается в диссертационной работе.
2. В положениях 3 и 4 указание конкретных значений физических величин уменьшает общность сделанных утверждений. Это годится для формулировки результатов работы, но ослабляет защищаемые положения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Диссертация С.В. Некрасова представляет собой полное и квалифицированно выполненное исследование в актуальной области физики твердого тела. Достоверность полученных в диссертационной работе результатов обеспечивается использованием в работе современного оборудования, высоким качеством изучаемых образцов, проверенных экспериментальных техник и физических принципов, совпадением экспериментально полученных результатов с результатами, полученными с помощью моделирования, а также с данными, имеющимися в литературе. Практическая значимость работы состоит в том, что полученные результаты расширяют область научных знаний по теме диссертации. Это может быть полезно при реализации устройств спинтроники и в процессе дальнейшего фундаментального изучения оптических свойств квантовых точек. Кроме этого, полученные новые знания могут быть включены в курсы лекций для

студентов университетов. Автореферат правильно передает содержание диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Сергея Васильевича Некрасова «Оптическая ориентация спинов в полупроводниковых квантовых точках $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ и $(\text{In,Al})\text{As}/\text{AlAs}$ » отвечает 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 Сергей Васильевич Некрасов заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,
профессор кафедры физики твердого тела
физического факультета Санкт-Петербургского
государственного университета
доктор физико-математических наук,
(специальность 01.04.10 – физика полупроводников)

Югова И.А.

«__» _____ 2021

Подпись И.А. Юговой удостоверяю:



Н. Ю. Владимиров
17.09.2021

Контактная информация:

198504 Санкт-Петербург, Петродворец, ул. Ульяновская д. 1

i.yugova@spbu.ru

Тел: +78124284546