ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертационную работу

Коптевой Наталии Евгеньевны на тему «Совместная электрон-ядерная спиновая динамика в полупроводниковых наноструктурах»,

представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

по специальности 01.04.10 – физика полупроводников

Диссертационная работа Н. Е. Коптевой посвящена исследованию спиновых явлений в полупроводнике ZnSe, легированном донорами, и полупроводниковых наноструктурах с заряженными квантовыми точками InGaAs/GaAs. Исследования спиновых явлений в полупроводниках и полупроводниковых наноструктурах в последние годы привлекают большое внимание вследствие перспектив их использования в активно развивающихся направлениях физики полупроводников – спинтронике и спинoптоэлектронике. Ожидается, что использование спиновой степени свободы электронов может открыть новые возможности в информационных технологиях. В работе Н. Е. Коптевой основное внимание уделяется исследованию эффектов, возникающих благодаря взаимодействию электронной спиновой системы с ядерной, которое оказывает большое влияние на спиновые свойства обеих систем.

Основные результаты работы состоят в экспериментальном и теоретическом исследовании электрон-ядерной спиновой динамики электронов, локализованных на донорах F в ZnSe, и особенностей электрон-ядерной спиновой динамики электронов, локализованных в самоорганизованных квантовых точках InGaAs/GaAs, которые возникают из-за большой дисперсией g-фактора электронов в ансамбле таких точек. К моменту начала исследований диссертанта было установлено, что с одной стороны, взаимодействие локализованных спинов электронов в полупроводниках с ядерными спинами, создающими локальное флуктуирующее магнитное поле, является одной из основных причин спиновой релаксации, а с другой, может приводить к стабилизации электронно-ядерной системы при периодической оптической накачке в геометрии Фойхта за счет подстройки частоты прецессии спинов электронов к частоте следования лазерных импульсов. Причина наблюдаемой подстройки оставалась не совсем ясной. Поэтому исследование основных механизмов взаимодействия спинов локализованных электронов с ядерными спинами было крайне необходимо для решения проблемы когерентного управления спинами. Поэтому

Вх. N 09/2-485 от 22.11.2019

актуальность диссертационной работы Н. Е. Коптевой не вызывает сомнений как с фундаментальной, так и прикладной точек зрения.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 108 наименований и включает 26 рисунков и 3 таблицы.

В первой главе диссертант представляет достаточно полный обзор научных работ, посвященных исследованию оптической ориентации спинов в полупроводниках и спиновой динамики локализованных носителей в структурах ZnSe:F и ансамбле квантовых точек InGaAs/GaAs, обсуждает нерешенные проблемы и предлагает использовать для решения ряда из них расширенный метод накачка-зондирование, Этот метод, предложенный ранее в лаборатории проф. Манфреда Байера в Техническом Университете г. Дортмунд, позволил выполнить детальные исследования совместной электрон-ядерной спиновой динамики в исследуемых структурах.

Во второй главе приводятся характеристики исследуемых в работе структур (ZnMg)Se/ZnSe, легированных F, и образцов (In,Ga)As/GaAs с самоорганизованными квантовыми точками и подробно описываются используемые экспериментальные методы измерения сигналов керровского и фарадеевского вращения с высоким временным разрешением, а также излагается теоретический подход к моделированию измеренных сигналов, предложенный в работе ее научного руководителя Юговой с соавторами.

В третьей главе диссертант излагает результаты экспериментальных исследований совместной электрон-ядерной спиновой динамики в $Zn_{0.92}Mg_{0.08}Se$/ZnSe:F и затем приводит теоретическое объяснение обнаруженных проявлений электрон-ядерной спиновой динамики в сигнале керровского вращения. Поскольку спиновый ансамбль электронов на донорах в ZnSe является однородным, ожидалась линейная зависимость частоты прецессии от внешнего магнитного поля. В экспериментах же при периодической оптической накачке было обнаружено, что эта зависимость является ступенчатой, причем положения ступенек при малой и большой плотностях возбуждения оказались разными. Диссертант нашла объяснение этому эффекту, включив в рассмотрение поляризацию ядерных спинов, создающих дополнительное эффективное магнитном поле – поле Оверхаузера, и объяснила дискретизацию зависимости частоты прецессии от внешнего магнитного поля эффектом ядерной фокусировки, приводящей к дискретизации ядерной спиновой поляризации, а также показала, что предложенная модель хорошо объясняет зависимость условий дискретизации от интенсивности лазерного возбуждения.

Четвертая глава посвящена исследованию совместной электрон-ядерной спиновой динамики в ансамбле однократно заряженных самоорганизованных (In,Ga)As/GaAs

квантовых точек с g-фактором электронов, отличным от константы из-за его зависимости от размера точек. В таком ансамбле во внешнем магнитном поле в условиях периодического возбуждения лазерными импульсами с периодом T происходит синхронизация набора прецессионных мод с разностью частот 1/T, возникающая благодаря дисперсии g-фактора электронов. Для исследования спиновой динамики в этом случае авторы использовали методику накачки-зондирования с высоким временным разрешением протокол импульсов, в котором за последовательностью лазерных импульсов следует длинный темный промежуток. Из анализа свободной эволюции спиновой поляризации электронов в рамках такого протокола импульсов были получены спектры прецессионных мод без и с привлечением дополнительного радиочастотного поля, подавляющего ядерную поляризацию. Использование радиочастотного поля позволило однозначно выделить ядерные эффекты: долгоживущая ядерная спиновая поляризация, обусловленная периодическим возбуждением, не только значительно ускоряет нарастание спиновой поляризации электронов, но и вызывает образование дополнительных мод прецессии спинов электронов в ансамбле квантовых точек. Появление дополнительных мод в системе квантовых точек, g-фактор в которых зависит от их размера, убедительно объяснено в рамках расширенной модели динамической ядерной поляризации, учитывающей точки, в которых ядерные спины активируют дополнительный режим прецессии спина электрона.

В целом, в диссертации **Наталии Евгеньевны Коптевой** четко сформулированы цели исследования, предложены и использованы экспериментальные методики, позволяющие детально исследовать ядерные эффекты в электронных спиновых ансамблях, и предложена теоретическая модель, хорошо описывающая все экспериментально наблюдаемые эффекты. Диссертация проиллюстрирована большим количеством рисунков, полностью подтверждающих сделанные в работе выводы. Сделанные научные выводы полностью обоснованы. Можно, однако, пожелать автору более внимательно относиться к тексту диссертации, чтобы избежать некорректностей, затрудняющих ее восприятие. В частности, в тексте вместо эВ часто написано еВ, в тексте и в подписи к рисунку 4.3 перепутаны описания рисунков (а) и (б), и более серьезная некорректность допущена на стр. 25, на которой диссертант пишет “А также g-фактор экситона, а измерения в наклонном поле позволили определить g-фактор электрона и дырки в плоскости структуры. Также в работе [19] получен важный результат, что абсолютная величина поперечного g-фактора линейно уменьшается с увеличением энергии возбуждения, из-за того, что увеличение ширины запрещенной зоны приводит к увеличению эффекта локализации электрона”. В последнем предложении не указано о g-факторе какой частицы идет речь и не ясно, почему g-фактор этой частицы зависит от “энергии возбуждения”. После обращения к работе [19], в которой

указано, что речь идет, соответственно, об электроне и “emission energy”, становится ясно, что в объяснении обнаруженного уменьшения g-фактора переставлены местами причина (увеличение локализации электрона) и следствие (увеличение эффективной ширины запрещенной зоны в квантовой точке). Кроме того, из формулы (15) в работе [19] следует, что эффект явно не является линейным, линейная аппроксимация в узком интервале энергий, используемая в диссертации, оправдана пока можно ограничиться первым членом в разложении в ряд Тейлора.

Основные результаты работы доложены Коптевой на научных семинарах ФТИ им. А. Ф. Иоффе и нескольких российских и международных конференциях по физике низкоразмерных систем и полупроводников и опубликованы в ведущих физических журналах, включая Nature Communications и Physical Review B, что подтверждает **новизну** и **достоверность** полученных результатов.

Из сказанного выше следует, что актуальность исследований, новизна, достоверность и практическая значимость выводов, сделанных в диссертационной работе Н. Е. Коптевой не вызывают сомнений. Полученные результаты вносят существенный вклад в понимание эффектов взаимодействия ядерных и электронных спиновых подсистем в полупроводниках и в полупроводниковых наноструктурах. Результаты выполненных исследований этих эффектов будут востребованы при проектировании устройств спиновой электроники и фотоники. Это определяет **научную и практическую значимость** диссертации. Основные результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики полупроводников и ведущих разработку приборов и устройств микро- и оптоэлектроники (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт физики твердого тела РАН, Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт физики полупроводников СО РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Институт радиотехники и электроники РАН, Институт физики микроструктур РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбГУ и др.).

Диссертационная работа Н. Е. Коптевой в целом производит очень хорошее впечатление. Научные положения и результаты диссертации хорошо аргументированы и обоснованы. Основные результаты работы полностью отражены в публикациях в авторитетных международных журналах, докладывались на российских и международных конференциях.

Диссертация Коптевой Наталии Евгеньевны на тему: «Совместная электрон-ядерная спиновая динамика в полупроводниковых наноструктурах», полностью отвечает основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения

ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете». По моему убеждению, автор диссертационной работы – Коптева Наталия Евгеньевна, безусловно, заслуживает присвоения ей искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.10 – физика полупроводников. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета

доктор физико-математических наук,

член – корреспондент РАН, профессор,

Институт физики твердого тела РАН,

Главный научный сотрудник Кулаковский Владимир Дмитриевич

142432, Московская обл., г. Черноголовка,

ул. Академика Осипьяна, д. 2.

Тел. 8(496)5222691 e-mail: kulakovs@issp.ac.ru

18.11.2019 г

Подпись удостоверяю : зав. канцелярией Лидин М.В

КАНЦЕЛЯРИЯ