

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Кавокина Кирилла Витальевича на тему: «Релаксация углового момента и энергии в спиновых системах легированных полупроводников», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 — Физика полупроводников.

Диссертационная работа К.В. Кавокина посвящена одной из актуальных задач спиновой физики - исследованию релаксации неравновесных спиновых систем, созданных с использованием оптической накачки или электрической инжекции в полупроводниках. Большой интерес к исследованиям спиновых эффектов в полупроводниковых структурах в значительной мере обусловлен поисками возможностей создать новое поколение полупроводниковых устройств для хранения, обработки и передачи информации на основе использования спиновых явлений в таких структурах. Развитие технологии изготовления полупроводниковых наноструктур в конце прошлого века привело к резкому росту исследований физики спиновых явлений и возможных путей их использования в спинтронике. Диссертант подробно исследовал механизмы релаксации неравновесных момента количества движения и энергии в спиновой системе резидентных электронов и ядер решётки в различных полупроводниковых системах и фундаментальные ограничения на время жизни неравновесного спина электронов и ядер, без понимания и знания которых невозможно создание эффективных устройств обработки информации, основанных на использовании краткосрочной спиновой памяти.

**Актуальность** диссертационной работы К. В. Кавокина как с фундаментальной так и прикладной точек зрения не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, списка литературы из 79 наименований и содержит 26 рисунков и 2 таблицы.

В первой главе К. В. Кавокин представляет достаточно полный обзор результатов теоретических и экспериментальных исследований в рамках темы диссертационной работы. Им рассмотрены специфика основных спиновых и магнитных взаимодействий в полупроводниках и полупроводниковых структурах и их влияние на спиновую динамику, кратко изложены основные принципы оптической ориентации спинов полупроводниках и детально рассмотрены механизмы спиновой релаксации электронов и ядер. Для полноты картины автор использовал также ряд результатов, полученных и опубликованных им в 2005 – 2017 годах.

Вторая глава посвящена исследованию особенностей обменного взаимодействия локализованных электронов проводимости в полупроводниковых кристаллах и структурах без центра инверсии. Автор обратил внимание, что широко использовавшееся в работах

предположение об изотропности обменного взаимодействия двух локализованных электронов в этом случае является неверным из-за того, что нечётные по волновому вектору слагаемые в гамильтониане для электронов в зоне проводимости приводят к возникновению эффективного магнитного поля, действующего на спин электрона при его движении. Диссертант показал, что в таких структурах гамильтониан взаимодействия имеет вид скалярного произведения спинов, повернутых друг относительно друга на угол, возрастающий с ростом расстояния между центрами локализации. Поэтому анизотропное взаимодействие спинов в отличие от обычного скалярного приводит к несохранению полного углового момента взаимодействующих квазичастиц и является одним из механизмов релаксации неравновесного спина в таких полупроводниках.

В главе 3 автором детально теоретически и экспериментально на примере n-GaAs исследована спиновая релаксация электронов при низких температурах в примесной зоне полупроводников без центра инверсии. На основании исследования широкого набора образцов с концентрацией доноров от  $10^{14}$  до  $10^{19}$  см<sup>-3</sup> определены области доминирования различных механизмов спиновой релаксации, найдены ограничения на величину времени спиновой релаксации в отсутствие магнитного поля, и исследован эффект внешнего магнитного поля на спин-решёточную релаксацию. В частности, установлено, что доминирующими механизмами спиновой релаксации в нулевом магнитном поле по мере увеличения концентрации доноров последовательно являются релаксация за счёт сверхтонкого взаимодействия с ядрами решётки, затем рассмотренный автором во второй главе спин-орбитальный механизм, обусловленный анизотропией обменного взаимодействия между локализованными электронами, а после перехода Мотта от диэлектрической к металлической проводимости - релаксация спина свободных электронов на поверхности Ферми по механизму Дьяконова-Переля. Также показано, что спин-решеточная релаксация в слаболегированных полупроводниках замедляется в магнитном поле и существует диапазон концентраций примесей и температур магнитных полей, в котором энергетическая релаксация спиновой системы электронов, локализованных на донорах, происходит медленнее, чем релаксация их неравновесного спина. Наличие такого диапазона открывает путь к охлаждению спиновой системы электронов посредством оптической или токовой инжекции неравновесного спина.

Последние три главы посвящены исследованию механизмов спин-решёточной релаксации и формирования спиновой температуры в ядерной спиновой системе. Интерес к этой задаче связан с тем, что в полупроводниках имеется уникальная возможность создания высокой спиновой поляризации ядер, приводящей к появлению эффективного магнитного поля (поле Оверхаузера), посредством их динамической поляризации

оптически ориентированными спинами электронов. Для исследования механизмов спин-решёточной релаксации и формирования спиновой температуры в спин-поляризованной ядерной системе полупроводника, предоставленной только самой себе, были необходимы методы, не возмущающие ядерную спиновую систему. Широко используемые оптические методы, основанные на фотовозбуждении с генерацией носителей заряда, неизбежно возмущают и ядерную спиновую систему из-за ее взаимодействия с электронной спиновой системой. Диссертантом были предложены и реализованы три невозмущающих оптических метода измерения намагниченности ядерной спиновой системы, в которых были использованы частично и свойства спиновых систем, обнаруженные им в ходе выполнения данной работы. Это i) исследование фарадеевского вращения плоскости поляризации зондирующего света в области прозрачности полупроводника, индуцированного полем Оверхаузера оптически ориентированных ядерных спинов, ii) регистрация временной динамики ядерной намагниченности по спектрам спинового шума резидентных электронов и iii) исследование спин-решёточной релаксации ядер на основе анализа поляризованной фотолюминесценции при оптической ориентации электронных и ядерных спинов с выключением накачки на определенный промежуток времени. Эти методы подробно описаны и обоснованы в главе 4.

В главе 5 обсуждаются результаты исследования термодинамики оптически охлажденной спиновой системы ядер решётки в GaAs с помощью нерезонансного фарадеевского вращения и спектроскопии спиновых шумов. На основании анализа измеренных зависимостей намагниченности ядерной спиновой системы в слое GaAs, помещенном между брегговскими зеркалами в микрорезонаторе, при адиабатическом сканировании магнитного поля через ноль автором установлено, что ее поведение описывается спиновой температурой при использовании в качестве подгоночного параметра локального поля  $B_L \approx 8$  Гс, которое сильно превышает поле  $B_L \approx 1,5$  Гс, рассчитанное теоретически для диполь-дипольного взаимодействия ядерных спинов в GaAs. Измерения  $B_L$  в объёмном эпитаксиальном слое GaAs с помощью методики спектроскопии спиновых шумов подтвердили теоретическое значение. Поэтому авторы предположили, что большая величина  $B_L$  в слое GaAs в микрорезонаторе является результатом большого квадрупольного расщепления ядерных спиновых уровней вызванного упругой деформацией этого слоя из-за разницы параметров решеток GaAs и AlAs в брегговских зеркалах. Оцененная автором необходимая величина деформации  $\sim 0,01\%$  не является неразумной.

Глава 6 посвящена исследованию механизмов отогрева оптически охлажденной спиновой системы в GaAs с различным уровнем и типом легирования. Автором показано,

что в диэлектрической фазе n-GaAs при температурах ниже 20К основными механизмами спин-решёточной релаксации ядер, контактирующих с локализованными на донорах электронами, является сверхтонкая релаксация спинов ядер, а для удаленных - спиновая диффузия к донорным центрам и квадрупольная релаксация. Также найдено, что спин-решёточная релаксация ядер в GaAs p-типа после их оптической накачки происходит на три порядка быстрее, чем в GaAs n-типа, и показано, что причиной столь быстрой релаксации являются флуктуаций зарядового состояния донорно-акцепторных пар.

В диссертации К. В. Кавокина четко сформулированы и обоснованы сделанные основные выводы. Диссертант также подробно обсуждает и возможные причины наблюдающихся в ряде случаев существенных расхождений между экспериментальными и предсказанными на основе предлагаемых им упрощенных моделей результатами, с указанием параметров примесной системы, знание которых необходимо для уточнения теоретической модели.

К диссертации имеются лишь небольшие замечания.

1. Большая величина локального поля в GaAs слое в микрорезонаторе связана с упругой деформацией этого слоя, требуемая величина которой,  $\sim 0,01\%$ , вполне возможна. Тем не менее, было бы желательно также дополнительно измерить величину поля смешивания  $B_{\text{mix}}$  и сопоставить ее с рассчитанной с учетом сделанных оценок величины квадрупольного расщепления ядерных спиновых уровней в слое GaAs.

2. Температурная зависимость времени спин-решеточной релаксации  $T_1$  в GaAs p-типа, приведенная на рис. 6.4б, демонстрирует резкий рост при понижении температуры ниже  $\sim 6$  К, положение которого не зависит от магнитного поля и концентрации акцепторов. В рассчитанных кривых пороговая температура примерно в 1.5 раза выше. Чем может быть обусловлено такое достаточно большое расхождение?

3. Замечание по оформлению. В 6 главе большое количество экспериментальных кривых для образцов с разной структурой (объемные, гетероструктуры и микрорезонаторы), типом легирования и концентрацией сгруппировано на минимальном количестве рисунков и приведено в первом параграфе, а их обсуждение, в основном, - в двух следующих параграфах. Для лучшего восприятия текста желательно было бы разделить кривые по рисункам в соответствие с каждой обсуждаемой темой и разнести их по тексту.

4. Величины  $T_1$  (10К) для образца n-типа в нулевом магнитном на рис 6.4 б совпадают с величинами  $T_1$  на рис. 6.4а для  $B > 30$  Гс, а не для  $B = 0$ .

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы. Диссертационная работа К.В. Кавокина в целом производит очень хорошее впечатление. Научные положения и результаты диссертации хорошо


аргументированы и обоснованы К. В. Кавокин является признанным специалистом в области физики спиновых явлений в полупроводниковых кристаллах и наноструктурах. Им опубликовано большое число работ в ведущих отечественных и зарубежных журналах, в том числе, в Phys. Rev. B и X, Phys. Rev. Lett., Appl Phys. Lett. и обзорных статьях. Работы многократно и с успехом представлялись на ведущих международных конференциях по физике полупроводников, в том числе и приглашенными докладами, что подтверждает **новизну** и **достоверность** полученных результатов.

Из сказанного выше следует, что актуальность исследований, новизна, и достоверность выводов, сделанных в диссертационной работе К. В. Кавокина не вызывают сомнений. Поставленную в диссертации задача – исследовать механизмы релаксации неравновесного момента количества движения и энергии внесённых в спиновую систему резидентных электронов и ядер предварительной оптической накачкой или электрической инжекцией – выполнена. Полученные результаты вносят существенный вклад в новое направление – физику спиновых явлений в электронных и ядерных системах в полупроводниковых наноструктурах. Несомненна и практическая значимость полученных результатов, поскольку они позволяют возможности оценить перспективы использования спиновых систем для создания устройств обработки информации с использованием краткосрочной спиновой памяти. Это определяет **научную и практическую значимость** диссертации.

Основные результаты, полученные в диссертации, полностью отражены в научных публикациях и могут быть рекомендованы к использованию в организациях, проводящих исследования в области физики полупроводников и ведущих разработку приборов и устройств микро- и оптоэлектроники (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, ИФТТ РАН, ИОФ РАН им. А.М. Прохорова, ИФП СО РАН, ФИАН им. П.Н. Лебедева, ИРЭ РАН, ИФМ РАН, МГУ им. М.В. Ломоносова, СПбГПУ и др.).

Диссертация Кавокина Кирилла Витальевича на тему: «Релаксация углового момента и энергии в спиновых системах легированных полупроводников» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Кавокин Кирилл Витальевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 — Физика полупроводников. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета  
Чл.-корр. РАН, проф. д.ф.-м.н.  
главный научный сотрудник ИФТТ РАН  
5 июня 2020 г.

 /Кулаковский В. Д./