

## 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.

Диссертация Кавокина Кирилла Витальевича посвящена исследованию процессов релаксации углового момента и энергии в спиновых системах электронов и ядер в полупроводниках различной степени легирования. Экспериментально исследована спиновая релаксация собственных носителей в кристаллах арсенида галлия n-типа в широком диапазоне концентраций примеси, захватывающем переход диэлектрик-металл, и спин-решёточная релаксация ядер в объёмных кристаллах и различных гетероструктурах с микрорезонаторами. Сопоставление с развитой в работе теорией позволяет распространить найденные закономерности на широкий класс полупроводниковых материалов и структур.

**Актуальность и востребованность** этих исследований определяется не утихающим в последние годы интересом к спиновым явлениям в твёрдых телах с точки зрения как фундаментальной физики, так и приложений в разрабатываемых устройствах спинтроники.

**Практическое приложение** полученные в диссертации результаты могут найти в спинтронике и нанофотонике, а также в квантовой информатике для проектирования устройств, оперирующих спиновыми состояниями.

Диссертация состоит из Введения, 6 глав и Заключения. В списке литературы 79 наименований.

Во **Введении** формулируются актуальность, научная новизна работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, имеются сведения об апробации работы, приведен список вошедших в диссертацию публикация, и приведена структура и содержание диссертации.

В **главе 1** приведён обзор взаимодействий спинов носителей заряда и ядер в полупроводниках. Обсуждаются принципы оптической ориентации спинов и основные механизмы спиновой релаксации электронов и ядер в полупроводниках, известные к моменту начала работы.

В **главе 2** теоретически демонстрируется наличие анизотропного вклада в обменное взаимодействие электронов в полупроводниковых кристаллах и структурах – системах без центра пространственной инверсии. Показано, что анизотропное обменное взаимодействие возникает из-за поворота спина электрона при туннелировании. Получено аналитическое выражение для угла поворота и силы анизотропного обмена в низкоразмерных структурах с линейными по волновому вектору спин-орбитальными слагаемыми в гамильтониане.

09/2-02-321 от 03.06.2020

**Глава 3** посвящена систематическому экспериментальному и теоретическому исследованию спиновой релаксации электронов в полупроводниках n-типа при низких температурах в широком диапазоне концентраций донорной примеси. Путём сопоставления полученных экспериментальных результатов и литературных данных с развитой теорией показано, что спиновая релаксация определяется тремя основными механизмами. В диэлектрической фазе (при концентрации примесей ниже перехода Мотта) это сверхтонкое взаимодействие со спинами ядер решётки и анизотропное обменное взаимодействие, теоретически предсказанное автором в главе 2. Выше перехода Мотта, когда в кристалле присутствует вырожденный электронный газ, это механизм Дьяконова-Переля для электронов на поверхности Ферми. Также продемонстрировано различие времён релаксации углового момента и энергии в электронной спиновой системе, проявляющееся в биекспоненциальной спиновой динамике при оптической ориентации спинов импульсами циркулярно поляризованного света в магнитном поле.

Главы 4, 5 и 6 посвящены исследованию ядерной спиновой системы полупроводника и влиянию взаимодействия с равновесными носителями заряда на её свойства.

В **главе 4** описываются использованные для этого невозмущающие оптические методы, два из которых основаны на физических явлениях, впервые наблюдавшихся в работах автора – нерезонансном Фарадеевском вращении, индуцированном полем Оверхаузера в микрорезонаторе, и сдвигом Зеemanовского резонанса в спектре спиновых шумов из-за взаимодействия с поляризованными ядерными спинами. Также описан модифицированный для исследования ядерной спиновой релаксации метод фотолюминесценции с тёмными интервалами, позволяющий расширить класс исследуемых структур.

В **главе 5** исследуется термодинамика ядерной спиновой системы в слабом магнитном поле. Методами Фарадеевского вращения и спинового шума в структурах с микрорезонаторами впервые осуществлён эксперимент по адиабатическому перемагничиванию ядерной спиновой системы вблизи нулевого магнитного поля. Показано, что теория спиновой температуры точно описывает поведение ядерной спиновой системы, несмотря на квадрупольное расщепление ядерных спиновых уровней, индуцированное деформацией активного слоя в структуре с микрорезонатором. Продемонстрировано, что квадрупольное расщепление увеличивает теплоёмкость ядерной спиновой системы, что важно для дальнейшего исследования спин-решёточной релаксации.

В **главе 6** исследуется спин-решёточная релаксация ядер в различных структурах на основе GaAs (объёмных кристаллах, гетероструктурах, активных слоях структур с микрорезонаторами, квантовых ямах) n- и p-типа легирования. Показано, что при низких температурах спин-решёточная релаксация ядер в полупроводниках обусловлена несколькими механизмами, так или иначе связанными с равновесными носителями заряда. В структурах с электронным газом это механизм Корринги (сверхтонкое рассеяние электронов на поверхности Ферми), дополненный спиновой диффузией к парамагнитным центрам, образованным электронами, локализованными на кластерах примесных атомов. В диэлектрических структурах n-типа в сильном магнитном поле доминирует известный ранее

механизм спиновой диффузии к донорным центрам. В слабых магнитных полях скорость релаксации возрастает на порядок или даже более из-за квадрупольного отогрева ядерной системы, индуцированного флуктуирующими электрическими полями, созданными прыжками электронов в примесной зоне. В кристаллах р-типа спиновая диффузия в процессе оптической накачки ядер подавлена квадрупольным взаимодействием, поэтому наблюдается релаксация ядер только вблизи пустых донорных центров. Она определяется флуктуациями заряда близлежащих акцепторов и характеризуется временами, на три порядка более короткими, чем в структурах n-типа с аналогичным уровнем легирования.

В **Заключении** обрисована общая картина релаксации углового момента и энергии взаимодействующих спиновых систем носителей заряда и ядер решётки в полупроводниках. Построение такой общей картины и обуславливает высокую **научную и практическую значимость** данной диссертационной работы.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертации, подтверждается их внутренней непротиворечивостью, сопоставлением полученных экспериментальных и теоретических результатов друг с другом и с имеющимися литературными данными.

При чтении диссертации возникли следующие **замечания**:


1. Метод спиновых шумов рассматривается в работе как невозмущающий, однако известно, что механизм возникновения сигнала спинового шума аналогичен механизму комбинационного рассеяния света с переворотом спина, и таким образом зондирующий луч света может, в принципе, привести к изменению спинового состояния.
2. В микрорезонаторах амплитуда оптического поля многократно усилена. Не может ли это повлиять на спиновую динамику в таких структурах? В диссертации ограничения по мощности и поляризации зондирующего пучка не обсуждаются.
3. В теоретической части главы 3 подробно анализируются механизмы спиновой релаксации электронов выше и ниже перехода диэлектрик-металл, но не обсуждается область перехода, где в эксперименте наблюдается особенность в концентрационной зависимости времени релаксации.

В заключение следует отметить, что указанные замечания не умаляют значимости диссертационной работы, которая открывает новое направление в исследовании спиновых состояний в полупроводниковых системах.

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.

Доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник федерального государственного бюджетного учреждения науки "Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской Академии Наук",



Шубина Татьяна Васильевна

Дата

27.05.2020