

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 экспериментальному и теоретическому исследованию спиновой релаксации электронов и ядер в полупроводниках различной степени легирования. Работа представляет собой тщательное исследование как систем со свободными носителями, так и с локализованными. Переход между этими предельными случаями прослежен по изменению времени электронной спиновой релаксации при изменении уровня легирования в полупроводниках n-типа вблизи порога подвижности. Проведены уникальные исследования времен ядерной спиновой релаксации, для чего использованы специальные экспериментальные методы. Редкой отличительной особенностью работы является то, что автор провёл как экспериментальные, так и теоретические исследования мирового уровня.

Актуальность и востребованность этих исследований не вызывает сомнений, поскольку речь идет о спиновой физике, а исследования в этой области позволяют установить важные микроскопические механизмы спиновой динамики в различных полупроводниковых системах.

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 статей, в которых опубликовано содержание работы, и приведена структура диссертации и содержание ее глав.

В главе 1 приведён обзор спин-зависимых взаимодействий в полупроводниках – зеemanовского, магнитодипольного, сверхтонкого, спин-орбитального, квадрупольного и обменного. Сформулированы основные принципы оптической ориентации спинов и обсуждены механизмы спиновой релаксации электронов и ядер в полупроводниках. В конце главы отмечено, что спин-решеточная релаксация в слабых магнитных полях к началу работы над диссертацией исследована не была.

В главе 2 рассмотрено обменное взаимодействие электронов в полупроводниковых системах без центра пространственной инверсии. Сделан вывод о его анизотропном характере, отличном от гайзенберговского. Из-за наличия нечётных по волновому вектору слагаемых в гамильтониане свободных электронов обменный гамильтониан имеет дополнительные вклады типа псевдодипольного и Дзялошинского-Мория. Его можно записать в виде скалярного произведения спинов, но эти спины повернуты друг относительно друга на некий угол, возрастающий с расстоянием между центрами локализации. В результате, полный угловой момент двух взаимодействующих частиц не сохраняется.

Глава 3 посвящена спиновой релаксации электронов в полупроводниках n-типа при низких температурах вблизи перехода металл-изолятор. Проведены тщательные экспериментальные исследования различных образцов с концентрациями электронов ниже и выше порога подвижности. С высокой точностью определены времена корреляции электронов, лимитирующие их спиновую динамику в металлической фазе, для чего учтены как эффекты обычного рассеяния, так и квантовые поправки к ним. В диэлектрической фазе рассмотрены два предельных случая – сильной локализации, реализуемый в квантовых точках, и с возможностью туннельного транспорта между центрами локализации, реализуемый при локализации на донорах. В первом случае спиновая поляризация ансамбля электронов, как известно, падает до $1/3$ от исходной из-за сверхтонкого взаимодействия со спинами ядер. Во втором случае в работе установлено, что время корреляции спина лимитируется спиновой диффузией по бесконечному кластеру доноров, которая также не связана с туннельным транспортом между донорами с переносом заряда, а определяется флип-флоп переходами из-за обменного взаимодействия. При больших концентрациях доноров в диэлектрической фазе показано, что спиновая релаксация происходит из-за анизотропного обмена при туннельных прыжках электронов, который описан в главе 2. Во внешнем магнитном поле исследуется более длинное – продольное время спиновой релаксации, связанное с передачей энергии в решётку. Различие времён продольной и поперечной релаксации продемонстрировано по биэкспоненциальной динамике фотоиндуцированного фарадеевского и керровского вращения. Показано, что энергия в решётку передаётся при туннелировании в оптимальных парах, составленных из заполненного и пустого донора с разностью энергий, равной энергии фонона с волновым вектором, равным обратному боровскому радиусу. А спиновая диффузия служит транспортом к редким оптимальным парам.

В главах 4 и 5 исследуется ядерная спиновая система в GaAs. Для исследования использована структура с микрорезонатором, где реализуется усиление сигнала фарадеевского вращения за счёт многократного прохождения света между брэгговскими зеркалами. Это позволило впервые экспериментально обнаружить поле Оверхаузера в полупроводниках. Исследовались образцы n-типа в металлической и диэлектрической фазах. В металлической фазе наблюдались две компоненты спада фарадеевского сигнала – быстрая и медленная. Медленная обусловлена полем Оверхаузера ядерных спинов, находящихся вдали от примесных центров. Быстрая компонента обусловлена электронами, локализованными на парах близко расположенных доноров. Быстрая и медленная компоненты имеют противоположные знаки. Это объясняется тем, что оптические переходы из валентной зоны в локализованные и свободные состояния более вероятны в противоположных циркулярных поляризациях. Также для исследования ядерной спиновой динамики автор использовал спектроскопию электронных спиновых шумов, позволяющую точно измерять величину поля Оверхаузера и метод фотолюминесценции с тёмными интервалами, позволяющий исследовать зависимость ядерной температуры и темпа спин-решёточной релаксации от времени. Эти методы позволили доказать применимость для ядерной спиновой системы концепции спиновой температуры. Сканирование внешнего магнитного поля через область малых полей позволяет это сделать по измерениям намагниченности. Впервые экспериментально такая концепция была доказана для ядерной спиновой системы GaAs. Были зарегистрированы как положительные, так и отрицательные ядерные температуры. Из количественного

описания результатов эксперимента определено термодинамическое локальное поле, определяющее силу спин-спиновых диполь-дипольных взаимодействий. В объемном GaAs его величина совпала с теоретической оценкой, а в структурах с микрорезонаторами оно было существенно больше, что объяснено квадрупольным взаимодействием, возникающим из-за деформации структуры.

В главе 6 исследуется спин-решеточная релаксация ядерной системы при низких температурах. Установлено, что существовавшие ранее механизмы не описывают экспериментальные данные в диэлектрическом GaAs n- и p-типов. Был предложен новый механизм – квадрупольное взаимодействие и показана его эффективность в спин-решеточной релаксации. В диэлектрическом полупроводнике n-типа удаленные от доноров ядра отогреваются под действием крупномасштабных флуктуаций электрического поля. В диэлектрическом полупроводнике p-типа спиновая диффузия отсутствует, так что ядерная поляризация релаксирует на том же месте, где была создана накачкой. Происходит это за времена на 3 порядка короче, чем в n-GaAs. В образцах p-типа квадрупольное взаимодействие обусловлено флуктуирующими полями, создаваемыми телеграфным шумом фотовозбужденных электронов, прыгающих между двумя ближайшими к донору заряженными акцепторами. В металлическом же GaAs с концентрацией свободных носителей ненамного выше перехода металл-диэлектрик спин-решеточная релаксация хорошо описывается механизмом Корринги – сверхтонким рассеянием электронов на ядерных спинах. Меньший, но тем не менее заметный вклад вносит сверхтонкая релаксация на близких парах заряженных доноров, на которых локализуются электроны, несмотря на экранирование свободными носителями. В магнитном поле изменение продольного времени релаксации невелико по сравнению с диэлектрической фазой, что объясняется существенной ролью квадрупольного взаимодействия.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается их внутренней непротиворечивостью, использованием как аппарата теоретической физики, так и экспериментальных методов.

Высокая **научная и практическая значимость** этих результатов обусловлена тем, что в диссертации глубоко исследована спиновая динамика электронов и ядер в полупроводниках.

При чтении диссертации возникли следующие **замечания**.

1. В главе 2 получен результат о развороте спинов двух локализованных электронов на угол, определяемый нечётными по импульсу слагаемыми в гамильтониане свободных электронов. Но не обсуждается, к чему приводят такие развороты в образце в целом. Можно ли что-то сказать о коррелированном состоянии всей системы?

2. С учетом кубической симметрии кристалла возможно полное снятие спинового вырождения для пары электронов, такие работы были [S. Gangadharaiah, J. Sun, and O. A. Starykh, Phys. Rev. Lett. **100**, 156402 (2008); M. M. Glazov and V. D. Kulakovskii, Phys. Rev. B **79**, 195305 (2009); M. M. Glazov, J. Phys.: Condens. Matter **22**, 025301 (2010)]. При обсуждении экспериментов, поставленных на системах с сильным обменным взаимодействием, этот факт не принимается во внимание.

3. В темп корреляции, лимитирующий спиновую релаксацию электронов в металлической фазе в полупроводниках n-типа, вносит вклад электрон-электронное рассеяние, однако это не учитывается в диссертации.

Эти замечания не снижают высокой оценки диссертационной работы. В целом диссертационная работа К. В. Кавокина по совокупности заслуживает высокой оценки благодаря высокому научному уровню ее выполнения и новизне результатов. Материалы диссертации опубликованы в авторитетных физических журналах (Physical Review Letters, Physical Review B, Scientific reports, Applied Physics Letters и др.), представлялись автором на международных конференциях, а на специализированных симпозиумах - и в виде приглашенных докладов.

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

д.ф.-м.н., Проф. РАН, зав. сектором ФТИ им. А.Ф. Иоффе



/Голуб Л.Е./

31.05.2019