

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации 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 К. В. Кавокина представляет собой всестороннее экспериментальное и теоретическое исследование релаксации неравновесной спиновой поляризации, а также энергетической релаксации поляризованных электронов и ядер в полупроводниках и полупроводниковых структурах.

Исследования спиновой физики полупроводников, иногда называемое «спинтроникой», уже более 50 лет продолжаются в ряде лабораторий России, Франции, США, и других стран. Тем не менее, до недавнего времени в этой области оставался ряд пробелов, касающихся механизмов и характерных времен релаксации неравновесного момента количества движения и энергии, как для электронов, так и для ядер кристаллической решетки.

Между тем, ясное понимание этих процессов необходимо для дальнейшего развития спиновой физики в наноструктурах и для правильной оценки перспектив создания устройств обработки информации, использующих спиновую память.

Благодаря более чем 20-летним исследованиям К. В. Кавокина, эти пробелы теперь практически заполнены, что и определяет важность и актуальность его работы.

Глава 1 диссертации дает подробный литературный обзор обширной научной литературы, относящейся к этой области исследований.

Среди многих научных результатов, впервые полученных в работах К. В. Кавокина, надо особо отметить его теоретическое предсказание, расчет, и экспериментальное подтверждение анизотропии обменного взаимодействия локализованных электронов проводимости в полупроводниковых структурах без центра инверсии, что на первый взгляд кажется совершенно неожиданным для материала с кубической симметрией. Эти результаты представлены в главе 2. Как теоретически, так и экспериментально, он показал, что такая анизотропия приводит к новому, ранее неизвестному, механизму

09/2-02-319 от 03.06.2020

спиновой релаксации электронов, локализованных на примесях в полупроводниках *n*-типа.

Как показали его экспериментальные и теоретические исследования, этот новый механизм, наряду с другими, известными ранее, определяет зависимость времени спиновой релаксации электронов в GaAs *n*-типа от концентрации донорной примеси в широком диапазоне легирования. Это несомненно важный, новый, и неожиданный результат в области, казалось бы, досконально исследованной в течение нескольких десятилетий.

В главе 3 автор диссертации также продемонстрировал совершенно не очевидный факт: существование определенного диапазона концентрации примеси и температуры, в котором энергетическая релаксация электронной спиновой системы происходит медленнее, чем релаксация их неравновесного спина, причем продольная спиновая релаксация происходит за счёт прыжков электронов в заряженных кластерах доноров и ограничена спиновой диффузией, а оптическая или токовая инжекция неравновесного спина в продольном магнитном поле может сопровождаться охлаждением спиновой системы электронов.

В этой главе (опять же, как теоретически, так и экспериментально) установлена довольно сложная картина спиновой релаксации электронов в легированных полупроводниках *n*-типа при низких температурах в зависимости от величины приложенного магнитного поля. Оказывается, что доминирующий механизм релаксации при слабых и сильных полях может быть разным. Также было показано, что при сильном легировании спин-спиновое взаимодействие между электронами становится достаточно сильным чтобы установилась их спиновая температура, и что это приводит к появлению двух сильно различающихся времён релаксации в продольном магнитном поле, характеризующих 1)установление спиновой температуры и 2)её релаксацию к температуре решётки.

Такое глубокое понимание весьма не тривиальной динамики неравновесной спиновой системы очень важно как для физики, так и для ее технических приложений.

Уже давно было установлено, что неравновесные спин-поляризованные электроны, взаимодействуя с ядрами кристаллической решетки, могут передавать им свою

поляризацию, создавая ядерную намагниченность, иногда гигантскую (поле Оверхаузера). Эта ядерная намагниченность может, в свою очередь, иметь значительное обратное влияние на электронную спиновую систему.

В работах К. В. Кавокина было впервые экспериментально продемонстрировано совершенно не тривиальное явление: фарадеевское вращение плоскости поляризации света полем Оверхаузера в полупроводниковом микрорезонаторе, подробно описанное в главе 4. Это довольно неожиданное и яркое явление позволило автору предложить новые методы невозмущающего контроля намагниченности ядерной спиновой системы по нерезонансному Фарадеевскому вращению и спектрам спинового шума резидентных электронов. Индуцированное таким образом вращение плоскости поляризации света происходит в области прозрачности полупроводника, и это обстоятельство позволяет осуществлять невозмущающий контроль состояния ядерной спиновой системы.

Глава 5 описывает проведенные автором тонкие оптические эксперименты по проверке предсказаний теории спиновой температуры применительно к системе ядерных спинов в полупроводниковой гетероструктуре. Обнаружено и интерпретировано совершенно неожиданное значительное увеличение локального ядерного поля спиновой системы активного слоя по сравнению с его значением в объёмном полупроводнике. Автор связывает (на мой взгляд, совершенно разумно) наблюдаемое усиление с квадрупольным расщеплением ядерных спиновых уровней в результате деформации слоя GaAs в гетероструктуре.

В этой главе также экспериментально показано, что смешивание Зеемановского и спин-спиновых энергетических резервуаров ядерной спиновой системы слоя арсенида галлия в микрорезонаторе происходит во внешних магнитных полях, значительно превышающих локальное поле. Это позволяет использовать такие структуры для исследования термодинамики и спин-решёточной релаксации ядерной спиновой системы невозмущающими оптическими методами.

Заключительная глава 6 диссертации посвящена детальному исследованию спин-решёточной релаксации ядерной спиновой системы в слабых магнитных полях. Механизмы этой релаксации включают обусловленную сверхтонким взаимодействием релаксацию спинов ядер, контактирующих с локализованными на донорах электронами, спиновую диффузию к донорным центрам, и квадрупольную релаксацию, а физика

существенно зависит от того, по какую сторону от перехода металл-диэлектрик находится электронная система.

Это чрезвычайно сложная система с множеством вариантов поведения в зависимости от температуры, концентрации примесей, и величины магнитного поля. Автору удалось полностью разобраться в этой сложной ситуации и найти общие закономерности. Полученные им результаты несомненно будут востребованы всеми, кто будет в дальнейшем работать в области спиновой физики полупроводников и/или ее практических применениях.

В Заключении диссертации полученные результаты сведены в общую картину физических явлений, которые могут разыгрываться в электронно-ядерной спиновой системе полупроводника. Это большая заслуга автора, поскольку такой общей картины ранее не существовало, были известны только ее отдельные и разрозненные фрагменты.

Диссертация очень хорошо и ясно написана. Поскольку круг исследователей в области спиновой физики достаточно широк, было бы хорошо чтобы автор написал книгу по материалам этой работы.

Диссертация Кавокина Кирилла Витальевича на тему: «Релаксация углового момента и энергии в спиновых системах легированных полупроводников» полностью 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 безусловно заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.10 — Физика

Официальный оппонент

Почетный профессор Лаборатории Шарля Кулона Университета Монпелье (Франция),
Почетный член Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе, С. Петербург

Доктор физ.-мат. наук, профессор

Дьяконов Михаил Игоревич



30 мая 2020 г