

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Грайлих Алекса на диссертацию Литвяк Валентины Михайловны на тему: «Эффекты, наблюдаемые в полупроводниках при глубоком охлаждении спинов ядер», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния»

Тема данной работы относится к области квантовой обработки информации на основе спинов носителей заряда (электрон или дырка) в полупроводниковой среде. Большое число работ в этой области в настоящее время сосредоточено на применении спиновой степени свободы в качестве квантового бита. Спин заряда связан в свою очередь с ядерными спинами кристаллической решетки сверхтонким взаимодействием, что позволяет разработать схемы, в которых угловой момент фотона передается ядерным спинам, используя спин заряда как промежуточное состояние. Преимущество этого подхода заключается в том, что когерентность спина заряда, взаимодействующего с фотонами, ограничена несколькими микросекундами при низких температурах, в то время как когерентность ядерных спинов может достигать миллисекунд. Однако, идея передачи квантового состояния осложняется флуктуациями ядерных спинов. Одним из способов улучшения свойств когерентности является поляризация ядер. Для существенного эффекта здесь необходима степень поляризации близкая к 100%, что может являться значительным препятствием из-за естественных неоднородностей систем. Отдельным фундаментальным вопросом в данном направлении является возможность охлаждения ядерной спиновой системы и создания магнитной упорядоченности и ядерного магнитного полярона. Таким образом, тематика данной диссертации, посвященная исследованию глубокого охлаждения ядерных спиновых систем в полупроводниках, представляется актуальной.

Выбор в качестве объектов исследования хорошо изученных систем на основе кристаллов GaAs позволяет сосредоточиться на развитии новых методик исследования и сравнительном анализе полученных результатов с известными данными. В рассмотренной диссертации предложен ряд новых подходов, которые позволили изучить и охарактеризовать влияние квадрупольных эффектов на глубину охлаждения ядерной спиновой системы. Среди разработанных автором оригинальных подходов в качестве наиболее важных следует отметить:

1. измерение спектров поглощения охлажденной ядерной спиновой системы в четырех взаимных ориентациях переменного и статического магнитных полей и последующий теоретический анализ позволяющий идентифицировать тип и величину квадрупольного взаимодействия в образце;
2. глубокое охлаждение изотопа ^{75}As в системе квантовой ямы GaAs/AlGaAl методом адиабатического размагничивания во вращающейся системе координат и изучение квадрупольного вклада в локальное поле.

Эти методы в сочетании с теоретическим анализом позволили получить принципиально новую количественную информацию об особенностях квадрупольных эффектов и их влияния на возможность охлаждения ядерной системы. В частности, автором было рассмотрено влияние различных источников квадрупольного взаимодействия и параметров ядерной спиновой системы. Это позволило предположить, что как механическая деформация, так и встроенное электрическое поле вносят вклад в квадрупольное расщепление различных изотопов. В исследуемом образце наличие электрического поля не было подтверждено, что привело к необходимости пересмотреть литературное значение элемента градиентно-электрического тензора S_{44} для ^{75}As . В случае охлаждения спиновой системы во вращающейся системе координат были достигнуты рекордно низкие, для полупроводников, спиновые температуры для изотопа ^{75}As , 0,54 мК. Было проанализировано, как локальное магнитное поле, характеризующее теплоемкость ядерной

спиновой системы, зависит от ориентации внешнего магнитного поля относительно осей кристалла и структуры. Это является важным шагом к реализации ядерного магнитного упорядочения, которое, как ожидается должно появиться при ядерных спиновых температурах ниже 0,1 мкК. Разработанные методики и полученные результаты привели к более глубокому пониманию процессов формирования квадрупольных взаимодействий, влияния стресса и зарядовых состояний, и указали на дальнейшее направление исследований для достижения необходимых условий для формирования магнитного упорядочения. Это подчеркивает научную новизну и значимость результатов работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, насчитывающего 59 наименований, списка из 49 рисунков и 6 таблиц. Во введении автор обосновывает актуальность темы исследования, формулирует цели и задачи работы, приводит положения, выносимые на защиту, определяет научную новизну и практическую значимость, даёт информацию о степени достоверности и об апробации результатов работы, о личном вкладе и основных публикациях по материалам диссертации.

Первая глава посвящена литературному обзору по теме диссертации, описанию основных принципов спиновых электронных и ядерных взаимодействий и рассмотрению концепций спиновой температуры, методов охлаждения спинов ядер и формирования ядерного спинового полярона.

Во второй главе представлены изучаемые структуры, описаны применяемые и разработанные экспериментальные методы и способы обработки полученных данных.

Главы с третьей по пятую являются оригинальными. В третьей главе приведены исследования локальных полей в объёмных образцах *n*-GaAs. Полученные данные используются далее в четвёртой главе для изучения квадрупольных компонент методом отогрева ядерных спинов радиочастотными полями. Результаты анализа данных позволили определить вид и величины квадрупольного вклада.

Особо стоит отметить результаты пятой главы, в которой методом адиабатического охлаждения во вращающейся системе координат удалось достичь рекордно низких спиновых температур с возможностью селекции по ядерным изотопам.

Изложение материалов глав завершаются выводами, которые представляются обоснованными и подкреплёнными теоретическим анализом экспериментальных данных и сравнением с литературными данными.

Серьёзных недостатков в диссертационной работе не обнаружено, но некоторые технические замечания и возникшие вопросы стоит отметить:

1. Важным дополнением в обсуждении охлаждения спинов ядер и планов на будущее было бы упоминание структур на основе CdTe или ZnSe, в которых определённые изотопы имеют ядерные спины $\frac{1}{2}$ и соответственно лишены квадрупольных эффектов. При этом, естественная разбавленная спиновая система, где только часть изотопов имеет спин не равный нулю ведет к тому, что локальные поля понижены на порядок величины по сравнению с GaAs (CdTe $B_L = 0.12$ G, ZnSe $B_L = 0.06$ G).
2. В главе 2.1.3 по детектированию эффекта Ханле обсуждается анализ времён релаксации T_S , при этом не указано значение *g*-фактора в данных структурах, а указан только g_0 . g_0 определён как *g*-фактор свободного электрона после уравнения (1.7), то есть $g_0 = 2$.
3. В главе 5.1 описываются рекордно низкие спиновые температуры, при этом температура ограничена величиной ядерной поляризации As в начальном поле ($B_{ext}=7.5$ kG). Здесь разделяются два случая, с деполяризацией спинов Ga и без. В случае, когда поляризуется только As, достигаются большие значения охлаждения. Таким образом получается, что рекордные значения температур ограничены начальным внешним полем. Раз речь идет о рекордных значениях, почему остановились на 7.5 kG? Это же не предел.

4. Рисунки 9, 10, 13, 14 и 16 не являются оригинальными и требуют указания ссылок на первоисточники в подписях.

Приведенные замечания носят частный характер и не умаляют высокую оценку диссертационной работы. Результаты работы являются оригинальными, достоверными и имеют важное научное и прикладное значение для спиновой физики полупроводников. Предложено дальнейшее развитие методики и исследований. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались на российских и международных конференциях и опубликованы в авторитетных реферируемых научных журналах: Physical Review B, Communication Physics и другие.

В итоге можно заключить, что диссертационная работа Литвяк Валентины Михайловны на тему «Эффекты, наблюдаемые в полупроводниках при глубоком охлаждении спинов ядер» соответствует основным требованиям установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения учёных степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Литвяк Валентина Михайловна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния». Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета
Доктор физико-математических наук
Приват-доцент Технического Университета Дортмунда, Германия



Алекс Грайлих

13 Мая 2022г.