

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Агекяна Вадима Фадеевича 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.

В диссертации В. М. Литвяк выполнено глубокое охлаждение ядерной спиновой системы в полупроводниковых кристаллах группы III-V, изучены зависимости скоростей отогрева ядерных спинов от частоты переменного магнитного поля, проведены эксперименты по селективному охлаждению спинов ядер одного из элементов, образующих кристалл. Анализ полученных данных направлен на определение вкладов диполь-дипольного и квадрупольного взаимодействий в температуру ядерной спиновой системы. Объектами исследования являются объемный кристалл GaAs n-типа и нелегированные квантовые ямы GaAs/AlGaAs.

Русскоязычная версия диссертации содержит 134 страницы текста, в том числе 49 рисунков, 6 таблиц и 59 наименований цитируемой литературы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы ее цели, научная новизна, научная и практическая значимость, приведены положения, вынесенные на защиту.

В первой главе диссертации излагаются сведения, необходимые для понимания проведенных экспериментов и полученных в них результатов. Обсуждаются механизмы релаксации электронного спина в объемном арсениде галлия, легированном донорами, диполь-дипольное взаимодействие ядерных спинов, сверхтонкое взаимодействие, взаимное влияние спиновых систем электронов и ядер друг на друга, взаимодействие квадрупольных моментов ядер с градиентом внутреннего электрического поля. Обсуждаются спин-спиновая и спин-решеточная релаксации, методы поляризации ядерных спинов в кристаллах. Рассмотрены случаи с различными знаками температур зеemanовского и спин-спинового резервуаров. Автор диссертации обсуждает условия, необходимые для реализации ядерного магнитного полярона. Рассмотрен важный для проведенных в диссертации исследований вопрос о вкладе квадрупольного эффекта в локальные магнитные поля ядер. В конце первой главы изложена теория отогрева ядерной спиновой системы в переменном магнитном поле, обсуждается охлаждение ядерных спинов в системе координат, которая вращается с частотой приложенного к кристаллу переменного магнитного поля. Этот прием позволяет в процессе адиабатического размагничивания селективно охлаждать ядерные спины отдельных изотопов, входящих в состав кристалла.

Во второй главе приведены сведения об объектах исследования, это объемные кристаллы GaAs с различными концентрациями доноров и нелегированная структура с квантовыми ямами GaAs/AlGaAs. Описаны эксперименты по исследованию эффекта Ханле в условиях, когда при оптической накачке в продольном поле достигалась высокая

степень выстраивания ядерных спинов, после чего ядерные спины разворачивались слабым перпендикулярно направленным полем. Такой прием позволяет измерить ядерное магнитное поле и проследить динамику ослабления этого поля в реальном времени. Описана техника регистрации спектров отогрева (поглощения) ядерных спинов для четырех случаев взаимных направлений луча оптической накачки и статического и переменного магнитных полей. Показана процедура состоящего из четырех стадий эксперимента по достижению глубокого охлаждения ядерной спиновой системы при адиабатическом размагничивании. Такой эксперимент позволяет понизить спиновую температуру ядер на несколько порядков. В конце главы приведен протокол адиабатического охлаждения спиновой системы ядер во вращающейся системе координат, в результате чего можно селективно охладить спины изотопа мышьяка и измерить локальное поле ядер.

В третьей главе проведено измерение локального поля ядер в объемном n-GaAs. От величины этого поля зависит минимальное достижимое значение спиновой температуры ядерной системы. Ядерные спины, охлажденные до $5 \cdot 10^{-4}$ К, разворачивались переменным полем, в котором ядерное поле релаксировало во времени по экспоненциальному закону. Серия опытов по измерению зависимости степени поляризации люминесценции от времени позволила установить величину локального ядерного поля, используя ее как подгоночный параметр.

В четвертой главе в спектрах отогрева (поглощения) ядерных спинов в объемных кристаллах n-GaAs в переменном радиочастотном поле обнаружены два пика, положения которых на шкале частот переменного поля отличаются для трех исследованных образцов, а также для различных точек на поверхности одного и того же образца. Эти спектры интерпретируются как проявление квадрупольных взаимодействий, возникших вследствие деформации кристаллической решетки. Это эффект исследован в условиях, когда на образец накладывается внешнее поле перпендикулярное или параллельное переменному полю. Такие опыты позволили наблюдать уширение зеемановских компонент вследствие появления спутников, обусловленных квадрупольным взаимодействием ядер. На основе экспериментов с применением различных конфигураций указанных полей построены схемы расщепления ядерных уровней с учетом квадрупольного и зеемановского вкладов, на схемах показаны экспериментально наблюдавшиеся переходы. Анализ экспериментальных данных позволил сделать выводы о величине компоненты градиентно-эластического тензора.

В пятой главе рассмотрено охлаждение ядерных спинов ^{75}As в квантовых ямах GaAs/AlGaAs. Эксперименты проводились в наклонном магнитном поле, фаза поддерживающего импульса регулировалась относительно фазы $\pi/2$ -импульса, что позволяло получать как положительную, так и отрицательную спиновые температуры ядер. В этих экспериментах были определены поле ядер ^{75}As и их спиновая температура. Для согласования теории и эксперимента величина локального магнитного поля ядер использовалась как подгоночный параметр. Во втором эксперименте, описанном в этой главе, производилась ориентация всех ядерных спинов, при этом достигнутые спиновые температуры оказались в несколько раз выше, чем в первом случае. В заключительной части главы проведен расчет вклада спин-спиновых взаимодействий в локальное поле и

описан эксперимент по определению квадрупольного вклада в локальное поле, обусловленного деформацией кристаллической решетки, приведены соображения относительно возможных типов деформации.

Следует отметить, что две первые главы составляют две трети от общего объема работы, такое не совсем обычное построение диссертации оказалось существенным для понимания содержания оригинальных разделов работы.

К основным результатам, полученным в диссертации, следует отнести:

- Обнаружение квадрупольного взаимодействия в спиновой ядерной системе объемного арсенида галлия n-типа, установление причины его возникновения и измерение его параметров, что, в частности, дало возможность определить величины компоненты градиентно-эластического тензора;
- достижение рекордных низких температур спиновой системы ядер ^{75}As методом адиабатического размагничивания во вращающейся системе координат;
- определение величин локальных ядерных полей, обнаружение зависимости локального поля ядер от направления внешнего магнитного поля относительно кристаллических осей структуры с квантовыми ямами GaAs.

Замечания и вопросы, возникшие при чтении диссертации:

1. Замечания к оформлению: в диссертации есть опечатки, погрешности в орфографии и стиле изложения, используются некорректные выражения, такие как «развернутый изотоп», «диффузия ядер», на с. 77 сказано, что люминесценция собиралась в пучок и **рассеивалась** спектрометром. Многие рисунки настолько малы, что читаются с трудом.
2. Не указаны происхождение полосы люминесценции n-GaAs, на которой проводились измерения, и элемент, которым легировался арсенид галлия.
3. Образец GaAs/AlGaAs содержит 13 квантовых ям различной толщины, однако в диссертации не указано, какая яма использовалась в эксперименте.
3. Есть ли у автора диссертации объяснение причины того, что интенсивность спектров отогрева n-GaAs резко падает при увеличении поля, приложенного вдоль направления переменного поля (рис. 36 и 40)?
4. При исследовании детектирования ядерной поляризации по эффекту Ханле было установлено, что максимальный скачок поляризации люминесценции происходит при продольном поле, немного превышающем 100 Гаусс. Как это можно объяснить?

Оценивая диссертацию в целом, делаю вывод, что она является научным исследованием высокого уровня, в ней выполнен большой объем сложных и длительных экспериментов, достигнуты рекордно низкие температуры ядерной спиновой системы для кристаллов группы III-V, определены вклады в локальные поля ядер спин-спинового взаимодействия и квадрупольного взаимодействия, индуцированного механическими деформациями кристаллической решетки.

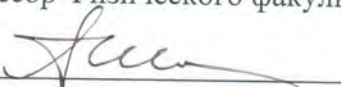
Вынесенные на защиту положения хорошо обоснованы. Результаты исследований, вошедших в диссертацию, опубликованы в журналах, которые индексируются в международных базах данных.

Диссертация Литвяк Валентины Михайловны на тему: «Эффекты, наблюдаемые в полупроводниках при глубоком охлаждении спинов ядер» соответствует требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Литвяк Валентина Михайловна заслуживает присуждения ей ученой 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

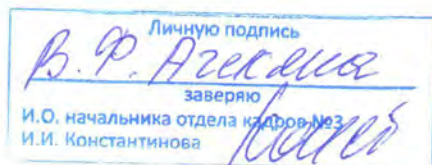
доктор физико-математических наук, профессор,

профессор Физического факультета СПбГУ



Агемян В. Ф.

31 мая 2022 года



31.05.2022