

## ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Семиной М.А. 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.

Диссертационная работа В.М. Литвяк посвящена экспериментальному исследованию ядерной спиновой подсистемы в объемных кристаллах *n*-GaAs и квантовых ямах на его основе. **Целью** работы является изучение термодинамических характеристик и магнитных флуктуаций оптически охлажденной спиновой системы ядер мышьяка и галлия в эпитаксиальных слоях *n*-GaAs и поиск путей достижения минимальных ядерных спиновых температур.

В последние десятилетия исследования спиновой динамики электронов и ядер в конденсированных средах вылились в бурно развивающуюся область современной физики конденсированных сред. Ведутся активные экспериментальные и теоретические работы, нацеленные на достижение сверхдлинных времен спиновой релаксации, что в перспективе позволит создавать устройства хранения информации, использующие неклассические принципы. При низких температурах носители заряда, как правило, локализованы на примесях или несовершенствах структуры, и время жизни электронного спина ограничивается сверхтонким взаимодействием со спиновой ядерной подсистемой. При этом ансамбль ядерных спинов обладает нетривиальными физическими свойствами, связанными с достаточно сильным диполь-дипольным взаимодействием между ними. Во многих случаях ядерная спиновая подсистема может рассматриваться как резервуар, характеризующейся своей – ядерной спиновой – температурой, которая может значительно отличаться от температуры кристаллической решетки и, в частности, принимать отрицательные значения. Понижение ядерных спиновых температур до сверхнизких величин, при которых возможно установление магнитного порядка в системе ядерных спинов, и, тем самым, подавление спиновых флуктуаций, а также выявление факторов, которые увеличивают локальное поле в образцах и тем самым ограничивают минимально возможную ядерную спиновую температуру, представляют значительный интерес. В частности, открытым является вопрос об экспериментальной реализации ядерного спинового полярона в полупроводниковых кристаллах, что является глобальной задачей, далеко выходящей за пределы конкретных задач, поставленных в диссертации. Решению таких экспериментальных задач и посвящена диссертационная работа В.М. Литвяк, что определяет высокую **актуальность темы** диссертационной работы.

В диссертации В.М. Литвяк приведены результаты решения ряда важных экспериментальных задач: была создана экспериментальная остановка для реализации глубокого охлаждения ядерной спиновой системы и реализована методика отогрева ядерных спинов под действием переменного магнитного поля. На основе обработки полученных экспериментальных данных диссертант определила параметры квадрупольных расщеплений ядерных спиновых подуровней и установила соотношение вкладов диполь-дипольных и квадрупольных резервуаров в теплоемкость ядерной

спиновой системы. Это дало возможность оценить потенциал предложенной методики для реализации упорядоченного состояния ядерных спинов – ядерного спинового полярона.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения.

В первой главе дан обзор литературы по теме диссертации. Описаны взаимодействия, в которых участвуют ядерные спины (особое внимание уделено квадрупольному расщеплению ядерных спиновых подуровней), их механизмы релаксации и способы поляризации, а также основы оптической ориентации электронных и ядерных спинов, представлена концепция ядерной спиновой температуры и модель ядерного спинового полярона. Приведено общее описание физических принципов, на которых основаны представленные в оригинальной части работы эксперименты.

Во второй главе, которая носит скорее методический характер, дано подробное описание исследованных образцов, экспериментальных установок, на которых были проведены оригинальные эксперименты по спектроскопии отогрева ядерных спинов и по адиабатическому охлаждению ядерных спинов во вращающейся системе координат. Уделено внимание описанию методики экспериментов и способам обработки полученных данных.

В третьей, четвертой и пятой главах представлены **оригинальные и новые научные** результаты, на которых основаны положения, выносимые на защиту. Так, в третьей главе представлены результаты измерения локального магнитного поля в объемном образце *n*-GaAs. Здесь предложен новый способ определения локального поля при помощи экспериментальной установки по спектроскопии отогрева ядерных спинов с оригинальным модифицированным протоколом измерения.

Четвертая глава посвящена измерению и анализу спектров поглощения ядерных спинов объемных образцов *n*-GaAs при использовании методики спектроскопии отогрева. Показано, что наблюдаемые пики поглощения в нулевом магнитном поле и их эволюция во внешних магнитных полях могут быть приписаны проявлениям квадрупольных взаимодействий в изучаемых образцах. Из анализа экспериментальных данных получены оценки для локальных величин компонентов тензора неконтролируемых деформаций в исследованных образцах.

Пятая глава посвящена экспериментам, нацеленным на достижение минимально возможной ядерной спиновой температуры оптическими методами на примере нелегированной квантовой ямы GaAs/Al<sub>0.35</sub>Ga<sub>0.65</sub>As. В ходе экспериментов удалось достичь рекордно низких температур, составляющих +0.54 и -0.57 мК для взаимодействующих ядерных резервуаров изотопа <sup>75</sup>As. Еще одним интересным результатом главы является зависимость величины локального поля от направления внешнего магнитного поля по отношению к кристаллическим осям, что является проявлением квадрупольных взаимодействий, в которых участвуют ядерные спины.

**Достоверность результатов**, полученных в диссертации В.М. Литвяк, несомненна. Это обусловлено внутренней непротиворечивостью результатов, последовательным подходом к проведению экспериментов и анализу полученных данных. Основные результаты

диссертационной работы опубликованы в рецензируемых научных журналах, а также представлены на научных семинарах и на международных конференциях.

**Научная и практическая значимость** работы состоит в разработке методики экспериментального исследования спектров поглощения охлажденной ядерной спиновой системы в четырех возможных конфигурациях и их теоретическая обработка. Это позволяет определить вид и величину квадрупольных взаимодействий, испытываемых ядерными спинами, которые увеличивают локальное поле и, тем самым, ограничивают снизу по абсолютной величине достижимый предел спиновых температур. При определении источника квадрупольных взаимодействий появляется возможность разработки структур, в которых он будет минимизирован, открывая перспективы получения более низких температур ядерной спиновой системы вплоть до значений, необходимых для перехода ядерных спинов в магнитоупорядоченные состояния. Следует отметить, что, в отличие от классических работ в области оптической ориентации электронных и ядерных спинов, в данной диссертации исследуются структуры сверхвысокого качества с очень малыми квадрупольными расщеплениями, что открывает возможность экспериментального исследования весьма тонких эффектов. Это одна из сильных сторон диссертации.

В целом материал диссертации изложен достаточно четко, однако при ее чтении возникают следующие замечания:

- Диссертационная работа носит скорее экспериментальный характер, и личный вклад автора заключается в проведении эксперимента и обработке экспериментальных данных. При этом, в тексте диссертации приведено достаточно много теоретических формул, использованных для обработки данных. Однако, в тексте диссертации отсутствует указание на область применимости использованной теории, неясно, применима ли теория для описания конкретных экспериментов. В частности, неясно, в какой мере концепция ядерной спиновой температуры может быть применена для описания системы с существенными квадрупольными расщеплениями ядерных подуровней. В качестве замечания по оформлению хочется отметить, что для большей аккуратности изложения при использовании теоретических формул, не являющихся общеизвестными или оригинальными, необходимо указывать ссылки на литературу.
- В диссертации описываются результаты, полученные на трех разных образцах объемного GaAs (S1, S2 и S3), причем разные эксперименты (насколько можно судить) выполнялись на разных образцах. Так, в главе 3 локальное магнитное поле в нулевом внешнем поле измеряется в образце S1, а в главе 4 подробно исследуется образец S2, причем показано, что в разных его точках могут быть получены разные данные. Чем вызван выбор различных образцов для разных экспериментов? Не теряется ли при таком выборе общность результатов? Какие выводы можно сделать из зависимости спектров поглощения, приведенных на рис. 35, от точки на образце кроме пространственной неоднородности величины квадрупольных эффектов? Будет ли зависеть локальное поле от точки измерения на образце S1?

- В диссертационной работе, по сути, измеряется ядерный спин-спиновый коррелятор. В последние годы метод спектроскопии спиновых шумов, в котором корреляционные функции спинов измеряются по фарадеевскому или керровскому вращению, был апробирован и для ядерных спинов [см., например, Interplay of Electron and Nuclear Spin Noise in n-Type GaAs, Phys. Rev. Lett. 115, 176601 (2015)]. Возможно ли применить метод спектроскопии спиновых шумов для определения спиновых корреляторов ядер в условиях глубокого охлаждения?


Указанные замечания не снижают общей высокой оценки представленной работы, скорее они являются предложениями для дальнейшего развития данного многообещающего направления.

Таким образом, диссертация 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 ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Литвяк Валентина Михайловна заслуживает присуждения 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,

Старший научный сотрудник  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,  
доктор физико-математических наук  
(специальность 01.04.02 - теоретическая физика),

Семина Марина Александровна  
194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.  
Тел.: + 7 911 913 04 36  
E-mail: semina@mail.ioffe.ru

  
30.05.2022

Согласна на передачу персональных данных



Семина Марина Александровна

Подпись М.А. Семиной удостоверяю:

Ученый секретарь ФТИ им. А.Ф. Иоффе  
кандидат физико-математических наук  
Патров М.И.



