

## · ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Шеляпиной Марины Германовны 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.

Сверхтонкое взаимодействие является одним из основных источников спиновой релаксации и декогеренции носителей заряда в полупроводниках, что затрудняет их применение в спинтронике. Для гетероструктур на основе GaAs это особенно актуально, поскольку изотопы  $^{69}\text{Ga}$ ,  $^{71}\text{Ga}$ ,  $^{75}\text{As}$  имеют ненулевой спин. Влияние ядерных спиновых флуктуаций, ведущих к потере когерентности электронных спинов, можно подавить охлаждением ядерной спиновой системы до температур, при которых ядерные спины будут упорядочены. При этом речь идет о температурах порядка  $10^{-7}$  К, которые можно получить методом оптического охлаждения с последующим адиабатическим размагничиванием в локальное поле ядерных спинов. В случае квадрупольных ядер фактором, ограничивающим снизу величину спиновой температуры при адиабатическом охлаждении, помимо диполь-дипольных взаимодействий являются и квадрупольные взаимодействия. С этой точки зрения исследование квадрупольных взаимодействий является важным для решения актуальной задачи спинтроники - получения минимальных ядерных спиновых температур в полупроводниках для образования ядерного спинового полярона.

Целью работы В.М. Литвяк являлось изучение термодинамических характеристик и магнитных флуктуаций оптически охлажденной спиновой системы ядер мышьяка и галлия в эпитаксиальных слоях n-GaAs, а также поиск путей достижения минимальных ядерных спиновых температур.

Диссертация В.М. Литвяк состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы (59 наименований), списков рисунков и таблиц. Русскоязычный текст работы изложен на 134 страницах, содержит 49 рисунков и 6 таблиц. Объем и содержание диссертации указывает, что автор системно проработал заявленную тематику, обобщил и представил доказательный материал. Во Введении обосновывается выбор темы диссертационного исследования, определяется цель и задачи работы, сформулированы основные результаты и положения, выносимые на защиту, авторское видение степени новизны, научной и практической значимости результатов, отмечен личный вклад соискателя, приводятся сведения об апробации работы на научных конференциях различного уровня, а также кратко изложена структура диссертации.

В Первой главе дается развернутое обоснование задач исследования, введены основные понятия, основные взаимодействия ядерных спинов, важные для решения поставленных задач, механизмы релаксации спинов, а также методы поляризации ядерных спинов. Глава демонстрирует глубокое понимание автором современного видения спиновых взаимодействий. Вторая глава содержит описание исследуемых образцов и экспериментальных методик, схемы экспериментальных установок и протоколы экспериментов. Изложение материала позволяет оценить адекватность выбранных методов для решения поставленных задач.

Последующие главы содержат оригинальные экспериментальные результаты, полученные автором. В Третьей главе представлены результаты по измерению локального поля в объёмном n-GaAs. Заметное расхождение с литературными данными автор связывает с наличием квадрупольного взаимодействия из-за механических напряжений в структуре. Изучению квадрупольных взаимодействий и их влияния на спектры поглощения ядерных спинов, посвящена Четвертая глава диссертации. В ней представлены результаты анализа спектров поглощения для различных взаимных ориентаций статического и переменного магнитных полей, выполненного в рамках разработанной автором теоретической модели, определены величины квадрупольного взаимодействия.

В Пятой главе представлены экспериментальные результаты по селективному охлаждению ядерных спинов  $^{75}\text{As}$  в квантовой яме GaAs с помощью адиабатического размагничивания во вращающейся системе координат. Применяемая методика позволила охладить систему до температур порядка 1 мК. В работе показана зависимость величины локального поля от ориентации вектора внешнего магнитного поля по отношению к кристаллическим осям, вызванная квадрупольным взаимодействием.

В тексте Заключения сформулированы основные результаты работы. Среди наиболее важных достижений диссертации следует отметить получение рекордно низких спиновых температур для взаимодействующих ядерных диполь-дипольных и квадрупольных резервуаров энергий (0.54 и (-0.57) мК).

К замечаниям по работе можно отнести следующее:

1. Для нахождения уровней энергии квадрупольного взаимодействия в присутствии Зеемановского обычно используют теорию возмущений. При этом важно понимать, какое взаимодействие преобладает, а какое является возмущением. На рис. 5 приведено схематическое изображение сдвига ядерных спиновых уровней энергии во внешнем магнитном поле под действием возмущающего квадрупольного взаимодействия. Однако далее, рис. 42, приводится схема расщепления ядерных уровней для квадрупольного ядра в зависимости от внешнего магнитного поля (возмущения). На стр. 103 сказано, что собственные функции гамильтониана (4.14) ищутся численно, возможно это связано с тем, что вклады Зеемановского и квадрупольного взаимодействия одного порядка. Но в работе это никак не прокомментировано.

2. В выражении (4.15) для скорости отогрева ядерной спиновой системы фигурируют вероятности переходов между уровнями энергии. Они же определяют и интегральную интенсивность отдельных спектральных линий. Далее на стр. 103 сказано, что «для подгонки расчетных спектров поглощения к экспериментальным были использованы величины энергетических параметров  $E_{QZ}$ ,  $E_{QR}$  и  $E_{QI}$ ». Из текста диссертации не ясно, учитывалась ли вероятность переходов при аппроксимации экспериментальных спектров.

3. В работе есть некоторые неточности в использовании устоявшихся определений. Например, автор называет константой квадрупольных взаимодействий квадрупольный момент ядра (стр. 24), тогда как константой квадрупольного взаимодействия общепринято называть величину  $e^2qQ$ , т.е. произведение квадрупольного момента ядра (характеристика конкретного изотопа) и главной компоненты градиента электрического поля в месте расположения ядра (локальная характеристика конкретного соединения).

