

В диссертационный совет
ФТИ 34.01.02
при ФТИ им. А.Ф. Иоффе
194021, Санкт-Петербург,
Политехническая ул., 26

Отзыв
официального оппонента

о диссертационной работе Смирнова Дмитрия Сергеевича "Спиновая динамика и квантовые корреляции электронов и ядер в полупроводниках", представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 - физика полупроводников

Актуальность. Исследования спиновых и ядерных степеней свободы в полупроводниковых наноструктурах являются одним из наиболее динамично развивающихся направлений современной физики конденсированного состояния. Интерес к ним обусловлен как фундаментальными проблемами когерентной спиновой динамики, сверхтонкого взаимодействия и квантовых корреляций, так и перспективами создания элементов квантовой информатики — кубитов на спинах электронов, ядер и фотонов.

Диссертация Д.С. Смирнова посвящена теоретическому изучению широкого круга явлений: от оптической ориентации и спиновой инерции локализованных электронов до динамической поляризации ядер, спинового шума, квантового обратного действия при измерениях и генерации запутанных состояний. Работа выполнялась в тесном контакте с экспериментом, многие предсказания автора впоследствии были подтверждены.

Актуальность темы не вызывает сомнений, а сама работа является своевременным и необходимым вкладом в физику полупроводников и наноструктур.

Новизна и достоверность результатов. В диссертации получен ряд новых научных результатов, среди которых наиболее значимыми являются следующие.

В **первой главе** развита теория оптической ориентации локализованных электронов в магнитном поле с учётом анизотропии сверхтонкого взаимодействия и конечного времени корреляции ядерного поля. Предсказан эффект резонансного спинового усиления в продольном магнитном поле (геометрия Фарадея), возникающий за счёт ядерных спиновых флуктуаций. Построена теория спиновой инерции и термодинамики ядерной спиновой системы при сильной локализации

электронов. Показано, что длинное время корреляции электронов приводит к многократному уширению магнитопольевых зависимостей ядерной поляризации.

Вторая глава посвящена динамической спиновой (долинной) поляризации электронов в квантовых точках без поляризованного возбуждения. Предложен механизм возникновения спиновой поляризации в малых магнитных полях за счёт конкуренции обменного и сверхтонкого взаимодействий. Разработан дизайн спинового диода с электрической накачкой, излучающего циркулярно поляризованный свет. Предсказана возможность генерации одиночных циркулярно поляризованных фотонов в импульсном режиме.

Третья глава содержит теорию оптически детектируемых спиновых флуктуаций в неравновесных условиях. Предложен метод спектроскопии спинового шума с временным разрешением для изучения медленной ядерной динамики. Показано, что в спектрах фарадеевского вращения присутствует вклад не только спинового, но и зарядового шума, что подтверждено экспериментами на одиночных квантовых точках. Развита теория косвенной спектроскопии спинового шума, где сигнал определяется корреляторами высоких порядков.

Четвёртая глава посвящена квантовому обратному действию при оптическом измерении спинов. В рамках модели микрорезонатора с квантовой точкой показано, что измерение линейно поляризованным светом приводит к подавлению поперечных компонент спина. Описаны квантовые эффекты Зенона (замедление спиновой релаксации) и анти-Зенона (ускорение), которые наблюдались экспериментально. Показана возможность достижения квантового предела эффективности измерений при гомодинировании.

В **пятой главе** исследована генерация многочастично запутанных спиновых состояний. В рамках центральной спиновой модели с однородным сверхтонким взаимодействием получено точное решение для ядерной спиновой динамики в пределе большого числа ядер. Предсказано формирование сжатых и GHz-подобных запутанных состояний ядер. Построена теория генерации тёмных запутанных состояний в условиях спиновой инерции, что подтверждено экспериментами на перовскитах. Разработана теория генерации кластерных фотонных состояний в анизотропных микрорезонаторах и описан эффект скрытой анизотропии спин-фотонного запутывания.

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных аналитических и численных методов, а также хорошим согласием с экспериментальными данными, полученными как российскими, так и зарубежными группами (ФТИ им. Иоффе, СПбГУ, университеты Дортмунда, Монпелье и др.).

Научная и практическая значимость. Работа имеет высокую научную и практическую значимость. Разработанные в диссертации теоретические подходы (учёт анизотропии сверхтонкого взаимодействия, немарковской спиновой динамики,

квантового обратного действия) являются фундаментальными и могут быть применены к широкому классу полупроводниковых систем — от объёмных полупроводников до одиночных квантовых точек и муаровых гетероструктур.

Практическая значимость связана с предложенными протоколами генерации одиночных циркулярно поляризованных фотонов, управлением спиновой релаксацией через эффекты Зенона, а также методами спектроскопии спинового шума для диагностики спиновых и зарядовых процессов в наноструктурах. Результаты могут быть использованы при создании элементов квантовой памяти, источников запутанных фотонов и спиновых кубитов.

Замечания и вопросы.

1. В параграфе 1.1.3 подробно рассматривается анизотропия сверхтонкого взаимодействия, задаваемая параметром λ . Однако в разделах 1.3.3 и 1.4 при анализе спиновой инерции и динамической поляризации ядер используется в основном изотропное приближение. Какие качественно новые эффекты в спиновой инерции можно было бы ожидать при сильной анизотропии ($\lambda \ll 1$ или $\lambda \gg 1$) и конечном времени корреляции τ_c ?

2. На рис. 1.14 представлены численные результаты для $N=6$ ядерных спинов. Согласно формулам (1.106)–(1.107), уширение магнитополовой зависимости ядерной поляризации определяется параметром τ_c/T_2^* . Для приведенных в подписи значений $\tau_c A/\hbar=10$ и $N=6$ получаем $\tau_c/T_2^* \approx 25$, что предсказывает уширение примерно в 25 раз по сравнению со случаем короткого τ_c . Однако на рисунке уширение составляет не более чем 2–3 раза. Чем вызвано это расхождение? Малым значением $N=6$? Или может быть в модели заложены иные значения T_2^* или есть другой физический механизм, ограничивающий уширение?

3. В первой главе диссертации термин «локализованные электроны» используется для описания широкого круга систем: доноров в объёмных полупроводниках, одиночных квантовых точек, их ансамблей, перовскитов и муаровых структур. Однако ключевые параметры теории — такие как время корреляции τ_c , число ядер в области локализации N , анизотропия сверхтонкого взаимодействия λ — существенно различаются для этих объектов. Хотелось бы уточнить:

- Для каких именно экспериментальных систем, рассмотренных в главе 1 (или известных из литературы), теория даёт количественное или полуколичественное описание?
- Каковы типичные диапазоны параметров N и τ_c для этих систем?
- Существуют ли системы, где локализация настолько слаба или, наоборот, настолько сильна, что предложенный подход перестаёт работать, и где проходит граница его применимости?

Указанные вопросы и замечания не являются принципиальными и не влияют на общую высокую оценку работы.

Оценивая диссертацию в целом, следует отметить высокий научно-методический уровень работы, большой объём проведённых исследований и их целостность. Диссертация является законченным научным трудом, в котором решена крупная научная проблема — установление закономерностей спиновой динамики и квантовых корреляций электронов и ядер в полупроводниковых наноструктурах под действием оптического и магнитного полей с учётом сверхтонкого взаимодействия. Совокупность опубликованных работ автора (21 статья в ведущих рецензируемых журналах, включая Phys. Rev. Lett., Nature Communications, Phys. Rev. B, УФН) представляет собой крупное достижение в области физики полупроводников.

Диссертация имеет чёткую структуру, основные результаты чётко сформулированы в выводах по главам и в заключении. Автореферат и опубликованные статьи правильно и достаточно полно отражают содержание диссертации.

Таким образом, диссертация Смирнова Дмитрия Сергеевича полностью удовлетворяет требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», предъявляемым диссертационными советами ФТИ им. А.Ф. Иоффе к докторским диссертациям, а её автор, несомненно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.11 – физика полупроводников.

Официальный оппонент:
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН,
главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией теории низкоразмерных спиновых систем
Института физики металлов УрО РАН им. М.Н. Михеева
Стрельцов Сергей Владимирович

Контактные данные:
тел.: +7 (343) 378-36-65, e-mail: streltsov@imp.uran.ru
Адрес места работы:
620108, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

Подпись сотрудника С.В. Стрельцова заверяю:

«19» мая 2026 года

Учёной секретарь ИФМ УрО РАН
И.А. Крамова