

ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Белых Василия Валерьевича
«Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой
динамики в твердотельных системах»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния

Рецензируемая диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому исследованию когерентной спиновой динамики элементарных электронных возбуждений в полупроводниковых структурах. Несмотря на то, что физика когерентных спиновых явлений уже много лет является предметом интенсивных исследований теоретиков и экспериментаторов во всем мире, интерес к ней продолжает поддерживаться на чрезвычайно высоком уровне. Растет число публикаций по этой тематике, организуются конференции и издаются новые журналы, специально посвященные спиновым процессам в полупроводниковых наноструктурах. Причины этого совершенно очевидны: с одной стороны, изучение динамики спиновой поляризации свободно движущихся и локализованных электронных возбуждений позволило открыть множество качественно новых явлений, представляющих общенаучный интерес, а с другой стороны, оно генерирует идеи для создания принципиально новых типов полупроводниковых приборов и стимулирует развитие новых технологий. Из сказанного ясно, что тема диссертации, избранная соискателем, безусловно является **актуальной**, а поскольку спиновые свойства электронных возбуждений в полупроводниковых структурах изучены еще отнюдь не исчерпывающе, то **новизна** полученных в работе результатов также не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из **введения, шести глав, заключения и списка литературы**. Во **введении** сформулирована и обоснована цель исследований.

В **первой главе**, посвященной методическим вопросам проводимых исследований, дано подробное описание методик, использовавшихся для изучения динамики состояния спиновой поляризации носителей заряда в полупроводниках, показываются их достоинства и недостатки. Обсуждаются условия проведения экспериментов и особенности методов обработки полученных результатов.

В оригинальной части диссертации, главы **со второй по шестую**, рассматриваются четыре основные задачи.

Первая из них — развитие методов исследования когерентной спиновой динамики электронов в полупроводниковых материалах и гетероструктурах. Автором был разработан расширенный метод накачки–зондирования с измерением фарадеевского/керровского вращения для измерения спиновой динамики в практически неограниченном временном диапазоне с пикосекундным временным разрешением. Развитие этого метода не только позволяет проводить недоступные ранее измерения долгоживущей динамики спиновых систем, но и управлять поляризацией спиновой системы, контролируя последовательность импульсов спиновой накачки. Другим развитием метода накачка–зондирования, проведенным в процессе выполнения работы, стало использование в качестве накачки осциллирующего радиочастотного (РЧ) магнитного поля с последующим оптическим зондированием фарадеевского/керровского вращения. Было показано, что применение различных ориентаций и протоколов РЧ поля позволяет измерять времена спиновой релаксации T_1 , T_2 и T_2^* . Развитием метода РЧ возбуждения в ансамблях электронных спинов с разбросом продольных и поперечных времен спиновой релаксации стало: (1) проведение измерений в условиях двойного резонанса, когда частота РЧ возбуждения совпадает с ларморовской частотой прецессии спина в поперечном магнитном поле, позволившее селективно

выделять времена спиновой релаксации T_2 и (2) комбинирование РЧ и оптическое возбуждения спиновой поляризации (в условиях спиновой инерции) в постоянном продольном магнитном поле, позволившее селективно выделять времена спиновой релаксации T_1 .

Вторая задача диссертации заключается в использовании разработанных методов для исследования спиновой динамики электронов с GaAs с различной концентрацией доноров при изменении степени локализации электронов. Здесь, среди многих интересных результатов полученных соискателем хочу отметить: (1) замедление скорости спиновой дефазировки по ансамблю (увеличение времени T_2^*) при повышении температуры за счет т.н. «динамического сужения» при обменном взаимодействии локализованных и делокализованных электронов, обусловленное делокализацией электронов; (2) антикорреляцию времен спиновой релаксации T_1 и T_2^* описываемую, при изменении этих времен на два порядка величины!, выражением $T_1 \times T_2^* \approx \text{const}$. В работе найдено объяснение этому удивительному факту. Соотношение имеет место, когда скорость продольной спиновой релаксации определяется скоростью спиновой диффузии, которая зависит от разброса ларморовских частот, который, в свою очередь, определяет время спиновой дефазировки; (3) оптическое детектирование влияния слабой локализации на скорость продольной релаксации электронного спина в GaAs с металлической проводимостью, которое ранее наблюдалось только в экспериментах по изучению транспорта электронов в слабых магнитных полях.

Третья из упомянутых четырех задач состоит в применении новых экспериментальных возможностей для изучения спиновой динамики электронов в низкоразмерных гетероструктурах, таких как квантовые ямы с высокоподвижным электронным газом и квантовые точки, заполненные резидентными электронами. Показано, что в квантовых ямах GaAs/AlGaAs с концентрацией электронов $1 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ и подвижностью $> 2 \times 10^6 \text{ см}^2/\text{Вс}$ при низких температурах в сильных магнитных полях, в режиме квантового эффекта Холла при четных факторах заполнения спиновая релаксация резко

замедляется (время спиновой релаксации T_1 увеличивается до субмикросекундных значений). Предложено объяснение наблюдаемого эффекта, заключающееся в уменьшении числа состояний, в которые может происходить рассеяние при спиновой релаксации при четных факторах заполнения. В ансамбле однократно заряженных электронами (In,Ga)As/GaAs КТ измерена динамика спиновой поляризации после резкой остановки импульсов накачки. Установлено, что спектр прецессии электронного спинового ансамбля имеет модовую структуру, определяемую периодичностью накачки. Определены параметры мод, выделен вклад динамической поляризации ядерных спинов в динамику электронных спинов.

Наконец, **четвертая задача** заключалась в демонстрации возможности новых методов для селективного выделения времен спиной релаксации T_1 и T_2 в ансамблях спиновых систем, с распределением величины g фактора электрона по ансамблю. В качестве модельного объекта была выбрана система сильно локализованных электронов в ионах церия в решетке аллюмо-иттриевого граната, $\text{Ce}^{3+}:\text{YAG}$. Было продемонстрировано выделение времени спиновой когерентности $T_2 = 2.5$ мс для отдельного электрона, на фоне неоднородного времени спиновой дефазировки в их ансамбле $T_2^* \approx 25$ нс. Определены экспериментальные условия, при которых имеется возможность измерить время спиновой релаксации T_1 для спиновых систем с определенными g факторами. Показано, что с ростом температуры времена спиновой релаксации T_1 и T_2 в $\text{Ce}^{3+}:\text{YAG}$ ограничены релаксацией с участием фононов.

Переходя к оценке диссертации в целом, необходимо отметить, что соискателю в своей диссертационной работе удалось получить совокупность принципиально новых результатов, которые, с одной стороны, дают ясную физическую картину исследовавшихся явлений, а с другой стороны инициируют проведение последующих экспериментальных и теоретических работ, направленных на обнаружение новых эффектов. Таким образом, можно утверждать, что развитые автором диссертации методики, совокупность

полученных с их использованием результатов, а также сделанные на основе этих результатов выводы, значительно расширяют существующие представления о когерентной динамике спиновой поляризации электронных возбуждений в полупроводниковых структурах и являются новым, существенным вкладом в физику полупроводников. Развитые методики измерения спиновой когерентности в широком временном диапазоне с высоким временным разрешением уже используются в ведущих мировых лабораториях, а по результатам проводимых исследований созданы предпосылки для разработки устройств записи, хранения и чтения информации, использующих спиновые состояния носителей заряда. Все это, безусловно, имеет важное **прикладное значение**.

Говоря о недостатках работы, необходимо отметить следующее:

1. Известно, что закрепление уровня Ферми на поверхностных состояниях GaAs приводит к образованию слоя обеднения в приповерхностной области образца. При импульсном возбуждении образца фотонами поверхностные состояния могут заряжаться, захватывая носители заряда (и разряжаться из-за поверхностной рекомбинации), что приводит к изменению ширины слоя обеднения. В образце с наименьшей концентрацией доноров $n_d = 5.5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ширина слоя обеднения превышает толщину эпитаксиального слоя GaAs (2 мкм). Таким образом, электроны в этом образце находятся во внешнем электрическом поле, напряженность которого модулирована с частотой следования импульсов. Было бы уместно привести оценку влияния этого электрического поля на изучаемые процессы.

2. Описанная в пятой главе методика комбинированного резонанса РСУ–ЭПР, позволяющая прецизионно определять времена спиновой когерентности T_2 , опробована на системе $\text{Ce}^{3+}:\text{YAG}$. В тоже время, большая часть экспериментов, по изучению когерентной спиновой динамики электронов, была проделана с использованием другой модельной системы n-GaAs. Есть ли какие-то

принципиальные ограничения, помешавшие использовать комбинированный резонанс РСУ–ЭПР для изучения спиновой динамики электронов в GaAs?

Текст диссертации написан ясным языком, однако местами автор злоупотребляет неудачными формулировками. Так на странице 12 одна из задач работы сформулирована в следующей форме: «Создание селективного метода измерения времени продольной спиновой релаксации, позволяющего поставить в соответствие g фактору время T_1 ». Очевидно, что здесь речь идет об однозначном определении времен релаксации T_1 для систем, у которых зеемановское расщепление спиновых состояний в магнитном поле описывается определенным g фактором.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки работы. Из проведенного анализа работы следует, что диссертация В. В. Белых представляет собой полное и квалифицированно выполненное исследование в важной и актуальной области физики твердого тела. Принимая во внимание, что основные результаты диссертации являются принципиально новыми, данную работу можно охарактеризовать как существенный вклад в развитие физики конденсированного состояния. **Достоверность и обоснованность** результатов определяется тщательно проработанной методикой изучения исследуемых процессов, согласием теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений, корреляцией результатов исследований различными экспериментальными методами. Основные результаты диссертации опубликованы в 17 статьях в международных научных журналах, доложены на ведущих российских и международных научных конференциях, хорошо известны специалистам. Автореферат правильно передает содержание диссертации. По содержанию, объему, новизне, научной и практической значимости результатов, полученных в работе, диссертация отвечает требованиям пункта 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г. (ред. от 11.09.2021), предъявляемым к докторским диссертациям. Название и

содержание диссертации соответствуют паспорту специальности, а её автор, Белых Василий Валерьевич, безусловно, заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук (01.04.10 – физика полупроводников), ведущий научный сотрудник лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН,

 Шамирзаев Тимур Сезгирович

«21» 07 2022 г.

Тел. (383) 330-44-75, e-mail: tim@isp.nsc.ru

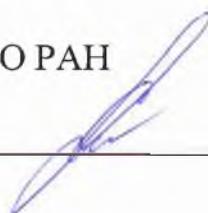
630090, Россия, Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13.

Подпись сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН (ИФП СО РАН) Шамирзаева Тимура Сезгировича удостоверяю

Ученый секретарь ИФП СО РАН



к.ф.-м.н.

 Аржанникова София Андреевна

Список основных работ Шамирзаева Тимура Сезгировича по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. T. S. Shamirzaev, A.V. Shumilin, D.S. Smirnov, J. Rautert, D.R. Yakovlev, and M. Bayer. Dynamic polarization of electron spins in indirect band gap (In, Al) As/AlAs quantum dots in a weak magnetic field: Experiment and theory. *Physical Review B*, 104(11), p.115405 (2021).
2. V.Y. Ivanov, D.O. Tolmachev, T.S. Shamirzaev, T. Ślupinski, D.R. Yakovlev, and M. Bayer. Optically detected magnetic resonance of indirect excitons in an ensemble of (In, Al, Ga) As/(Al, Ga) As quantum dots. *Physical Review B*, 104(19), p.195306 (2021).
3. L.I. Fedina, A.K. Gutakovskii, V.I. Vdovin, and T.S. Shamirzaev. Structural Transformations of the Dislocation Cores in Si and Their Relationship with Photoluminescence. *Crystallography Reports*, 66(4), pp. 636-643 (2021).
4. V.A. Golyashov, V.S. Rusetsky, T.S. Shamirzaev, D.V. Dmitriev, N.V. Kislykh, A.V. Mironov, V.V. Aksenov, and O.E. Tereshchenko. Spectral detection of spin-polarized ultra low-energy electrons in semiconductor heterostructures. *Ultramicroscopy*, 218, p.113076 (2020).
5. T.S. Shamirzaev, D.R. Yakovlev, A.K. Bakarov, N.E. Kopteva, D. Kudlacik, A.K. Gutakovskii, and M. Bayer. Recombination and spin dynamics of excitons in thin (Ga, Al)(Sb, As)/AlAs quantum wells with an indirect band gap and type-I band alignment. *Physical Review B*, 102(16), p.165423 (2020).
6. D.S. Smirnov, T.S. Shamirzaev, D.R. Yakovlev, and M. Bayer. Dynamic polarization of electron spins interacting with nuclei in semiconductor nanostructures. *Physical Review Letters*, 125(15), p.156801 (2020).
7. J. Rautert, T.S. Shamirzaev, S.V. Nekrasov, D. R. Yakovlev, P. Klenovsky, Yu. G. Kusrayev, and M. Bayer, Optical orientation and alignment of excitons in direct and indirect band gap (In,Al)As/AlAs quantum dots with type-I band alignment, *Physical Review B*, 99, p. 195411 (2019).
8. L.V. Kotova, A.V. Platonov, V.N. Kats, T.S. Shamirzaev, R. André, and V.P. Kochereshko. Nonreciprocal optical and magneto-optical effects in semiconductor quantum wells. *Physics of the Solid State*, 60(11), pp.2269-2275 (2018).
9. L.I. Fedina, A.K. Gutakovskii, and T.S. Shamirzaev. On the structure and photoluminescence of dislocations in silicon. *Journal of Applied Physics*, 124(5), p.053106 (2018).
10. T.S. Shamirzaev. Exciton recombination and spin dynamics in indirect-gap quantum wells and quantum dots. *Physics of the Solid State*, 60(8), pp.1554-1567 (2018).