

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 19 сентября 2022 г № 30

О присуждении Белых Василию Валерьевичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой динамики в твердотельных системах» по специальности 1.3.8 – Физика конденсированного состояния принята к защите 14 июня 2022 года, (протокол заседания № 25) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Белых Василий Валерьевич, 27 апреля 1983 года рождения, в 2004 году окончил бакалавриат и в 2006 году магистратуру Московского физико-технического института (государственного университета) на Факультете общей и прикладной физики по направлению «Прикладные математика и физика». В 2009 году Белых В. В. защитил в Московском физико-техническом институте (государственном университете) диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Динамика излучения GaAs-микрорезонатора с встроенными квантовыми ямами» по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния (диплом ДКН №110551). С 2004 года является сотрудником ФИАН, в настоящее время работает в

должности старшего научного сотрудника Отделения физики твердого тела ФИАН.

Диссертационная работа Белых В. В. выполнена в Отделении физики твердого тела ФИАН.

Официальные оппоненты

1. Белотелов Владимир Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор РАН, доцент Кафедры фотоники и физики микроволн Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования “Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова”;

2. Кулик Леонид Викторович, доктор физико-математических наук, профессор РАН, ведущий научный сотрудник Лаборатории неравновесных электронных процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю.А. Осипяна Российской академии наук;

3. Шамирзаев Тимур Сезгирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Лаборатории физики и технологии гетероструктур Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук,

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе), город Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном главным научным сотрудником Лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, профессором РАН, доктором физико-математических наук Родиной

Анной Валерьевной и руководителем Отделения физики твердого тела, заведующим Лабораторией спиновых и оптических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, профессором, доктором физико-математических наук Кусраевым Юрием Георгиевичем и утвержденном директором ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Ивановым Сергеем Викторовичем, указала, что соискатель заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук.

Соискатель имеет 54 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 28 работ, их них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, опубликовано 17 работ.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Белых В. В. работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Belykh V. V. Selective measurement of the longitudinal electron spin relaxation time T_1 of Ce^{3+} ions in a YAG lattice: Resonant spin inertia / V. V. Belykh, S. R. Melyakov // Physical Review B.— 2022.— Vol. 105, no. 20.—P. 205129.

2. Belykh V. V. Stimulated resonant spin amplification reveals millisecond electron spin coherence time of rare-earth ions in solids / V. V. Belykh, A. R. Korotneva, D. R. Yakovlev // Physical Review Letters.— 2021.— Vol. 127, no. 15.— P. 157401.

3. Belykh V. V. Resonant spin amplification meets electron spin resonance in n-GaAs / V. V. Belykh, D. N. Sob'yanin, A. R. Korotneva // Physical Review B.— 2020.— Vol. 102, no. 7.— P. 075201.

4. Belykh V. V. Anomalous magnetic suppression of spin relaxation in a two-dimensional electron gas in a GaAs/AlGaAs quantum well / V. V. Belykh, M. V. Kochiev, D. N. Sob'yanin, D. R. Yakovlev, M. Bayer //Physical Review B.— 2020.— Vol. 101, no. 23.— P. 235307.

5. Belykh V. V. Radiofrequency driving of coherent electron spin dynamics in n-GaAs detected by Faraday rotation / V. V. Belykh, D. R. Yakovlev, M. Bayer // Physical Review B.— 2019.— Vol. 99, no. 16.— P. 161205(R).

6. Belykh V. V. Quantum Interference Controls the Electron Spin Dynamics in n-GaAs / V. V. Belykh, A. Y. Kuntsevich, M. M. Glazov, K. V. Kavokin, D. R. Yakovlev, M. Bayer // Physical Review X.— 2018.— Vol. 8, no. 3.— P. 031021.

7. Evers E. Decay and revival of electron spin polarization in an ensemble of (In,Ga)As quantum dots / E. Evers, V. V. Belykh, N. E. Kopteva, I. A. Yugova, A. Greilich, D. R. Yakovlev, D. Reuter, A. D. Wieck, M. Bayer // Physical Review B.— 2018.— Vol. 98, no. 7.— P. 075309.

8. Belykh V. V. Electron charge and spin delocalization revealed in the optically probed longitudinal and transverse spin dynamics in n-GaAs / V. V. Belykh, K. V. Kavokin, D. R. Yakovlev, M. Bayer // Physical Review B.— 2017.— Vol. 96, no. 24.— P. 241201(R).

9. Belykh V. V. Extended pump-probe Faraday rotation spectroscopy of the submicrosecond electron spin dynamics in n-type GaAs / V. V. Belykh, E. Evers, D. R. Yakovlev, F. Fobbe, A. Greilich, M. Bayer // Physical Review B.— 2016.— Vol. 94, no. 24.— P. 241202(R).

На автореферат поступил отзыв Глазова Михаила Михайловича, доктора физико-математических наук, члена-корреспондента РАН, ведущего научного сотрудника Сектора теории квантовых когерентных явлений в твердом теле Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук. В отзыве отмечается, что по объему и уровню решенных задач, развитых методов и подходов, значимости результатов исследование «Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой динамики в твердотельных системах» фактически формирует научное направление. В отзыве указано, что соискатель Белых В.В. заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – физика конденсированного состояния.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области физики конденсированного состояния и спинтроники, а ведущей организации – ее репутацией признанного научного центра, проводящего исследования в области физики конденсированного состояния, в частности, физики полупроводников, и спинтроники.

Диссертация Белых В. В. посвящена развитию методов спиновой физики, позволяющих измерять долгоживущую спиновую динамику с высоким временным разрешением, дающих доступ к исследованию спиновой когерентности, а также экспериментальному исследованию с помощью данных методов систем на основе GaAs, а также систем редкоземельных ионов.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. Разработан метод измерения электронной спиновой динамики в широком временном диапазоне с пикосекундным разрешением на основе принципа накачки-зондирования с измерением фарадеевского/керровского вращения.

2. Обнаружено, что времена продольной спиновой релаксации T_1 и дефазировки спинового ансамбля T_2^* в n -легированном GaAs связаны обратным соотношением, $T_1 T_2^* \approx \text{const}$, которое выполняется при изменении магнитного поля и температуры.

3. Показано, что для n -GaAs в магнитном поле спиновая система преимущественно локализованных электронов характеризуется большим разбросом частот ларморовской прецессии, коротким временем дефазировки спинового ансамбля T_2^* и длинным временем $T_1 \gg T_2^*$. Для делокализованных электронов разброс частот прецессии минимален, и система характеризуется близкими временами $T_1 \sim T_2^*$.

4. Обнаружено влияние транспортного эффекта слабой локализации на спиновую динамику n -GaAs. Это проявляется в увеличении времени

продольной спиновой релаксации T_1 на несколько десятков процентов и его убывании с магнитным полем и температурой.

5. Показано, что в квантовой яме на основе GaAs с высокоподвижным электронным газом при низкой температуре зависимость времени продольной спиновой релаксации от магнитного поля имеет осциллирующий характер, демонстрируя пики на четных факторах заполнения ν .

6. Показано, что спектр свободной спиновой прецессии ансамбля однократно заряженных (In,Ga)As/GaAs квантовых точек после периодического импульсного лазерного возбуждения характеризуется модовой структурой. Показано, что динамическая поляризация спинов ядер радикально ускоряет формирование модовой структуры.

7. Разработан радиооптический метод накачки-зондирования, в котором спиновая ориентация осуществляется резким изменением магнитного поля или импульсом радиочастотного (РЧ) поля, а детектирование спиновой поляризации — посредством измерения фарадеевского вращения плоскости линейной поляризации оптического импульса. Данный метод позволяет определять частоту спиновой прецессии и времена спиновой релаксации.

8. Обнаружено, что при периодическом оптическом возбуждении неоднородной спиновой системы и приложении РЧ поля, в случае совпадения частоты повторения лазерных импульсов, частоты РЧ поля и ларморовской частоты, возникает эффект стимулированного резонансного спинового усиления. Данный эффект позволяет определить время спиновой когерентности T_2 . В частности, для системы ионов церия в решетке аллюмо-иттриевого граната, $\text{Ce}^{3+}:\text{YAG}$, наблюдается рекордно узкий спиновый резонанс, соответствующий миллисекундному времени спиновой когерентности.

9. Разработан метод резонансной спиновой инерции, позволяющий селективно определить время продольной спиновой релаксации T_1 для конкретного спинового резонанса. С помощью данного метода, в частности, была обнаружена достаточно сильная анизотропия времени в $\text{Ce}^{3+}:\text{YAG}$.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. В частности новизна обусловлена тем, что:

- Разработанный автором расширенный метод накачки–зондирования позволяет исследовать в деталях с большим временным разрешением долгоживущую спиновую динамику в широком временном диапазоне, недоступном стандартному методу накачки–зондирования. Это позволило радикально расширить спектр исследуемых систем, область исследуемых режимов по магнитному полю, степени локализации электронов и обнаружить новые явления, связанные с особенностями спиновой релаксации.

- Впервые систематически исследовано изменения спиновой динамики в большом магнитном поле при делокализации электронов, а также влияние эффекта слабой локализации в легированном GaAs и обнаружена связь продольной спиновой релаксации с неоднородностью системы.

- Впервые установлен характер продольной спиновой релаксации электронов в режиме квантового эффекта Холла в квантовых ямах и получен спектр спиновой прецессии в квантовых точках при их периодическом возбуждении.

- Впервые установлено, что радиочастотное магнитное поле может стимулировать оптическое спиновое усиление. Это может быть использовано для определения времени спиновой когерентности, свободного от влияния шумного окружения.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что расширенный метод накачки–зондирования для исследования спиновой динамики, представленный в данной диссертации, позволяет наблюдать новые эффекты даже в хорошо исследованных, а также новых системах. Это, например, обнаружение связи продольной спиновой релаксации с неоднородностью системы, обнаружение проявлений чисто транспортного явления слабой локализации в спиновой релаксации, обнаружение предсказанного теоретически резкого замедления продольной

спиновой релаксации в квантовых ямах с высокоподвижным электронным газом. Данный метод уже успешно используется для исследования целого ряда систем в различных лабораториях. При этом для практических приложений наиболее актуальным является рассмотрение спина локализованного электрона в качестве квантового бита. Здесь решающую роль играет измерение и увеличение времени спиновой когерентности T_2 . С этой задачей успешно справился метод стимулированного резонансного спинового усиления, разработанный соискателем. В данной диссертации также была решена проблема селективного определения времени продольной спиновой релаксации T_1 для систем, имеющих несколько спиновых резонансов.

Достоверность результатов, полученных соискателем с помощью оригинальных методов, подтверждается их сравнением с результатами, полученными уже известными методами там, где последние могут быть применены. Часть результатов, проверялась сопоставлением данных оптических измерений спиновой динамики и транспортных измерений магнитосопротивления. Также достоверность всех представленных экспериментальных результатов подтверждается их сопоставлением с теоретическими расчетами.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Белых В. В., получены лично автором, либо при его определяющем участии. Подготовка результатов к публикации проводилась автором лично, либо совместно с соавторами.

Результаты диссертационной работы Белых В. В. рекомендуются к использованию в Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Институте физики твердого тела им. Ю. А. Осипьяна РАН, Институте физики микроструктур РАН, Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова РАН, Российском квантовом центре, Московском государственном университете им. М. В. Ломоносова, Казанском федеральном университете.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

В ходе защиты соискатель Белых В. В. аргументировано ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 19 сентября 2022 года диссертационный совет принял решение присудить Белых Василию Валерьевичу учёную степень доктора физико-математических наук за разработку методов исследования долгоживущей когерентной спиновой динамики в твердотельных системах и экспериментальное решение научной проблемы о связи электронной спиновой динамики с характером локализации электронов и их транспортом в системах на основе GaAs.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 21 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.8 — Физика конденсированного состояния), участвовавшие в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени - 21,
против присуждения учёной степени - 0,
недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

Учёный секретарь диссертационного совета
д.ф.-м.н.

Золотько Александр Степанович

19 сентября 2022 г.