

ОТЗЫВ

Официального оппонента на диссертационную работу

Белых Василия Валерьевича

«Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой динамики в твердотельных системах», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «физика конденсированного состояния».

Электронные спиновые состояния в твердотельных системах в значительной степени определяют оптоэлектронные свойства этих систем. Исследование спиновой динамики позволяет измерить основные характеристики спиновых состояний: g фактор и времена продольной спиновой релаксации T_1 и спиновой когерентности T_2 . Эти параметры важны как с практической точки зрения для понимания возможности когерентного управления спиновыми состояниями, так и с фундаментальной точки зрения для установления механизмов спиновой релаксации, получения информации о характере локализации электронов, исследования сверхтонкого взаимодействия со спинами ядер, получения информации о ядерной подсистеме. Сложность исследования спиновой динамики заключается в том, что период спиновой прецессии в магнитном поле может лежать в пикосекундном диапазоне, тогда как диапазон времен спиновой релаксации при низких температурах может простирается от пико- до миллисекунд. Ограничения существовавших до недавнего времени экспериментальных методов исследования спиновой динамики не позволяли ответить на ряд вопросов в исследовании электронных систем со свободными и локализованными электронами в магнитном поле при низких температурах. Это определяет **актуальность** диссертации В. В. Белых, целью которой является развитие методов исследования долгоживущей электронной спиновой динамики с высоким временным разрешением, а также экспериментальное исследование ряда систем на основе GaAs со свободными, слабо локализованными и полностью локализованными электронами, а также систем с полностью локализованными электронами в редкоземельных ионах. В работе четко сформулированы решаемые задачи, их актуальность, тщательно описана методика проведения экспериментов, полученные результаты, приведена их интерпретация. Методы, разработанные диссертантом, расширяют исследовательский арсенал спиновой физики и представляют несомненную практическую ценность для экспериментатора.

Диссертационная работа В. В. Белых состоит из введения, 6 глав и заключения, представлена на 222 страницах с 76 рисунками и со списком литературы из 245 наименований.

Во **введении** описаны основные понятия, связанные со спином, очерчены проблемы спиновой физики полупроводников, которые определяют задачи данной диссертации и ее актуальность. Также сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор основных эффектов спиновой физики полупроводников, а также методов исследования спиновой динамики.

Во **второй главе** представлен расширенный метод накачки-зондирования с измерением фарадеевского вращения, позволяющий исследовать спиновую динамику в широком временном диапазоне с пикосекундным разрешением, а также представлено систематическое исследование спиновой динамики в n-легированном GaAs с помощью данного метода при различных концентрациях доноров в магнитном поле различной ориентации и при различных температурах. Среди полученных результатов здесь стоит выделить обнаружение обратной связи между временем фазовой дефазировки неоднородного ансамбля и временем продольной спиновой релаксации, а также обнаружение проявления эффекта слабой локализации в оптически детектируемой спиновой динамике n-GaAs.

В **третьей главе** представлено исследование спиновой динамики в структурах пониженной размерности на основе GaAs: квантовых ямах и квантовых точках. Здесь обнаружена аномальная зависимость времени продольной спиновой релаксации от магнитного поля в высокоподвижном двумерном электронном газе, а также осцилляции этой зависимости при низких температурах в сильных магнитных полях. В ансамбле однократно заряженных квантовых точек впервые получен спектр спиновой прецессии, который демонстрирует модовую структуру, определяемую периодичностью лазерной накачки.

В **четвертой главе** представлен метод накачки-зондирования для исследования спиновой динамики, где в качестве накачки служит импульс радиочастотного (РЧ) магнитного поля или скачкообразное изменение магнитного поля, а зондированием служит лазерный импульс. Представлены результаты исследования спиновой динамики n-GaAs данным методом, а также показано, что спиновую поляризацию, на которую воздействует РЧ поле можно увеличивать с помощью оптической подсветки.

Пятая глава посвящена исследованию комбинации резонансов ЭПР и оптического резонансного спинового усиления, когда на спиновую систему подается импульсное лазерное излучение с частотой повторения импульсов близкой к частоте спиновой прецессии Лармора и РЧ поле также с близкой частотой. Комбинированный резонанс наиболее интересен для неоднородной системы с большим разбросом частот спиновой прецессии. Здесь резонансное РЧ поле стимулирует оптическое спиновое усиление. Данный эффект был продемонстрирован в редкоземельных ионах церия в решетке YAG, сканируя частоту РЧ поля относительно частоты повторения лазерных импульсов. Он позволил определить время спиновой когерентности T_2 , недоступное оптическим методам типа накачка-зондирование. Здесь следует особо отметить, что измеренное T_2 лежит в миллисекундном диапазоне и соответствует спиновой системе «оторванной» от шумного ядерного окружения.

В **шестой главе** решена задача селективного определения времени продольной спиновой релаксации T_1 . Для этого был разработан метод резонансной спиновой инерции, позволяющий одновременно определить время T_1 и g фактор, основанный на оптической накачке и детектировании спиновой поляризации и воздействии на нее резонансным РЧ полем, промодулированным по амплитуде. Данный метод позволил измерить анизотропию времени T_1 в ионах Ce^{3+} в кристалле YAG.

В **заключении** сформулированы основные выводы по диссертации, и обсуждаются перспективы дальнейших исследований.

Таким образом, в работе представлен ряд новых фундаментальных результатов, полученных с помощью разработанных автором оригинальных методов исследования спиновой динамики электронов.

Достоверность и обоснованность представленных в диссертации результатов и выводов подтверждается использованием современного оборудования, физической обоснованностью используемых автором методов, а также сравнением полученных данных с известными результатами, полученными классическими методами там, где такое сравнение возможно. Часть результатов, подтверждается сравнением данных полученных различными методами (оптическими и транспортными). Достоверность экспериментальных результатов также подтверждается их сопоставлением с теоретическими расчетами.

Работа В. В. Белых представляет несомненный фундаментальный и практический интерес. Результаты исследований могут быть использованы в МГУ им. М.В.Ломоносова (Москва), Институте физики твердого тела РАН (Черноголовка), Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург), Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова (Новосибирск), Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород), Казанском федеральном университете, а также в других организациях, в область деятельности которых входит исследование спиновой физики в твердотельных системах.

По работе В. В. Белых можно сделать следующие замечания:

Одним из наиболее важных результатов работы В.В. Белых является экспериментальное обнаружение обратной связи времен продольной спиновой релаксации и дефазировки спинового ансамбля в n -легированном GaAs ($T_1 T_2 \approx const$). По всей видимости, данное соотношение выполняется и для ряда других материалов. К сожалению, в диссертации не проведено обобщение и не уточнено, для какого класса материалов выполняется данное соотношение, хотя это значительно усилило бы значимость полученного результата.

Основным физическим механизмом возбуждения спиновой динамики в работе служит явление оптической ориентации спинов под действием фемтосекундных лазерных импульсов круговой поляризации. Однако нельзя исключать и другие механизмы воздействия лазерных импульсов на спины, в том числе термические. Роль альтернативных механизмов оптического возбуждения спиновой динамики в диссертации не обсуждается.

Несмотря на то, что работа экспериментальная, в тексте диссертации уделено мало внимания описанию характеристики образцов и их свойствам. Например, следовало бы уточнить процедуру измерения концентрации доноров в GaAs, а также привести спектры фотолюминесценции для всех обсуждаемых в работе образцов.

Стоит отметить, что приведенные замечания не умаляют значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку работы. Диссертационная работа В. В. Белых является законченным научным исследованием, представленные в ней

результаты являются **новыми** и имеют большую **научную значимость и практическую ценность**. По материалам диссертации опубликовано 17 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК, индексируемых в базах РИНЦ, Scopus и Web of Science и 11 тезисов, вошедших в сборники научных трудов международных и российских конференций.

Автореферат достоверно и полно отражает содержание диссертации.

Работа В. В. Белых на тему «Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой динамики в твердотельных системах» отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «физика конденсированного состояния» Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а ее автор Белых Василий Валерьевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент

Белотелов Владимир Игоревич

Доктор физико-математических наук, профессор РАН,
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский государственный
университет имени М. В. Ломоносова»,
Физический факультет,
Кафедра фотоники и физики микроволн, доцент
г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2,
тел.: +7 (495) 939-11-34,
email: belotelov@physics.msu.ru

01.09.2022

Подпись В. И. Белотелова заверяю,
Декан физического факультета
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования «Московский государственный
университет имени М.В.Ломоносова»
профессор
Сысоев Николай Николаевич



Список основных работ Белотелова Владимира Игоревича по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет:

1. O. V. Borovkova, S. V. Lutsenko, M. A. Kozhaev, A. N. Kalish, and V. I. Belotelov. Spectrally Selective Detection of Short Spin Waves in Magnetoplasmonic Nanostructures via the Magneto-Optical Intensity Effect. *Nanomaterials* 12, 405 (2022).
2. P. E. Petrov, P. O. Kapralov, G. A. Knyazev, A. N. Kuzmichev, P. M. Vetoshko, Yu. M. Bunkov, and V. I. Belotelov. Magneto-optical imaging of coherent spin dynamics in ferrites. *Opt. Express* 30, 1737 (2022).
3. N. A. Gusev, D. I. Dgheparov, N. G. Pugach, and V. I. Belotelov. Magnonic control of the superconducting spin valve by magnetization reorientation in a helimagnet. *Appl. Phys. Lett.* 118, 232601 (2021).
4. D. M. Krichevsky, D. O. Ignatyeva, V. A. Ozerov, and V. I. Belotelov. Selective and Tunable Excitation of Standing Spin Waves in a Magnetic Dielectric Film by Optical Guided Modes. *Phys. Rev. Applied* 15, 034085 (2021).
5. A. I. Chernov, M. A. Kozhaev, D. O. Ignatyeva, E. N. Beginin, A. V. Sadovnikov, A. A. Voronov, D. Karki, M. Levy, and V. I. Belotelov. All-Dielectric Nanophotonics Enables Tunable Excitation of the Exchange Spin Waves. *Nano Lett.* 20, 5259 (2020).
6. N. Maccaferri, I. Zubritskaya, I. Razdolski, I.-A. Chioar, V. Belotelov, V. Kapaklis, P. M. Oppeneer, and A. Dmitriev. Nanoscale magnetophotonics. *J. Appl. Phys.* 127, 080903 (2020).
7. A. E. Khramova, D. O. Ignatyeva, M. A. Kozhaev, S. A. Dagesyan, V. N. Berzhansky, A. N. Shaposhnikov, S. V. Tomilin, and V. I. Belotelov. Resonances of the magneto-optical intensity effect mediated by interaction of different modes in a hybrid magnetoplasmonic heterostructure with gold nanoparticles. *Opt. Express* 27, 33170 (2019).
8. D. O. Ignatyeva, C. S. Davies, D. A. Sylgacheva, A. Tsukamoto, H. Yoshikawa, P. O. Kapralov, A. Kirilyuk, V. I. Belotelov, and A. V. Kimel. Plasmonic layer-selective all-optical switching of magnetization with nanometer resolution. *Nature Commun.* 10, 4786 (2019).
9. M. Levy, O. V. Borovkova, C. Sheidler, B. Blasiola, D. Karki, F. Jomard, M. A. Kozhaev, E. Popova, N. Keller, and V. I. Belotelov. Faraday rotation in iron garnet films beyond elemental substitutions. *Optica* 6, 642 (2019).
10. A. I. Chernov, M. A. Kozhaev, A. Khramova, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, V. N. Berzhansky, A. K. Zvezdin, and V. I. Belotelov. Control of the phase of the magnetization precession excited by circularly polarized femtosecond-laser pulses. *Photonics Res.* 6, 1079 (2018).
11. M. A. Kozhaev, A. I. Chernov, D. A. Sylgacheva, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, V. N. Berzhansky, A. K. Zvezdin, and V. I. Belotelov. Giant peak of the Inverse Faraday effect in the band gap of magnetophotonic microcavity. *Sci. Rep.* 8, 11435 (2018).
12. O. V. Borovkova, H. Hashim, M. A. Kozhaev, S. A. Dagesyan, A. Chakravarty, M. Levy, and V. I. Belotelov. TMOKE as efficient tool for the magneto-optic analysis of ultra-thin magnetic films. *Appl. Phys. Lett.* 112, 063101 (2018).
13. A. N. Kalish, R. S. Komarov, M. A. Kozhaev, V. G. Achanta, S. A. Dagesyan, A. N. Shaposhnikov, A. R. Prokopov, V. N. Berzhansky, A. K. Zvezdin, and V. I. Belotelov. Magnetoplasmonic quasicrystals: an approach for multiband magneto-optical response. *Optica* 5, 617 (2018).