

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Физико-
технического института им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук

доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН

Иванов Сергей Викторович

«20» июля 2022 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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».

Диссертационная работа Белых В. В. посвящена развитию методов исследования спиновой физики электронной системы в твердотельных структурах, а также исследованию с помощью данных методов класса легированных полупроводниковых систем на основе GaAs, как объемных так и пониженной размерности, и системы с редкоземельными ионами в твердотельной решетке.

Высокая **актуальность** тематики диссертации связана с возможностью создания опто-электронных устройств, действие которых основано на управлении спиновыми состояниями, а также использования электронного спина в твердотельных системах в качестве квантового бита в системах обработки информации и квантовых вычислений. Исследование частот спиновой прецессии электронов, а также времен спиновой релаксации позволяет получить важную информацию о зонной структуре исследуемых систем, характере движения электронов и их взаимодействиях, о взаимодействиях с ядерной спиновой подсистемой. Наиболее полную информацию о спиновых свойствах системы можно получить, исследуя динамику электронного спина в магнитном поле. Однако сложность таких исследований связана с тем, что характерные времена спиновой динамики могут находиться в диапазоне от пикосекунд до миллисекунд в зависимости от свойств исследуемой системы, а также при различных значениях магнитного поля и температуры. По этой причине до недавнего времени использовался целый ряд различных методов для этих исследований, которые, тем не менее, не покрывали весь диапазон параметров исследуемой системы. Кроме того, существовали проблемы определения времени когерентности спиновой системы оптическими методами, связанные с тем, что время затухания прецессии спинового ансамбля не совпадает с временем когерентности отдельного спина. Эти проблемы были решены в данной диссертации, что позволило расширить спектр исследуемых объектов и получить ряд новых результатов. Кроме того, разработанные, обоснованные теоретически и апробированные автором новые методы исследований могут быть широко применены далее для новых спиновых систем, что определяет также высокую **практическую и теоретическую значимость работы**.

Достоверность полученных в диссертации Белых В. В. результатов основывается на использовании современного научного оборудования, сравнении результатов, полученных оригинальными, разработанными автором методами, с результатами, полученными стандартными методами там, где такое сравнение возможно. Следует отметить, что некоторые выводы были проверены и подтверждены сопоставлением результатов, полученных оптическими и транспортными методами. Достоверность результатов также подтверждается сопоставлением данных измерений с расчетами.

Полученные Белых В. В. результаты прошли широкую **апробацию**. Они докладывались на ведущих международных и российских конференциях по физике полупроводников и спиновой физике, а также на научных семинарах, в том числе в ФТИ им. А.Ф. Иоффе. Результаты, представленные в диссертации опубликованы в 17 статьях в ведущих международных изданиях, входящих в базу данных Web of Science, в том числе в журналах Nature Communications, Scientific Reports, Phys. Rev. Lett., Phys. Rev. X и Phys. Rev. B.

Диссертация написана очень хорошим и понятным языком и хорошо структурирована. Она состоит из шести глав, введения, заключения, списка публикаций автора по теме диссертации, а также списка цитируемой литературы.

Во введении сформулирована актуальность тематики диссертации, цель работы, приведен список решаемых задач, обоснована научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, приведены защищаемые положения, обоснована достоверность полученных результатов, описана апробация работы, а также личный вклад автора.

Глава 1 содержит обзор основных эффектов и методов, в основном оптических, исследования спиновой физики в твердотельных системах. Подобный обзор очень полезен для понимания результатов, которые представлены в последующих главах. Также в данной главе приведены некоторые оригинальные, в том числе методические, результаты, полученные автором.

Глава 2 посвящена исследованию спиновой динамики объемного n -легированного GaAs, которая при определенных условиях характеризуется достаточно большими временами спиновой релаксации. Для исследования спиновой динамики с высоким временным разрешением в широком временном диапазоне автором был разработан расширенный метод накачки-зондирования, который представлен в начале второй главы и использован в данной и следующей главах. В данной главе исследованы особенности изменения спиновой динамики, связанные с делокализацией электронов при увеличении плотности доноров в n -GaAs либо температуры, а также спиновая динамика в n -GaAs, находящемся в металлической фазе.

Глава 3 посвящена исследованию низкоразмерных структур на основе GaAs. В ней приведены исследования спиновой динамики в высокоподвижном электронном газе в квантовой яме при низких температурах и сильных магнитных полях, когда свойства системы определяются квантованием Ландау. Также в данной главе исследована спиновая динамика в ансамбле квантовых точек, в частности эффект синхронизации спиновых мод.

Глава 4 посвящена разработке нового метода исследования спиновой динамики по принципу «накачка-зондирование», где в качестве накачки выступает резкое изменение магнитного поля, а в качестве зондирования – оптический импульс.

Глава 5 посвящена исследованию комбинированного резонанса, когда к системе прикладываются оптические импульсы и радиочастотное поле и частоты повторения импульсов и

РЧ поля близки к частоте Лармора для спиновой системы. В этой главе показано, что с помощью комбинированного резонанса в сильно неоднородной системе можно определить время спиновой когерентности, присущее отдельным спинам, которое недоступно стандартным оптическим методам.

Глава 6 посвящена разработке метода резонансной спиновой инерции, позволяющего селективно определять время продольной спиновой релаксации. С помощью данного метода исследована анизотропия этого времени в редкоземельных ионах церия, встроенных в иттрий алюминиевый гранат (yttrium aluminum garnet, YAG).

Заключение диссертации резюмирует полученные результаты и намечает направление дальнейших исследований в данной области.

Данная диссертация имеет большое методическое значение. В ней представлен набор методов, которые позволяют исследовать спиновую динамику в широком (микросекундном) временном диапазоне с пикосекундным временным разрешением, определять время спиновой когерентности T_2 , присущее отдельным электронным спинам, а также селективно определять время продольной спиновой релаксации T_1 , что необходимо, когда в исследуемой структуре имеется несколько спиновых мод с разными энергетическими расщеплениями во внешнем магнитном поле.

Применение новых методов в работе Белых В. В. позволило получить новые и важные фундаментальные результаты, среди которых можно выделить следующие:

- Обнаружена нестандартная линейная зависимость времени продольной спиновой релаксации T_1 от внешнего магнитного поля для n-GaAs с небольшой концентрацией доноров. Также обнаружена связь между временами T_1 и T_2^* , которые могут по отдельности изменяться на несколько порядков при изменении температуры до 15 К или внешнего магнитного поля, однако при сохранении неизменным произведения $T_1 T_2^*$. Этот результат впервые указал на то, что неоднородности спиновой системы влияют на процессы продольной спиновой релаксации.

- Экспериментально обнаружено проявление эффекта слабой локализации электронов в спиновой динамике.

- Была обнаружена аномальная (линейная) магнитополевая зависимость времени продольной спиновой релаксации в двумерном электронном газе в квантовой яме и пики этой зависимости на четных факторах заполнения.

- Наблюдалась модовая структура в спектре спиновой прецессии для ансамбля квантовых точек.

- Благодаря эффекту стимулированного резонансного спинового усиления, измерен спиновый резонанс с рекордно-узкой шириной около 100 Гц в системе Ce:YAG, что соответствует миллисекундному времени спиновой когерентности в данной системе.

- Обнаружена сравнительно сильная анизотропия времени T_1 в системе Ce:YAG в малых магнитных полях при низких температурах.

Полученные Белых В. В. результаты имеют большую фундаментальную и практическую значимость и являются новыми. Они могут использоваться в следующих организациях: Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, Институте физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Институте физики микроструктур РАН, Институте физики полупроводников им. А. В. Ржанова РАН и в других организациях, в которых исследуются и используются оптические и спиновые свойства твердых тел.

В качестве замечаний по диссертации Белых В. В. можно отметить следующее:

- 1) В главе 4 представлены новые методы измерения спиновой динамики, основанные на изменении спинового состояния радиочастотным полем (вместо воздействия лучом накачки в методе накачка-зондирование) и детектировании спина оптическим импульсом. При этом используется нестандартный термин «радиооптическая спектроскопия», который требует пояснения. При том, что создание и развитие методов, представленных в данной главе, представляется важным само по себе, хотелось бы увидеть применение данных методов к новым, неизученным ранее системам. В этом смысле данная глава закладывает хорошую основу для дальнейших исследований.
- 2) В защищаемом положении 2 о постоянстве произведения $T_1 T_2^*$ при изменении температуры или внешнего магнитного поля следовало бы указать диапазон температур, в котором наблюдается такое постоянство.
- 3) Название «фазовая диаграмма» для диаграммы, представленной на Рис. 3 диссертации, следовало бы взять в кавычки.
- 4) При общем описании метода «накачка-зондирование» в Главе 1 стоит пояснить, что в общем случае в методе измеряются времена жизни спина, которые могут быть обусловлены не только процессами спиновой релаксации, но и рекомбинационным временем жизни носителей в исследуемых объектах. Такие времена введены, например, при описании метода оптической ориентации в той же Главе. И далее пояснить, почему для исследуемых в диссертации объектов времена жизни спина могут быть сразу ассоциированы с временами спиновой релаксации. Также в Главе 1 при описании спиновых явлений, связанных с взаимодействием с ядерной спиновой системой, было бы полезно упомянуть не только поле Оверхаузера, но и поле Найта, а также обсудить понятие ядерных спиновых флуктуаций.
- 5) В Главе 5 предложена методика, позволяющая определить время спиновой когерентности T_2 , присущее отдельным спинам, на которое не влияет неоднородность ансамбля. Было бы важно и интересно применить эту методику также для исследования образцов n-легированного GaAs, для которых в Главе 2 установлена связь между временами T_1 и T_2^* , обусловленная неоднородностью ансамбля.

Указанные замечания не уменьшают научную значимость и достоверность полученных результатов и не влияют на положительную оценку работы.

Диссертация Белых В. В. на тему «Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой динамики в твердотельных системах» является серьезным и завершенным научным исследованием. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации. Диссертация отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г, а ее автор, Белых Василий Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Доклад Белых В. В. по материалам диссертации был заслушан и одобрен на научном семинаре лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе 22 июня 2022 г. Отзыв составлен секретарем семинара, главным научным сотрудником лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе, доктором физико-математических наук, профессором РАН Родиной Анной Валерьевной.

Главный научный сотрудник
лаборатории спиновых и оптических
явлений в полупроводниках
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
проф. РАН, доктор физ.-мат. наук
тел. +7 (812) 292-71-40,
anna.rodina@mail.ioffe.ru

Родина Анна Валерьевна

Руководитель отделения физики твердого тела,
заведующий лабораторией спиновых и
оптических явлений в полупроводниках
ФТИ им. А.Ф. Иоффе,
проф., доктор физ.-мат. наук
тел. +7 (812) 297-55-46,
kusrayev@orient.ioffe.ru

Кусраев Юрий Георгиевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук (ФТИ им. А.Ф. Иоффе),
Россия, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26
Тел.: +7 (812) 297-2245
Факс: +7 (812) 297-1017
Электронная почта: post@mail.ioffe.ru

Список работ сотрудников ведущей организации ФТИ им. А.Ф. Иоффе по тематике диссертации В.В. Белых

1. G. V. Budkin and S. A. Tarasenko. Spin splitting in low-symmetry quantum wells beyond Rashba and Dresselhaus terms. *Phys. Rev. B* 105, L161301 (2022).
2. N. V. Kozyrev, R. R. Akhmadullin, B. R. Namozov, Yu. G. Kusrayev, G. Karczewski, and T. Wojtowicz. Optical manifestation of magnetic polarons bound to excitons and resident holes in a (Cd,Mn)Te quantum well. *Phys. Rev. B* 104, 045307 (2021).
3. A. V. Shumilin and D. S. Smirnov. Nuclear Spin Dynamics, Noise, Squeezing, and Entanglement in Box Model. *Phys. Rev. Lett.* 126, 216804 (2021).
4. M. A. Semina, A. A. Golovatenko, and A. V. Rodina. Influence of the spin-orbit split-off valence band on the hole g factor in semiconductor nanocrystals. *Phys. Rev. B* 104, 205423 (2021).
5. S. Anghel, A. V. Poshakinskiy, K. Schiller, F. Passmann, C. Ruppert, S. A. Tarasenko, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, and M. Betz. Anisotropic expansion of drifting spin helices in GaAs quantum wells. *Phys. Rev. B* 103, 035429 (2021).
6. O. S. Ken, E. A. Zhukov, I. A. Akimov, V. L. Korenev, N. E. Kopteva, I. V. Kalitukha, V. F. Sapega, A. D. Wieck, A. Ludwig, R. Schott, Yu. G. Kusrayev, D. R. Yakovlev, and M. Bayer. Effect of electric current on the optical orientation of interface electrons in AlGaAs/GaAs heterostructures. *Phys. Rev. B* 102, 045302 (2020).
7. J. C. Sandoval-Santana, V. G. Ibarra-Sierra, H. Carrère, M. M. Afanasiev, L. A. Bakaleinikov, V. K. Kalevich, E. L. Ivchenko, X. Marie, T. Amand, A. Balocchi, and A. Kunold. Electron-nucleus spin-correlation conservation of spin-dependent recombination in Ga^{2+} centers. *Phys. Rev. B* 101, 075201 (2020).
8. A. V. Poshakinskiy and S. A. Tarasenko. Spin noise at electron paramagnetic resonance. *Phys. Rev. B* 101, 075403 (2020).
9. S. V. Nekrasov, I. A. Akimov, Yu. G. Kusrayev, D. R. Yakovlev, and M. Bayer. Effect of nuclear quadrupole interaction on spin beats in photoluminescence polarization dynamics of charged excitons in $\text{InP}/(\text{In,Ga})\text{P}$ quantum dots. *Phys. Rev. B* 100, 235415 (2019).
10. N. V. Kozyrev, R. R. Akhmadullin, B. R. Namozov, Yu. G. Kusrayev, I. V. Sedova, S. V. Sorokin, and S. V. Ivanov. Multiple spin-flip Raman scattering in $\text{CdSe}/\text{ZnMnSe}$ quantum dots. *Phys. Rev. B* 99, 035301 (2019).
11. V. L. Korenev, I. V. Kalitukha, I. A. Akimov, V. F. Sapega, E. A. Zhukov, E. Kirstein, O. S. Ken, D. Kudlacik, G. Karczewski, M. Wiater, T. Wojtowicz, N. D. Ilyinskaya, N. M. Lebedeva, T. A. Komissarova, Yu. G. Kusrayev, D. R. Yakovlev, and M. Bayer. Low voltage control of exchange coupling in a ferromagnet-semiconductor quantum well hybrid structure. *Nat. Comm.* 10 2899 (2019).
12. N. E. Khokhlov, P. I. Gerevenkov, L. A. Shelukhin, A. V. Azovtsev, N. A. Pertsev, M. Wang, A. W. Rushforth, A. V. Scherbakov, and A. M. Kalashnikova. Optical Excitation of Propagating Magnetostatic Waves in an Epitaxial Gallenol Film by Ultrafast Magnetic Anisotropy Change. *Phys. Rev. Applied* 12, 044044 (2019).
13. E. V. Edinach, Y. A. Uspenskaya, A. S. Gurin, R. A. Babunts, H. R. Asatryan, N. G. Romanov, A. G. Badalyan, and P. G. Baranov. Electronic structure of non-Kramers Tb^{3+} centers in garnet crystals and evidence of their energy and spin transfer to Ce^{3+} emitters. *Phys. Rev. B* 100, 104435 (2019).

14. E. A. Zhukov, Yu. G. Kusrayev, E. Kirstein, A. Thomann, M. Salewski, N. V. Kozyrev, D. R. Yakovlev, and M. Bayer. Optical orientation of acceptor-bound hole magnetic polarons in bulk (Cd,Mn)Te. *Phys. Rev. B* 99, 115204 (2019).
15. M. O. Nestoklon, S. V. Goupalov, R. I. Dzhioev, O. S. Ken, V. L. Korenev, Yu. G. Kusrayev, V. F. Sapega, C. de Weerd, L. Gomez, T. Gregorkiewicz, Junhao Lin, Kazutomo Suenaga, Yasufumi Fujiwara, L. B. Matyushkin, and I. N. Yassievich. Optical orientation and alignment of excitons in ensembles of inorganic perovskite nanocrystals. *Phys. Rev. B* 97, 235304 (2018).