

Отзыв

Официального оппонента **Кулика Леонида Викторовича**, доктора физико-математических наук, профессора РАН, ведущего научного сотрудника Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики твердого тела имени Ю. А.

Осипьяна Российской академии наук на диссертационную работу

Белых Василия Валерьевича

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

В работе Белых В. В. представлено исследование спиновой динамики в различных полупроводниковых структурах на основе GaAs, а также в редкоземельных ионах, встроенных в решетку YAG. Исследования проведены, в основном, с использованием оригинальных методов, разработанных автором.

Актуальность тематики диссертация связана с активным использованием твердотельных систем, в том числе, полупроводниковых наноструктур, в современной оптоэлектронике. При этом большой и не исчерпанный потенциал представляет использование спиновых состояний электронов, которые могут обладать достаточно большим временем релаксации и которыми можно управлять с помощью оптических импульсов. Также, несмотря на активное исследование спиновой физики твердотельных систем на протяжении более полувека, ряд вопросов, связанных со спиновой релаксацией, оставался не исследованным до недавнего времени, что было связано с ограниченным арсеналом экспериментальных методов.

В диссертации Белых В. В. решаются задачи разработки оптических методов исследования спиновой динамики в широком временном диапазоне с высоким временным разрешением, измерения времени спиновой когерентности T_2 , которое затруднено при работе с большим спиновым ансамблем, и определения времени продольной спиновой релаксации T_1 для различных спиновых состояний, присутствующих в исследуемой системе. Также в работе исследуются фундаментальные вопросы, связанные со спиновой релаксацией и спиновой когерентностью в объемном GaAs, квантовых ямах и квантовых точках на основе GaAs, а также в системе с локализованными электронами в ионах церия.

По своей структуре диссертация Белых В. В. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Во **введении** описана актуальность данного направления исследования, перечислены решаемые задачи, сформулированы основные результаты, по-

лученные в работе, обоснована их достоверность, новизна, теоретическая и практическая значимость, апробация, также описан личный вклад автора.

Первая глава диссертации посвящена обзору литературы в отношении основных эффектов и методов спиновой физики. Данная глава полезна для понимания эффектов, которые обсуждаются в дальнейших пяти главах диссертации.

Во **второй** главе приведено исчерпывающее исследование изменения характера спиновой динамики при переходе металл-изолятор при исследовании объемных образцов GaAs с различными концентрациями доноров, а также при делокализации электронов посредством увеличения температуры. Исследования проводились, в основном, при гелиевых температурах в зависимости от величины и направления внешнего магнитного поля. Следует особо отметить модификацию метода накачки-зондирования, описанную в данной главе, которая позволила проводить исследования спиновой динамики практически в неограниченном временном диапазоне с высоким временным разрешением. Среди полученных в этой главе результатов также стоит отметить обнаружение проявления эффекта слабой локализации в спиновой динамике. Ранее данный эффект проявлялся лишь при измерении магнетосопротивления.

Третья глава посвящена изучению наноструктур на основе GaAs. В ней рассказано об исследовании долгоживущей спиновой прецессии и продольной спиновой релаксации в квантовых ямах с высокоподвижным электронным газом. Здесь обнаружен интересный режим в поведении времени продольной спиновой релаксации с увеличением магнитного поля и температуры, который, возможно, связан с аномальной диффузией в электронном газе. Также в этой главе представлены новые данные об эффекте синхронизации спиновых мод в системе квантовых точек: получен спектр спиновой прецессии данной системы после ее периодического возбуждения. Показано, что сверхтонкое взаимодействие с ядерными спинами ускоряет формирование периодической модовой структуры.

Четвертая глава посвящена методическим вопросам: созданию метода исследования спиновой динамики с использованием РЧ поля и оптических импульсов. Предложенный метод продемонстрирован на объемном GaAs. Показано, что с его помощью можно определить все важные параметры спиновой динамики, включая время спиновой когерентности.

Особо следует выделить **пятую** главу, в которой предложен довольно оригинальный и простой в реализации метод определения времени спиновой когерентности, основанный на периодической оптической накачке спиновой системе и приложении к ней РЧ поля. Как показано в диссертации, комбинация оптического и РЧ излучения позволяют наблюдать спиновой резонанс, ширина которого определяется временем спиновой коге-

рентности присущим отдельному спину, а не разбросом частот спинового ансамбля, как для обычного ЭПР. Данное новшество позволило измерить спиновый резонанс шириной около 100 Гц в ионах Се в решетке YAG, что соответствует времени T_2 в несколько миллисекунд, что довольно много для твердотельных систем.

Шестая глава посвящена измерению времени продольной спиновой релаксации T_1 в системах, где одновременно наблюдается несколько спиновых резонансов. Эта проблема была решена также с помощью достаточно простой оригинальной экспериментальной схемы, в которой спиновая система накачивается оптически и к ней прикладывается РЧ поле с амплитудной модуляцией. Приведено достаточно подробное обоснование данного метода. Он применен к системе ионов Се, которая исследовалась в предыдущей главе, где была обнаружена сильная зависимость времени T_1 от направления магнитного поля. После данной главы следует **заключение**, где приведены основные выводы по диссертации.

Диссертационная работа Белых В. В. является завершенным научным исследованием. Представленные в работе результаты являются новыми и представляют значительную научную и практическую значимость. Они докладывались на ведущих международных конференциях и опубликованы в 17 статьях в высокорейтинговых изданиях, входящих в основные международные и российские публикационные базы и перечень ВАК. Основные выводы данной диссертации подробно обоснованы и их достоверность не вызывает сомнений. Автореферат полно и достоверно отражает содержание самой диссертации.

Стоит отметить следующие замечания по диссертации Белых В. В.

1) «Фазовая диаграмма» на странице 9 не является реальной фазовой диаграммой, а представляет собой иллюстрацию научного прогресса в понимании свойств совершенно различных по своим «фазовым» характеристикам магнитных систем. Кроме того, данная иллюстрация, хоть и является, в целом, корректной, слишком сложна для понимания неспециалисту в области исследования динамики релаксации спина.

2) В главе 3 автор подробно останавливается на одночастичных механизмах продольной релаксации спина и осцилляциях времени продольной релаксации в магнитном поле. Одновременно автор экспериментально обнаруживает магнитоосцилляции времени поперечной релаксации, которые нельзя объяснить в рамках одночастичных моделей. Возможные многочастичные механизмы этого явления не обсуждаются, и ссылка на соответствующую теоретическую работу не дается. Следует отметить, что подробное теоретическое рассмотрение времени поперечной релаксации спина при нечетных факторах заполнения дается в работе S. Dickmann, J. Phys.: Condens. Matter 32 (2020) 015603.

3) Метод определения времени спиновой когерентности, изложенный в главе 5, как и другие методы исследования, представленные в данной диссертации, применялись автором при низких температурах. При этом для общего обзора, например, в заключении, хотелось бы увидеть упоминание систем, в которых время спиновой когерентности может быть большим при комнатной температуре, если такие системы существуют, и могут ли представленные методы быть применены к этим системам.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на их достоверность, а также не снижают общей положительной оценки диссертации.

Диссертационная работа «Когерентная спектроскопия долгоживущей электронной спиновой динамики в твердотельных системах» Белых В. В. удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., а автор диссертации, Белых Василий Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.8 - физика конденсированного состояния.

Кулик Леонид Викторович

доктор физ.-мат. наук, профессор РАН,

ведущий научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Института физики твердого тела имени Ю. А. Осипьяна

Российской академии наук

г. Черноголовка, Московская обл.,

ул. Академика Осипьяна д. 2

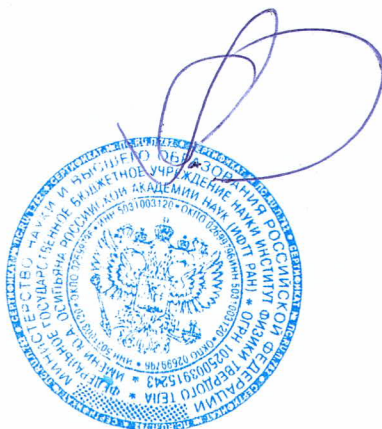
тел. +7 (496) 522-44-18.

email: kulik@issp.ac.ru

06.07.2022

Подпись Кулика Л.В. заверяю,

**УЧЁНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
ИФТТ РАН
ТЕРЕЩЕНКО А.Н.**



Список основных работ Кулика Леонида Викторовича по тематике защищаемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, L. I. Musina, E. I. Belozero, A. B. Van'kov, O. V. Volkov, A. A. Zagitova, I. V. Kukushkin, and V. Y. Umansky. Laughlin anyon complexes with Bose properties. *Nat. Commun.* 12, 6477 (2021).
2. E. Stepanets-Khussein, L.I. Musina, A.V. Larionov, A.S. Zhuravlev, I.V. Kukushkin, L.V.Kulik. Nonexponential decoherence of collective spin states in 2DES probed by time-resolved Kerr rotation. *Solid State Commun.* 336, 114285 (2021).
3. A. S. Zhuravlev, L. V. Kulik, L. I. Musina, E. I. Belozero, A. A. Zagitova, and I. V. Kukushkin. Resonant Light Reflection in the $1/3$ Laughlin State. *JETP Letters*, 114, 412 (2021).
4. A. V. Larionov, E. Stepanets-Khussein, L. V. Kulik, V. Umansky, and I. V. Kukushkin. Investigation of spin stiffness in spin-depolarized states of two-dimensional electron systems with time-resolved Kerr rotation. *Sci. Rep.* 10, 2270 (2020).
5. L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, V. Umansky, and I. V. Kukushkin. Local incompressibility of fractional quantum Hall states at a filling factor of $3/2$. *Phys. Rev. Research* 2, 033123 (2020).
6. L. V. Kulik, A. S. Zhuravlev, E. I. Belozero, V. A. Kuznetsov, and I. V. Kukushkin, Resonant Photoluminescence of a Two-Dimensional Electron System upon the Formation of a Bulk $1/3$ State of the Fractional Hall Effect. *JETP Letters*, 112, 485 (2020).
7. S. Dickmann, L. V. Kulik, and V. A. Kuznetsov. Coherence-decoherence transition in a spin-magnetoexcitonic ensemble in a quantum Hall system. *Phys. Rev. B* 100, 155304 (2019).
8. Л.В. Кулик, А.В. Горбунов, С.М. Дикман, В.Б. Тимофеев. Спиновые возбуждения в двумерном электронном газе, их релаксация, методы фотовозбуждения и детектирования, роль кулоновских корреляций. *УФН* 189 925–954 (2019).
9. L. V. Kulik, A. V. Gorbunov, A. S. Zhuravlev, V. A. Kuznetsov, and I. V. Kukushkin. Spin transport in the bulk of two-dimensional Hall insulator. *Appl. Phys. Lett.* 114, 062403 (2019).
10. L. V. Kulik, V. A. Kuznetsov, A. S. Zhuravlev, A. V. Gorbunov, V. V. Solovyev, V. B. Timofeev, I. V. Kukushkin, S. Schmelt. *Sci. Rep.* 8, 10948 (2018).