

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА ФТИ 34.01.02 ПРИ ФЕДЕРАЛЬНОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ БЮДЖЕТНОМ УЧРЕЖДЕНИИ
НАУКИ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ ИНСТИТУТЕ ИМ. А.Ф. ИОФФЕ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ
УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 19.06.2025 № 8

О присуждении Козыреву Николаю Владимировичу, гражданину РФ, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Спиновая и энергетическая динамика носителей заряда и магнитных ионов марганца в квантовых ямах на основе разбавленного магнитного полупроводника (Cd,Mn)Te» по специальности 1.3.11. Физика полупроводников принята к защите «27» марта 2025 г., протокол №5, диссертационным советом 34.01.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, утверждённым 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе №75.

Соискатель Козырев Николай Владимирович, 16 марта 1992 года рождения, в 2009 году поступил в Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» и окончил в 2013 году бакалавриат по направлению «Физика». В 2015 году окончил магистратуру в Федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской академии наук» по направлению «Электроника и наноэлектроника». В 2019 году окончил аспирантуру в федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук» (Ioffe Institute), где ему была присвоена квалификация «Исследователь. Преподаватель-исследователь» по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия». В феврале 2013 года принят на работу в ФТИ им. А.Ф. Иоффе, в лабораторию оптики полупроводников. С 2015 года по настоящее время работает научным сотрудником в лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках.

Диссертационная работа выполнена в ФГБУН Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26.

Научный руководитель – Кусраев Юрий Георгиевич

доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией спиновых и оптических явлений в полупроводниках ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Официальные оппоненты:

1. **Максимов Андрей Анатольевич**, кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории неравновесных электронных процессов Института физики твёрдого тела РАН (г. Черноголовка), дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 6 замечаний:

1. Не указана величина магнитного поля в подписи к Рис. 3.6.
2. В начале раздела 5.1.1 смысловая ошибка: написано, что фотолюминесценция из магнитной квантовой ямы не наблюдается в связи «с быстрым туннелированием фотовозбуждённых носителей заряда из немагнитной КЯ в яму из РМП», хотя туннелирование носителей идёт в обратном направлении.
3. Замечание общего характера: в последнее время в русскоязычной научной литературе часто употребляется термин «рамановское рассеяние», хотя, особенно учитывая историю открытия этого эффекта, на мой взгляд, более справедливо употреблять термин «комбинационное рассеяние света».
4. Действительно, задача количественного описания зависимости от величины магнитного поля экситонного магнитополяронного сдвига является очень непростой. Даже в пионерской работе (ссылка [31] в диссертации), в которой была разработана используемая автором теоретическая модель для такого описания, сравнение с экспериментальными данными было далеко не идеальное, однако заметно лучше, чем представленное на рис. 3.10 (обычно максимальный поляронный сдвиг наблюдается в полях несколько меньших, чем удвоенное магнитное поле магнитного полярона). Это может быть связано, помимо сложностей, которые обсуждает автор, с недостаточно точным определением параметров, в частности величины обменного поля дырки, самого магнитного полярона, реализующегося в исследуемом образце. Для его определения необходимо с высокой точностью измерить наклон зависимости спинового расщепления носителей в малых магнитных полях в геометрии Фарадея. Это лучше делать по экситонным особенностям в σ^+ и σ^- поляризациях в спектрах отражения, а не по зависимостям сдвига трионной люминесценции, представленным на рис. 3.5, поскольку на них самих может влиять обменное поле дырки магнитного полярона. Кроме того, необходимо в таких же условиях тщательно измерить наклон зависимости степени циркулярной поляризации люминесценции, а эти экспериментальные данные, к сожалению, не приведены в диссертации, что не позволяет определить точность оценки величины обменного поля магнитного полярона ~ 0.8 Тл, использованного в расчётах для сравнения с экспериментом.
5. При обсуждении магнитополяронных сдвигов локализованных трионов, учитывая сложную пространственную структуру и сложные динамические процессы, происходящие при образовании трионного магнитного полярона, хотелось бы также, чтобы автор более подробно обсудил роль в них синглетных трионов. Резидентная дырка, действительно, может создавать магнитный полярон в равновесных условиях, но время жизни и время образования трионного магнитного полярона вполне могут быть одного порядка. Кроме того, величина оценённого в этом разделе обменного поля ~ 3.7 Тл лишний раз подчёркивает сложность определения параметров магнитного полярона с использованием сдвига трионной люминесценции в магнитном поле.
6. На рисунке 5.5 диссертации приведены экспериментальные зависимости доли проникновения волновой функции электронов η , локализованных в немагнитной квантовой яме CdTe, в яму из полумагнитного полупроводника (Cd,Mn)Te от толщины барьера между ними. Полезно сравнить эти значения с непосредственно рассчитанными значениями η , тем более что выполнить такие расчёты, по крайней мере для резидентных электронов, решив стационарное уравнение Шрёдингера для электронов в известном потенциале, было бы нетрудно.

В отзыве отмечено, что данные замечания не снижают общую положительную

оценку диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне и обладающей несомненной новизной.

2. **Тарасенко Сергей Анатольевич**, доктор физико-математических наук, профессор РАН, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник, заведующий сектором теории квантовых когерентных явлений в твердом теле ФТИ им. А. Ф. Иоффе, дал положительный отзыв на диссертацию.

В отзыве содержится 3 замечания:

1. На рис. 3.7 представлена зависимость сдвигов полос экситонной и трионной фотолюминесценции от энергии возбуждения в поперечном магнитном поле, на основе которой сделан вывод о формировании магнитных поляронов. Было бы полезно привести для сравнения аналогичную зависимость для продольного магнитного поля.
2. Количественный анализ перенормировки электронного g -фактора в разделе 5.2 позволил определить туннельное проникновение электронов из немагнитной ямы в близко расположенную магнитную яму. Было бы полезно оценить реалистичность этих значений для известных зонных параметров и профиля гетероструктуры.
3. Имеются некоторые несогласованности и неточности в теоретических формулах. В частности, гамильтониан обменного взаимодействия в разбавленных магнитных полупроводниках [формулы (1.1) и (1.2)] отличается от обычно используемого в литературе знаком «-», см. например, книгу Spin Physics in Semiconductors, Ed. M.I. Dyakonov (Springer, 2008). В формуле (1.12) для среднего спина ионов марганца в магнитном поле пропущен знак «-».

В отзыве сказано, что указанные замечания носят главным образом рекомендательный характер и не влияют на общую, положительную, оценку диссертации, выполненной на высоком научном уровне и вносящей вклад в развитие современной физики полупроводников.

Ведущая организация - Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет имени Ж. И. Алфёрова Российской академии наук» предоставила положительный отзыв на диссертацию. Отзыв подготовлен профессором, заведующим кафедрой микро- и наноматериалов СПбАУ им. Ж. И. Алфёрова, доктором физико-математических наук Липовским Андреем Александровичем и утвержден проректором по науке СПбАУ им. Ж. И. Алфёрова доктором физико-математических наук Мухиным Иваном Сергеевичем. В заключении указано, что диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой полностью отражены актуальность темы исследования, достоверность и обоснованность полученных результатов и выводов. Также указано, что значимость и научный уровень полученных результатов в представленной работе полностью удовлетворяют требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

В отзыве ведущей организации содержится 2 замечания:

1. К несущественным недостаткам работы можно отнести недостаточное обсуждение влияния температуры на магнитополяронный эффект.
2. Имело смысл указать, в какой степени приближение «обменного ящика» может повлиять на представленные расчётные результаты. В частности, не может ли более быстрый спад расчётных кривых по сравнению с экспериментальными на рисунке 3.10 быть связан с использованием модели «ящика», т.е. заменой истинной волновой функции на ее «прямоугольное» приближение?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обуславливался их высоким научным авторитетом, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. В ходе защиты на все замечания соискателем даны исчерпывающие ответы.

На автореферат поступило 6 отзывов:

1) **Отзыв д.ф.-м.н. Шамирзаева Тимура Сезгировича**, ведущего научного сотрудника лаборатории физики и технологии гетероструктур Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН (630090, г. Новосибирск, пр. ак. Лаврентьева, 13).

Отзыв положительный, без замечаний.

Отмечено, что, судя по автореферату, диссертация является актуальной и содержит элементы научной новизны. Работа соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям диссертационными советами ФТИ.

2) **Отзыв д.ф.-м.н. Вербина Сергея Юрьевича**, профессора кафедры физики твёрдого тела СПбГУ (198504, г. Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Ульяновская, 1).

Отзыв положительный, содержит 1 замечание:

Автор совершенно напрасно указал в выносимых на защиту положениях конкретные характеристики исследованной структуры и условия эксперимента. Эта информация безусловно нужная для раздела, где излагаются результаты работы, только ухудшает представление о ценности выносимых на защиту положений, поскольку их значимость оказывается выглядящей необоснованно заниженной.

Отмечено, что сделанное замечание не снижает положительную оценку рассматриваемой диссертации, которую можно сделать на основании содержания ее автореферата. Диссертация соответствует всем критериям, предъявляемым диссертационными советами ФТИ.

3) **Отзыв PhD физики Кузнецовой Марии Сергеевны**, старшего научного сотрудника исследовательской лаборатории оптики спина им. И. Н. Уральцева СПбГУ (198504, г. Санкт-Петербург, г. Петергоф, ул. Ульяновская, 1).

Отзыв положительный, содержит 1 замечание:

В пятой главе описано определение компонент g -факторов исследуемой структуры. На рис. 5 определены g -факторы для короткой и длинной компонент сигнала эффекта Керра для 11 монослоев, $g_1=1.6$, $g_2=1.62$. При этом на Рис. 6 g_2 и g_1 для 11 монослоев имеют одинаковое значение. Вероятно, это опечатка.

В отзыве указано, что автореферат хорошо структурирован, содержит чёткое изложение целей, задач, методов и результатов исследования. Согласно автореферату, диссертационная работа представляет собой полноценное исследование, выполненное на

высоком научном уровне, и отвечает всем требованиям, предъявляемым диссертационными советами ФТИ.

4) **Отзыв д.ф.-м.н. Резницкого Александра Наумовича**, ведущего научного сотрудника лаборатории спектроскопии твёрдого тела ФТИ им. А. Ф. Иоффе (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26).

Отзыв положительный, содержит 1 замечание:

К автореферату можно высказать общее техническое замечание: поскольку рисунки, приведенные в автореферате, выполнены в цвете, то, чтобы свести к минимуму возможную потерю информации из-за качества цветопередачи, цветные линии на рисунках и в подписях к ним необходимо также обозначать, используя, помимо цвета, цифры, символы или разные типы линий для каждого цвета. Особенно важна эта рекомендация применительно к результатам, приведенным в автореферате на Рис.1(с) и Рис.2(а), которые практически не читаются, если показанные на рисунках кривые различаются только цветом.

В отзыве сказано, что это замечание не влияет на высокую оценку представленной работы и что диссертация отвечает всем требованиям, предъявляемым диссертационными советами ФТИ.

5) **Отзыв к.ф.-м.н. Минтаирова Александра Миссавировича**, старшего научного сотрудника лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе РАН (194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26).

Отзыв положительный, без замечаний. В отзыве сказано о ясности и чёткости изложения автореферата, о высоком научном уровне проведённых исследований, сочетающих сложные измерительные оптические методики с глубоким теоретическим анализом полученных результатов. Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым диссертационными советами ФТИ.

6) **Отзыв к.ф.-м.н. Ведя Михаила Владиславовича**, научного сотрудника лаборатории спиновой и оптической электроники отдела твёрдотельной электроники и оптоэлектроники НГУ им. Н. И. Лобачевского, и **д.ф.-м.н. Дорохина Михаила Владимировича**, доцента, заведующего лабораторией спиновой и оптической электроники отдела твёрдотельной электроники и оптоэлектроники НГУ им. Н. И. Лобачевского (603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 2).

Отзыв положительный, без замечаний. В отзыве отмечено, что диссертационная работа является цельным научным трудом с оригинальными результатами, соответствующими мировому уровню, и соответствует критериям, предъявляемым к диссертационным работам диссертационными советами ФТИ.

Публикации. Личный вклад автора.

Все приведенные в тексте диссертации результаты были получены автором самостоятельно или при его непосредственном участии. Выбор темы и общего направления исследования, обсуждение и постановка задач осуществлялись совместно с научным руководителем. Результаты диссертационного исследования докладывались на следующих российских и международных конференциях:

1. 34 International Conference on the Physics of Semiconductors (ICPS), (Монпелье, Франция, 2018 г). **N. V. Kozyrev**, E. Kirstein, M. Salewski, E. A. Zhukov, V. K. Kalevich, M. M. Afanasiev, K. V. Kavokin, G. Karczewski, D. R. Yakovlev, Yu. G. Kusrayev, and M. Bayer. Optically induced Mn²⁺ spin dynamics and proximity effect in double (Cd,Mn)Te quantum well structures.

2. 17 International Conference on Optics of Excitons in Confined Systems (OECS) (Дортмунд, Германия, 2021). **N. V. Kozyrev**, R. R. Akhmadullin, B. R. Namozov, Yu. G. Kusrayev, G. Karczewski, and T. Wojtowicz. The role of magnetic polarons in the formation of exciton and trion photoluminescence spectra.
3. XV Российская Конференция по Физике Полупроводников (Нижний Новгород, 2022). И. И. Козлов, **Н. В. Козырев**, Б. Р. Намозов и Ю. Г. Кусраев. Двойной резонанс в рамановском рассеянии света с испусканием оптического фонона в квантовых ямах (Cd,Mn)Te.

Основные результаты по теме диссертации были опубликованы в 4 статьях в рецензируемых научных журналах, индексируемых базами данных Web of Science и Scopus. Их список с описанием личного вклада соискателя приводится ниже:

1. **Kozyrev, N. V.**, Akhmadullin, R. R., Namozov, B. R., Kusrayev, Y. G., Karczewski, G., & Wojtowicz, T. (2021). Optical manifestation of magnetic polarons bound to excitons and resident holes in a (Cd, Mn) Te quantum well. *Physical Review B*, 104(4), 045307.
(Постановка и проведение эксперимента, обработка результатов, написание статьи)
2. **Kozyrev, N. V.**, Kozlov, I. I., Namozov, B. R., Golub, L. E., Glazov, M. M., Kusrayev, Y. G., & Wojtowicz, T. (2023). Double resonant Raman scattering and photoluminescence mediated by heavy and light hole excitons in a (Cd,Mn)Te quantum well in external magnetic field. *Physical Review B*, 108(24), 245306.
(Постановка и проведение эксперимента, обработка результатов, написание экспериментальной части статьи)
3. Kirstein, E., **Kozyrev, N. V.**, Afanasiev, M. M., Mantsevich, V. N., Krivenko, I. S., Kalevich, V. K., ... & Bayer, M. (2020). Short range proximity effect induced by exchange interaction in tunnel-coupled CdTe and (Cd,Mn)Te quantum wells. *Physical Review B*, 101(3), 035301.
(Участие в постановке и проведении эксперимента, обработка результатов, написание экспериментальной части статьи)
4. Afanasiev, M. M., **Kozyrev, N. V.**, Kirstein, E., Kalevich, V. K., Zhukov, E. A., Mantsevich, V. N., ... & Bayer, M. (2019, November). Electron g-factor in coupled quantum wells CdTe and CdMnTe. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1400, No. 6, p. 066023). IOP Publishing.
(Участие в постановке и проведении эксперимента, обработка результатов, написание части статьи)

Диссертационный совет отмечает, что рассмотренная диссертация является законченной работой, полученные соискателем результаты имеют как фундаментальное, так и прикладное значение, и на своем заседании 19 июня 2025 г. принял решение присудить Козыреву Николаю Владимировичу ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников.

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 19 человек из 23 членов совета, из них в заседании участвовали 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, очно проголосовали:

За присуждение Козыреву Николаю Владимировичу ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 16,

против – нет,
недействительных бюллетеней – нет,
не проголосовали – нет.

Из 3 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Козыреву Николаю Владимировичу ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:
«за» – 3,
«против» – нет,
«воздержались» – нет,
«не голосовали» – нет.

Итого: из 19 членов совета, участвовавших в очно-заочном голосовании,
«за»: 19
«против»: нет
«испорченных бюллетеней»: нет
«воздержались»: нет
«не проголосовали»: нет

Председатель диссертационного совета
д.ф.-м.н., академик РАН

Ивченко Еугениус Левович

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

Сорокин Лев Михайлович

19 июня 2025 г.