



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки
**Институт физики твердого тела
имени Ю.А. Осипьяна
Российской академии наук**
142432, Московская обл., г. Черноголовка,
ул. Академика Осипьяна, д. 2, ИФТТ РАН
Факс: +7 496 522 8160
E-mail: adm@issp.ac.ru
<http://www.issp.ac.ru>
ОКПО 02699796, ОГРН 1025003915243,
ИНН/КПП 5031003120/503101001

04.05.2016 № 28 - 02/2115 - 431

Диссертационный совет 24.1.262.01
ФГБУН Физический институт имени
П.Н.Лебедева Российской Академии наук
Ленинский проспект 53
119991 Москва ГСП-1

УТВЕРЖДАЮ»

ВРИО директора Федерального
государственного бюджетного учреждения
науки Института физики твёрдого тела им.
~~Ю.А. Осипьяна~~ Российской академии наук
(ИФТТ РАН)

~~доктор физ.-мат. наук, член-корр. РАН~~

Левченко А.А.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Мелякова Сергея Романовича «Когерентная спиновая динамика носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Мелякова С. Р. посвящена исследованию когерентной спиновой динамики носителей заряда и экситонов в нанокристаллах на основе новых полупроводников-свинцово-галлоидных перовскитов. Актуальность этой тематики обусловлена большими перспективами использования свинцово-галлоидных перовскитов в оптоэлектронных и спинтронных устройствах и квантовых технологиях (спиновые кубиты, квантовые источники и детекторы света). Исследования спиновой динамики в перовскитах позволяют определить основные характеристики спиновых состояний, таких как электронный и дырочный g-факторы, времена продольной спиновой релаксации и спиновой когерентности, которые важны не только с фундаментальной точки зрения для установления механизмов спиновой релаксации, получения информации об ядерной

подсистеме и сверхтонком взаимодействии электронов и дырок с ядерной подсистемой, но и с практической точки зрения для понимания возможности когерентного управления спиновыми состояниями. Несмотря на активное развитие этой области, многие вопросы остаются открытыми. В частности, весьма ограничены экспериментальные данные о влиянии размерного квантования в перовскитных нанокристаллах на когерентные свойства электронной и ядерной подсистем, исследованиям которых посвящена данная диссертация. Сложность исследования спиновой динамики в ансамбле нанокристаллов заключается в том, что время затухания прецессии спинового ансамбля в нем не совпадает с временем когерентности отдельного спина. Предложенная в работе методика позволила решить эту проблему. Результаты, полученные в данной работе, существенно продвигают фундаментальное понимание спиновых свойств и зонной структуры нанокристаллов свинцово-галогидных перовскитов и позволяют оценить их потенциал для применения в спинтронике и квантовых технологиях.

Представленная диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературных источников. Полный объем диссертации составляет 149 страниц, включая 43 рисунка, 1 таблицу и список литературы из 129 наименований.

Во введении описана актуальность выбранной темы, поставлены цели научного исследования и сформулированы задачи, основные полученные результаты и положения, выносимые на защиту.

В главе 1 представлен обзор имеющихся в литературе исследований свинцово-галогидных перовскитов. Описаны структуры их электронной и дырочной зон и экситонных состояний. Особое внимание уделено имеющимся в литературе экспериментальным и теоретическим исследованиям их спиновых свойств.

Во второй главе подробно описаны исследуемые образцы нанокристаллов свинцово-галогидных перовскитов CsPbBr_3 , CsPbI_3 и $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})$, а также предложенные и реализованные автором экспериментальные методы исследования спиновых свойств перовскитов по схеме накачка-зондирование.

В главе 3 представлены результаты экспериментального исследования когерентной спиновой динамики носителей заряда в коллоидных НК CsPbBr_3 и в НК CsPbBr_3 в стеклянной матрице на основании измерений динамики фарадеевского вращения или фарадеевской эллиптичности, позволяющей регистрировать спиновую прецессию электронов и дырок во внешнем магнитном поле. Было найдено, что определенные из измерений g -факторы, времена спиновой дефазировки и релаксации, а также их температурные зависимости в коллоидных НК и в НК в стеклянной матрице слабо отличаются друг от друга.

Глава 4 посвящена обсуждению измеренных зависимостей g -факторов носителей заряда и экситонов от размера и температуры в нанокристаллах CsPbI_3 и CsPbBr_3 . Найдено, наблюдаемое при гелиевой температуре уменьшение g -фактора электрона с уменьшением размера НК CsPbI_3 находит объяснение в рамках $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ модели, дополненной учетом геометрического ограничения, приводящего к увеличению подмешивания в нижнее состояние зоны проводимости спин-орбитально расщепленных электронных состояний. В то же время, экспериментально измеренные перенормировки g -фактора дырки и в CsPbI_3 , и в CsPbBr_3 гораздо сильнее, чем предсказывает эта модель при учете только ближайших валентных подзон. Обсуждаются возможные причины. Было найдено также, что

измеренные температурные зависимости g -факторов носителей заряда в нанокристаллах CsPbI_3 и CsPbBr_3 также не описываются в рамках существующей теории.

В Главе 5 исследовано влияние на спиновую динамику дырок в CsPbBr_3 и электронов в CsPbI_3 их взаимодействия с ядерной спиновой подсистемой. В рамках разработанной Меркуловым, Эфросом и Розеном модели автором проведен детальный анализ сверхтонкого взаимодействия носителей заряда с ядерной спиновой подсистемой, которое определяет спиновую дефазировку в слабых магнитных полях при криогенных температурах и является причиной спиновой прецессии электронов и дырок в нулевом внешнем магнитном поле. Показано, что основной вклад в сверхтонкое взаимодействие с дырками в CsPbBr_3 вносят ядра свинца, а с электронами в CsPbI_3 - ядра йода, определены характерные величины зеемановских расщеплений электронов и дырок в сверхтонких полях.

Глава 6 посвящена исследованию тонкой структуры светлого экситона в нанокристаллах CsPbI_3 . В измерениях пикосекундной динамики квантовых биений между различными состояниями светлого экситона образца со средним размером нанокристаллов размером 11 нм обнаружено три частоты, свидетельствующие об орторомбической симметрии кристаллической решётки нанокристаллов, и определены величины расщеплений светлого экситона в этих нанокристаллах. В образцах с меньшим размером нанокристаллов наблюдались только две частоты.

В заключении диссертации резюмируются основные полученные результаты.

В целом, в диссертации Мелякова С.Р. представлено комплексное исследование когерентной спиновой динамики носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галогенидных перовскитов НК CsPbBr_3 , $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ и CsPbI_3 , получен ряд **новых и значимых результатов**, среди которых можно выделить следующие

1. Изучено влияние размерного квантования и температуры на электронные, дырочные и экситонные g -факторы в нанокристаллах CsPbBr_3 и CsPbI_3 в стеклянной оболочке. Получены подробные зависимости этих g -факторов от эффективной ширины запрещенной зоны и температуры.
2. Обнаружено сильное уменьшение электронного g -фактора при уменьшении размера нанокристаллов и показано, что оно вызвано увеличением подмешивания в нижнее состояние зоны проводимости спин-орбитально расщепленных электронных состояний по мере возрастания геометрического ограничения.
3. Показано, что экспериментально измеренные перенормировки g -фактора дырки и в CsPbI_3 и в CsPbBr_3 гораздо сильнее, чем предсказывает дополненная учетом геометрического ограничения $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ модель, при включении только ближайших валентных подзон.
4. Исследовано влияние ядерных спиновых флуктуаций на спиновую дефазировку носителей заряда в свинцово-галогенидных перовскитах CsPbBr_3 и CsPbI_3 . Показано, что в CsPbBr_3 основной вклад в сверхтонкое взаимодействие с дырками вносят ядра свинца, и, что в CsPbI_3 основной вклад в сверхтонкое взаимодействие с электронами вносят ядра йода, определены характерные величины зеемановских расщеплений электронов и дырок в сверхтонких полях. Впервые получена оценка константы сверхтонкого взаимодействия электронов с ядрами йода - 190 мкэВ.
5. Предложено использовать метод накачка-зондирование с измерением фарадеевского вращения для определения тонкой структуры светлого экситона в ансамблях

перовскитных нанокристаллов, определены величины расщеплений светлого экситона в нанокристаллах CsPbI_3 в стеклянной оболочке со средним размером 11 нм.

Полученные в диссертации Мелякова С. Р. результаты имеют большую фундаментальную и практическую значимость и являются новыми. Они могут использоваться в следующих организациях: Институте физики твердого тела им. Ю.А. Осипьяна РАН, Физико-техническом институте им. А. Ф. Иоффе РАН, Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН, МГУ им. М.В.Ломоносова, 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 полупроводниковых систем.

В тоже время к работе имеются замечания.

1. В главе 6 автор исследует тонкую структуру светлого экситона в трех образцах CsPbI_3 #3, #4 и #5 со средним размером НК CsPbI_3 11, 9 и 6 нм, соответственно. Интерпретация тонкой структуры светлого экситона в НК в образце #3 со средним размером НК 11 нм, в котором автор, в полном соответствии с ожидаемой триплетной структурой экситона в орторомбических НК, наблюдает три частоты, $\hbar\Omega_3=0.27$ мэВ, $\hbar\Omega_2=0.51$ мэВ и $\hbar\Omega_1=0.83$ мэВ, отвечающие расщеплениям компонент $\delta_{xy}=E_y - E_x$, $\delta_{yz}=E_z - E_x$ и $\delta_{xz}=E_z - E_x$, удовлетворяющие условию $\hbar\Omega_2 + \hbar\Omega_3 \approx \hbar\Omega_1$, не вызывает сомнения. В образцах же #4 и #5 с меньшими размерами НК автор наблюдает только 2 компоненты: низкочастотную $\hbar\Omega_3$ и высокочастотную " $\hbar\Omega_1$ " $\approx 4\hbar\Omega_3$, которая проинтерпретирована как "смесь" компонент $\hbar\Omega_1$ и $\hbar\Omega_2$, не разрешающихся спектрально из-за сильной дефазировки. Такая интерпретация при разности $\hbar\Omega_1 - \hbar\Omega_2 \sim 25\%$ от " $\hbar\Omega_1$ " представляется весьма сомнительной. Экспериментальных кривых динамики фарадеевского вращения с квантовыми биениями с аппроксимацией их "смесью" не представлено. Кроме того, предложенной интерпретации также противоречит наблюдаемое на рис. 6.3 скачкообразное уменьшение $\hbar\Omega_3$ в 2 раза в области $E_L \sim 1.78$ эВ, монотонно увеличивающейся при E_L больше и меньше 1.78 эВ.
2. В работе использовано резонансное возбуждение нанокристаллов с определенным размером в неоднородных ансамблях перовскитных НК и их размер оценивается с использованием однозначной зависимости между шириной запрещенной зоны и размером НК. В описании образцов НК в стеклянной матрице приводятся спектральные зависимости амплитуд сигнала фарадеевской эллиптичности (ФЭ) и интенсивности фотолюминесценции (ФЛ). На рис 4.1 и 5.1 видно, что пик ФЭ в одних образцах находится на фиолетовой границе спектра ФЛ, в других посередине, а в образцах CsPbI_3 #2 и #5 на красной границе спектра ФЛ. Столь различное положение сигнала ФЭ относительно спектра ФЛ и, особенно, отсутствие сигнала ФЭ в области максимума излучения в образце #5 требует комментария. Желательно было бы спектры ФЭ сопоставить со спектрами поглощения.
3. В пункте научная новизна утверждается, что в коллоидных нанокристаллах свинцово-галогенидных перовскитов и в нанокристаллах в стеклянной оболочке "имеют место одинаковые g-факторы и их температурная зависимость", хотя количественное различие между измеренными g-факторами в коллоидных НК и в НК в стекле одного размера на рис. 4.9 составляет около 10 %.

Указанные замечания не подвергают сомнению научную значимость и достоверность результатов данной работы и не влияют на её положительную оценку.

Достоверность и обоснованность полученных в диссертации Мелякова С. Р. результатов основывается на использовании современного научного оборудования, применении хорошо зарекомендовавших себя методик, согласии экспериментальных результатов с известными теоретическими моделями. Следует отметить, что некоторые выводы были проверены и подтверждены сопоставлением результатов, полученных различными оптическими методами. Достоверность части результатов также подтверждается сопоставлением данных измерений с расчетами.

Полученные Меляковым С. Р. результаты прошли широкую апробацию. Они докладывались на ведущих международных и российских конференциях по физике полупроводников и спиновой физике. Результаты, представленные в диссертации опубликованы в 6 статьях в ведущих международных изданиях, входящих в базу данных Web of Science, в том числе в журналах Physical Review B, Nanoscale и Nanomaterials.

Диссертация Мелякова С. Р. на тему «Когерентная спиновая динамика носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов» является завершённым научным исследованием. Результаты и положения, выносимые на защиту, хорошо объяснены и полностью обоснованы. Автореферат соответствует содержанию и точно передаёт результаты данной диссертации. Диссертация отвечает всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г, а ее автор, Меляков Сергей Романович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния».

Доклад Мелякова С. Р. по материалам диссертации был заслушан и одобрен на научном семинаре по Оптической спектроскопии ИФТГ РАН 9 апреля 2026 г. Отзыв составлен руководителем семинара ИФТГ РАН по Оптической спектроскопии, главным научным сотрудником лаборатории неравновесных электронных процессов ИФТГ РАН, доктором физико-математических наук, членом-корреспондентом РАН Кулаковским Владимиром Дмитриевичем. Отзыв был одобрен на учёном совете ИФТГ РАН 27 апреля 2026 г.

Руководитель семинара ИФТГ РАН

по Оптической спектроскопии,

главный научный сотрудник

лаборатории неравновесных электронных

процессов ИФТГ РАН,

член-корреспондент РАН,

доктор физ.-мат. наук

тел., +7 (496) 52 226-91

kulakovs@issp.ac.ru

Кулаковский Владимир Дмитриевич

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твёрдого тела им. Ю.А. Осипьяна Российской академии наук (ИФТГ РАН),

Россия, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, 2

Тел.: +7 (496) 52 219-82

Сведения о ведущей организации

по диссертационной работе Мелякова С.Р.

«Когерентная спиновая динамика носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.3.8. – Физика конденсированного состояния

Полное наименование организации	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики твердого тела имени Ю.А. Осипьяна Российской академии наук
Сокращенное наименование организации	ИФТТ РАН
Ведомственная принадлежность	Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Почтовый адрес	142432, Московская обл., г. Черноголовка, ул. Академика Осипьяна, д. 2
Сайт в интернете	http://www.issp.ac.ru/main/index.php/ru/
Телефон	8(496) 52219-82 +7 906 095 4402
Факс	+7(496) 522 8160
Адрес электронной почты	adm@issp.ac.ru

Список основных публикаций сотрудников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет

1. E. [Nonexponential decoherence of collective spin states in 2DES probed by time-resolved Kerr rotation](#) / E. Stepanets-Khussein, L.I. Musina, A.V. Larionov, A.S. Zhuravlev, I.V. Kukushkin, L.V. Kulik // Solid State Communications. – 2021. – Vol. 336. – P. 114285 DOI [10.1016/j.ssc.2021.114285](https://doi.org/10.1016/j.ssc.2021.114285)
2. [Spin Transport in the Bulk of a Hall Dielectric](#) / A.V. Gorbunov, A.V. Larionov, L.V. Kulik, V.B. Timofeev // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. – 2023. – Vol. 87, Iss. 2. – P. 141–144. DOI [10.3103/S1062873822700812](https://doi.org/10.3103/S1062873822700812)
- 3/ [Investigation of spin stiffness in spin-depolarized states of two-dimensional electron systems with time-resolved Kerr rotation](#) / A.V. Larionov, E. Stepanets-Khussein, L.V. Kulik, V. Umansky, I.V. Kukushkin // Scientific Reports. – 2020. – Vol. 10, Iss. 1. – P. 2270. DOI [10.1038/s41598-020-58658-4](https://doi.org/10.1038/s41598-020-58658-4)
4. [Динамика спиновых экситон-поляритонных конденсатов в двойных потенциальных ловушках в GaAs/AlAs микрорезонаторе при резонансном пикосекундном возбуждении](#) / А.А. Деменев, С.Н. Терешко, Н.А. Гиппиус, В.Д.

Кулаковский // Известия РАН. Серия физическая. – 2025. – Т. 89, № 2. – С. 265–273. DOI [10.31857/S0367676525020184](https://doi.org/10.31857/S0367676525020184)

5. [Спиновый хаос экситонных поляритонов в магнитном поле](#) / С.С. Гаврилов, Н.Н. Ипатов, В.Д. Кулаковский // Письма в Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 2023. – Т. 118, № 9. – С. 649–655. DOI [10.31857/S1234567823210048](https://doi.org/10.31857/S1234567823210048)

6 [Ultrafast All-Optical Polarization Switch Controlled by Optically Excited Picosecond Acoustic Perturbation of Exciton Resonance in Planar Microcavities](#) / A.A. Demenev, D.D. Yaremkevich, A.V. Scherbakov, S.S. Gavrilov, D.R. Yakovlev, V.D. Kulakovskii, M. Bayer // Physical Review Applied. – 2022. – Vol. 18, Iss. 4. – P. 44045. DOI [10.1103/PhysRevApplied.18.044045](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.044045)


7/ [Circularly Polarized Laser Emission from an Electrically Pumped Chiral Microcavity](#) / A.A. Maksimov, E.V. Filatov, I.I. Tartakovskii, V.D. Kulakovskii, S.G. Tikhodeev, C. Schneider, S. Höfling // Physical Review Applied. – 2022. – Vol. 17, Iss. 2. – P. L021001 DOI [10.1103/PhysRevApplied.17.L021001](https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.17.L021001)

8. [Оптические исследования экситонных состояний в перовските CsPbBr₃](#) / С.Н. Терешко, А.А. Деменев, В.Д. Кулаковский // 6-я школа молодых ученых «Новые материалы и технологии для систем безопасности» : сб. тр. (4 – 5 июня 2024) / Черноголовка. – 2024. DOI [10.24412/cl-37210-NMTSS-6.11](https://doi.org/10.24412/cl-37210-NMTSS-6.11)

9 [Исследование возбужденных состояний экситонов в гетероструктурах с монослоями MoSe₂](#) / Г.М. Голышков, А.С. Бричкин, А.В. Черненко // Физика и Техника Полупроводников. – 2024. – Т. 58, № 5. – С. 233–237. DOI [10.61011/FTP.2024.05.58757.6339H](https://doi.org/10.61011/FTP.2024.05.58757.6339H) 

10/ [Polarization-resolved electron spin resonance in a two-dimensional electron system](#) / D.A. Khudaiberdiev, A. Shuvaev, A.V. Shchepetilnikov, V.M. Muravev, M.M. Glazov, C. Reichl, W. Wegscheider, A. Pimenov, I.V. Kukushkin // Physical Review B. – 2025. – Vol. 112, Iss. 16. – P. L161401 DOI [10.1103/4lyv-jvq5](https://doi.org/10.1103/4lyv-jvq5)

11. [Purcell effect for cyclotron resonance in a two-dimensional electron system](#) / V.M. Muravev, I.V. Andreev, N.D. Semenov, I.V. Kukushkin, V. Umansky // Physical Review B. – 2025. – Vol. 111. – P. 155431 DOI [10.1103/PhysRevB.111.155431](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.111.155431)

12 [Электронный спиновый резонанс в двумерных электронных системах](#) / А.В. Щепетильников, И.В. Кукушкин // Успехи Физических Наук. – 2025. – Т. 195, № 1. – С. 34–49. DOI [10.3367/UFNr.2023.12.039626](https://doi.org/10.3367/UFNr.2023.12.039626) 

«Верно»

Ученый секретарь ИФТТ РАН

Терешенко А.Н.

«30» апреля 2026 г.