

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук **Коренева Владимира**

Львовича на диссертацию

Мелякова Сергея Романовича

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

В диссертации Мелякова С.Р. представлено исследование когерентной спиновой динамики носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов с использованием методов когерентной спектроскопии с пикосекундным и фемтосекундным временным разрешением. Полупроводники на основе свинцово-галлоидных перовскитов недавно привлекли внимание благодаря своим выдающимся фотовольтаическим и оптоэлектронными свойствам. Большой интерес в последние несколько лет также представляют их спиновые свойства, которые могут быть использованы для создания устройств спинтроники, квантовых источников света и полупроводниковых спиновых кубитов. Зонная структура перовскитов значительно отличается от зонной структуры привычных для спиновой физики II-VI и III-V полупроводников, что даёт возможность наблюдать новые эффекты и воспроизводить старые в новой модельной ситуации. Наличие центра инверсии и простая зонная структура позволяют ожидать долгие времена спиновой когерентности и релаксации в свинцово-галлоидных перовскитах. Однако спиновая физика данных материалов находится на начальных ступенях развития, что и определяет **актуальность** выбранной темы. Целью данной работы является исследование спиновой динамики носителей заряда, их взаимодействия с ядерной спиновой системой, а также когерентной динамики экситонов и их тонкой структуры. Особое внимание уделено влиянию локализации и температуры на спиновые свойства носителей заряда и экситонов.

Диссертация состоит из **введения, шести глав, заключения и списка литературы**. Полный объём составляет 149 страниц, включая 43 рисунка, 1 таблицу и 129 наименований в списке литературы. Во **введении** обозначена актуальность темы исследования, поставлены цели работы, перечислены решаемые задачи, сформулированы новые результаты и положения, выносимые на защиту, обоснованы достоверность и их теоретическая и

практическая значимость. В **первой главе** выполнен литературный обзор, охватывающий основные достижения спиновой физики свинцово-галлоидных перовскитов.

Вторая глава посвящена методологии данного исследования. Представлены подробные описания использованных методик (накачка-зондирование с детектированием фарадеевского вращения или эллиптичности, дифференциальное пропускание с поляризационным разрешением и без него) и исследуемых образцов (нанокристаллы CsPbBr_3 , $\text{CsPb}(\text{Cl},\text{Br})_3$ и CsPbI_3).

Третья глава посвящена спиновой когерентности носителей заряда в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов, которые в зависимости от состава, температуры и метода синтеза могут быть отрицательно, положительно или нейтрально заряженными. Из временной динамики фарадеевского вращения (эллиптичности) в поперечном магнитном поле автором определены g -факторы электронов и дырок и времена спиновой дефазировки. Показано, что когерентная спиновая прецессия наблюдается при комнатной температуре, а времена спиновой дефазировки слабо зависят от температуры, что свидетельствует о подавлении механизмов спиновой релаксации в данных системах.

Четвёртая глава посвящена измерению g -факторов носителей заряда в нанокристаллах различного размера. g -факторы электронов и дырок испытывают сильную перенормировку с уменьшением размера нанокристаллов: электронный g -фактор уменьшается, а дырочный – увеличивается. Эти зависимости были получены для нанокристаллов CsPbI_3 , а затем проверены для CsPbBr_3 . Количественное сравнение экспериментальных результатов с численным расчётом, позволяет сказать, что изменение электронного g -фактора обусловлено смещением различных состояний внутри зоны проводимости. Зависимость дырочного g -фактора от размера нанокристаллов не описывается в рамках существующих теоретических моделей.

В **пятой главе** исследуется влияние ядерных спинов на когерентную спиновую динамику электронов и дырок. Впервые обнаружена электронная и дырочная спиновые прецессии в флуктуирующих сверхтонких ядерных полях. Частота такой прецессии соответствует зеемановскому расщеплению в несколько мкэВ для дырки и порядка одного мкэВ для электрона. Для зоны проводимости перовскитных полупроводников впервые показано, что основной вклад в сверхтонкое взаимодействие вносят ядра галогена. Была

оценена константа сверхтонкого взаимодействия электрона с ядром атома йода, которая составляет 190 мкэВ.

В **шестой главе** исследована когерентная динамика квантовых биений тонкой структуры светлого экситона в нанокристаллах CsPbI₃, которая происходит на временном масштабе порядка нескольких пс. В экспериментальных динамиках присутствуют три частоты, соответствующие расщеплению триплетного состояния светлого экситона. Впервые были разрешены все три расщепления в измерениях для ансамбля нанокристаллов. Показано, что размерное квантование и температура могут сильно модифицировать тонкую структуру светлого экситона.

В **заключении** кратко перечислены главные результаты работы.

Перечисленные выше результаты обладают **новизной и теоретической значимостью**.

Среди недостатков данной работы хотелось бы отметить следующее:

1. Не объяснено, чем определяются спиновая релаксация и дефазировка в свинцово-галлоидных перовскитах при комнатной температуре. Также в работе отсутствует сравнение с GaAs, где при комнатной температуре времена спиновой релаксации составляют несколько десятков пикосекунд.

2. При исследовании взаимодействия носителей заряда с ядерной спиновой подсистемой не уделено внимание эффекту динамической ядерной поляризации, который обычно является сильным в свинцово-галлоидных перовскитах.

3. Автор не сравнивает измеренные расщепления тонкой структуры светлого экситона со значениями, которые были получены для нанокристаллов CsPbI₃ из оптического выстраивания и ориентации во внешнем магнитном поле.

Несмотря на замечания, оценка работы остаётся положительной. Диссертация Мелякова С.Р. представляет собой полноценное исследование спиновых свойств новой полупроводниковой системы – свинцово-галлоидных перовскитов. Автор использует известные методики, реализованные с помощью современного экспериментального оборудования. Материалы данной диссертации корректно соотносятся с представленными в литературе теоретическими и экспериментальными результатами. Перечисленные факты указывают на **достоверность и обоснованность** результатов диссертации. Результаты диссертации подтверждают положения, выносимые на защиту. Диссертация выполнена на высоком уровне и соответствует специальности 1.3.8 – Физика конденсированного

состояния. По материалам диссертации выпущено шесть публикаций в изданиях, индексируемых международными базами (Web of Science, Scopus) и рекомендованных ВАК. Автореферат корректно передаёт содержание данной диссертации.

Диссертация Мелякова Сергея Романовича «Когерентная спиновая динамика носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов» является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям к кандидатским диссертациям, установленным Положением о присуждении учёных степеней, утверждённым постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а её автор – Меляков Сергей Романович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - Физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории спиновых и оптических явлений в полупроводниках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

Коренев Владимир Львович

09 апреля 2026

Федеральное государственное бюджетное учреждение

Физико-технический институт

им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук

194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26

тел. +7 812 292 73 96

Email: spinorient@gmail.com

Подпись Коренева Владимира Львовича заверяю,

учёный секретарь Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук, кандидат физико-математических наук

Патров Михаил Иванович

Список основных публикаций официального оппонента, доктора физико-математических наук, профессора Коренева В.Л. по тематике диссертации Мелякова С.Р. «Когерентная спиновая динамика носителей заряда и экситонов в нанокристаллах свинцово-галлоидных перовскитов» за последние 5 лет:

1. Greilich A, Kopteva N. E., Kamenskii A.N., Korenev V. L., Haude P. A. and Bayer M. Exploring nonlinear dynamics in periodically driven time crystal from synchronization to chaotic motion //Nature Communications. – 2025. – Т. 16. – №. 1. – С. 2936.
2. Greilich A., Kopteva N. E., Kamenskii A. N., Sokolov P. S., Korenev V. L. and Bayer M. Robust continuous time crystal in an electron–nuclear spin system //Nature Physics. – 2024. – Т. 20. – №. 4. – С. 631-636.
3. Yalcin E., Kalitukha I. V., Akimov I. A., Korenev V. L., Ken O. S., Puebla J., Otani Y., Hutchings O. M., Gillard D. J., Tartakovskii A. I. and Bayer M. Spin relaxation of localized electrons in monolayer MoSe 2: Importance of random effective magnetic fields //Physical Review B. – 2024. – Т. 110. – №. 16. – С. L161405.
4. Rozhansky I. V., Kalitukha I. V., Dimitriev G. S., Ken O. S., Dorokhin M. V., Zvonkov B. N., Arteev D. S., Averkiev N. S. and Korenev V. L.. Optically Induced Spin Electromotive Force in a Ferromagnetic–Semiconductor Quantum Well Structure //Nano Letters. – 2023. – Т. 23. – №. 9. – С. 3994-3999.
5. Smirnova O. O., Kalitukha I. V., Rodina A. V., Dimitriev G. S., Sapega V. F., Ken O. S., Korenev V. L., Kozyrev N. V., Nekrasov S. V., Kusrayev Y. G., Yakovlev D. R., Dubertret, B. and Bayer M. Optical alignment and optical orientation of excitons in CdSe/CdS colloidal nanoplatelets //Nanomaterials. – 2023. – Т. 13. – №. 17. – С. 2402.