

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.262.01 НА БАЗЕ  
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ  
НАУКИ ФИЗИЧЕСКОГО ИНСТИТУТА ИМ. П.Н. ЛЕБЕДЕВА РОССИЙСКОЙ  
АКАДЕМИИ НАУК ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ  
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 05 июня 2023 г № 47

О присуждении Акмаеву Марку Александровичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Экситонная динамика в монослоях дихалькогенидов переходных металлов» по специальности 1.3.8 — Физика конденсированного состояния принята к защите 03 апреля 2023 года, (протокол заседания № 46) диссертационным советом 24.1.262.01, созданным 11 апреля 2012 года приказом № 105/нк на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН), 119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, д. 53.

Соискатель Акмаев Марк Александрович, 28 июня 1995 года рождения, в 2017 году окончил бакалавриат и в 2019 году магистратуру Физического факультета Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова по направлению «Физика». С 2019 года по настоящее время обучается в аспирантуре Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН) по направлению «Физика и астрономия». Справка об обучении и сдаче кандидатских экзаменов выдана ФИАН в 2022 году. С 2015 года является сотрудником ФИАН. В настоящее время работает в должности младшего научного сотрудника в Лаборатории спиновой физики двумерных материалов Отделения физики твердого тела ФИАН.

Диссертационная работа Акмаева М. А. выполнена в Отделении физики твердого тела ФИАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук Белых Василий Валерьевич, старший научный сотрудник Отделения физики твердого тела ФИАН.

Официальные оппоненты:

1. Семина Марина Александровна, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Сектора теоретических основ микроэлектроники Отделения твердотельной электроники Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук (г. Санкт-Петербург);
2. Смирнов Александр Михайлович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Кафедры физики полупроводников и криоэлектроники Физического факультета Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова (МГУ)

дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет» (СПбГУ), город Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном доктором физико-математических наук Вербиным Сергеем Юрьевичем, профессором кафедры Физики твердого тела (ФТТ) с возложением обязанностей заведующего кафедрой ФТТ, доктором физико-математических наук Игнатьевым Иваном Владимировичем, профессором кафедры ФТТ, кандидатом физико-математических наук Чербуниным Романом Викторовичем, доцентом кафедры ФТТ, и кандидатом физико-математических наук Кузнецовой Марией Сергеевной, заместителем

руководителя Лаборатории Оптики Спина, старшим научным сотрудником, и утвержденном кандидатом физико-математических наук Микушевым Сергеем Владимировичем, проректором по научной работе СПбГУ, указала, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой и удовлетворяет требованиям, изложенным в Положении о присуждении ученых степеней, утвержденном постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., а соискатель заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Соискатель имеет 31 опубликованную работу, в том числе по теме диссертации опубликовано 9 работ, из них в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science, опубликовано 3 работы.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем Акмаевым М. А. работах.

Наиболее значимые результаты по теме диссертации опубликованы в статьях:

1. Неэкспоненциальная динамика фотолюминесценции неоднородного экситонного ансамбля в монослоях  $WSe_2$  / М. А. Акмаев, М. В. Кочиев, А. И. Дулебо, М. В. Пугачев, А. Ю. Кунцевич, В. В. Белых // Письма в ЖЭТФ. — 2020. — Т. 112, № 10. — С. 650—657.
2. Making van Der Waals Heterostructures Assembly Accessible to Everyone / S. G. Martanov, N. K. Zhurbina, M. V. Pugachev, A. I. Duleba, M. A. Akmaev, V. V. Belykh, A. Y. Kuntsevich // Nanomaterials. — 2020. — Vol. 10. — P. 2305.
3. Spatiotemporal dynamics of free and bound excitons in CVD-grown  $MoS_2$  monolayer / М. А. Акмаев, М. М. Глазов, М. В. Кочиев, Р. В. Винокуров, С. А. Смагулова, В. В. Бельих // Applied Physics Letters. — 2021. — Vol. 119, no. 11. — P. 113102.

Выбор официальных оппонентов обосновывается их высокой квалификацией и наличием достижений мирового уровня в области физики конденсированного состояния и экситонной физики в двумерных материалах, а ведущей организации – ее репутацией признанного научного центра, проводящего исследования в области физики конденсированного состояния.

Диссертация Акмаева М. А. посвящена исследованию динамики фотолюминесценции и пространственно-временных характеристик свободных и локализованных экситонов в монослоях дихалькогенидов переходных металлов. Актуальность темы диссертации обусловлена большим научным интересом к таким новым двумерным материалам, как монослои дихалькогенидов переходных металлов, в которых наблюдается богатая экситонная физика, но при этом динамика экситонных состояний не до конца изучена, в особенности временные и пространственно-временные характеристики локализованных экситонов. К тому же, монослои дихалькогенидов переходных металлов интересны с прикладной точки зрения, так как они рассматриваются в качестве перспективной замены традиционных полупроводников в электронике и оптоэлектронике.

На основании выполненных соискателем исследований были получены следующие основные результаты:

1. В монослоях  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WSe}_2$  на кремниевой подложке при низкотемпературной фотолюминесценции доминируют локализованные экситонные состояния. Данные состояния характеризуются долгоживущей неэкспоненциальной временной динамикой.
2. В монослоях  $\text{MoS}_2$  обнаружена пространственно-временная динамика связанных экситонов, которые характеризуются длительным ( $\sim 1$  мкс) неэкспоненциальным характером затухания с субдиффузионным пространственным распространением, что объясняется на основе учета взаимодействия диффузии и оже-рекомбинации.

3. Показано, что неэкспоненциальная долгоживущая динамика фотолюминесценции экситонов в монослоях  $WSe_2$  не связана с процессами бимолекулярной рекомбинации, а может быть описана с помощью учета разброса времен излучательной рекомбинации локализованных экситонных состояний, зависящих от степени локализации экситонов.
4. С помощью прямой регистрации пространственно-временной динамики фотолюминесценции получены коэффициенты диффузии свободных экситонов при комнатной температуре в монослоях  $MoS_2$  и  $WSe_2$  и показано, что коэффициенты диффузии увеличиваются при увеличении мощности возбуждения.

Все результаты, представленные автором, являются новыми. Новизна обусловлена тем, что:

- Впервые исследованы пространственно-временные характеристики связанных экситонов в монослоях  $MoS_2$ , выращенных химическим осаждением из газовой фазы;
- Впервые с помощью прямой регистрации пространственно-временной динамики фотолюминесценции получены коэффициенты диффузии свободных экситонов в монослоях  $MoS_2$ , выращенных химическим осаждением из газовой фазы, и в механических отщепленных монослоях  $WSe_2$ ;
- Впервые показано, что неэкспоненциальная долгоживущая динамика фотолюминесценции экситонов в монослоях  $WSe_2$  не связана с процессами бимолекулярной рекомбинации, вопреки распространенному представлению.

Теоретическая значимость полученных соискателем результатов обусловлена тем, что полученные результаты необходимы как для проверки существующих теоретических моделей, так и для построения новых. Так, обнаружение и исследование субдиффузионного характера распространения связанных экситонов и зависимости коэффициента диффузии свободных

экситонов от мощности необходимы для теоретического учета экситон-экситонной аннигиляции в монослоях дихалькогенидов переходных металлов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики обусловлено тем, что получены новые данные о экситонной системе в монослоях дихалькогенидов переходных металлов, что необходимо для разработки устройств электроники и оптоэлектроники на основе этих материалов. Так, например, на основе монослоя  $\text{MoS}_2$  уже показан транзисторный эффект и собраны планарные транзисторы, показана лазерная генерация и собраны фотодетекторы и светоизлучающие приборы. Таким образом, новые данные, полученные в диссертации, в частности для монослоя  $\text{MoS}_2$ , могут быть полезны для развития данных практических областей.

Полученные результаты могут быть использованы в таких организациях как МГУ им. М. В. Ломоносова, МФТИ, ИОФ РАН им. А. М. Прохорова, ИФТТ РАН им. Ю.А. Осипьяна, ФТИ им. А. Ф. Иоффе, ФИАН им. П. Н. Лебедева, СПбГУ, ИТМО, СВФУ им. М. К. Аммосова и в других учреждениях, проводящих исследования двумерных экситонов.

Достоверность результатов работы подтверждается соответствием ряда уже известных данных, полученных в ходе экспериментов, с литературными данными других авторов, использованием современного оборудования и проверенных и отлаженных методик, а также адекватным описанием полученных экспериментальных результатов теоретическими моделями.

Все основные научные результаты, включенные в диссертацию Акмаева М. А., получены лично автором, либо при его непосредственном участии. В частности, автором лично были проведены все экспериментальные измерения и обработка результатов. Помимо этого, автор внес существенный вклад в постановку задач и интерпретацию полученных результатов. Подготовка результатов к публикации проводилась совместно с соавторами.

В ходе защиты соискатель Акмаев М. А. аргументировано ответил на заданные ему вопросы членов диссертационного совета, а также на замечания ведущей организации и оппонентов.

На заседании 05 июня 2023 года диссертационный совет принял решение присудить Акмаеву М. А. учёную степень кандидата физико-математических наук за решение научной задачи по исследованию временной динамики и пространственного распространения свободных и локализованных экситонов в монослоях  $\text{MoS}_2$  и  $\text{WSe}_2$ , что необходимо для развития научной области, относящейся к экситонной физике в двумерных материалах.

При проведении тайного голосования члены диссертационного совета в количестве 23 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации (1.3.8 — Физика конденсированного состояния), участвовавшие в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали:

за присуждение учёной степени      22,  
против присуждения учёной степени      0,  
недействительных бюллетеней      1.

Председатель диссертационного совета  
член-корр. РАН, д.ф.-м.н.

Колачевский Николай Николаевич

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

Золотько Александр Степанович

05 июня 2023 г.