

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»
(МФТИ, Физтех)

Юридический адрес: 117303, г. Москва,
ул. Керченская, дом 1А, корпус 1
Почтовый адрес: 141700, Московская обл.,
г. Долгопрудный, Институтский переулок, дом
Тел.: +7 (495) 408-42-54, факс: +7 (495) 408-68-69
info@mipt.ru

№ _____
на № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе

_____ Баган Виталий
Анатольевич

« ____ » _____ 2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Бородина Богдана Романовича** «Сканирующая зондовая литография дихалькогенидов переходных металлов и исследование электронных и оптических свойств структур на их основе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников

В современной физике полупроводников активно изучаются системы пониженной размерности. Одними из наиболее перспективных двумерных материалов являются дихалькогениды переходных металлов (ДПМ). Монослой данных материалов демонстрируют множество уникальных свойств и эффектов, таких как сильная спин-долинная связь, аномально высокое поглощение света, сильные экситонные резонансы и многие другие. Объемные ДПМ характеризуются огромным показателем преломления в видимой и ближней ИК области, гигантской оптической анизотропией, оптической активностью, и многими другими свойствами, делающими данные материалы чрезвычайно перспективными для нанопотонных применений. Однако многие свойства данных материалов всё ещё недостаточно изучены, а методы литографии для их фабрикация плохо развиты. Это связано с высокой чувствительностью к поверхностным адсорбатам и высокой химической анизотропией. Стандартные методики литографии плохо подходят для данных материалов. В диссертации Бородина Богдана Романовича «Сканирующая зондовая литография дихалькогенидов переходных металлов и исследование электронных и оптических свойств структур на их основе» исследуются электронные свойства (работа выхода) ДПМ, как в виде монослоёв так и объемных образцов и разрабатываются зондовые методики литографии применительно к этим слоистым материалам. Таким образом, эта работа направлена на

решение **актуальных научных** задач и представляет фундаментальную и прикладную ценность.

Несмотря на фундаментальную направленность исследований, стоит отметить, что все результаты работы были получены при комнатной температуре. Таким образом, результаты работы могут быть использованы и в **прикладных областях** науки.

Диссертация состоит из введения, шести глав и заключения. Полный объем диссертации 169 страниц, включая 56 рисунков и 2 таблицы.

Во **введении** обосновывает актуальность и новизна работы, сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены положения, выносимые на защиту.

Первая глава представляет из себя подробный литературный обзор по теме двумерных материалов с момента первых теоретических предсказаний до современного состояния этого научного направления.

Вторая глава является методологической и содержит описание основных принципов работы сканирующего зондового микроскопа, а также методов исследования электронных свойств образцов и методов зондовой литографии.

Третья глава посвящена исследованию работы выхода различных дихалькогенидов переходных металлов на проводящих подложках и фотокаталитических процессов на формируемых гетеропереходах. Показано существенное влияние подложки на свойства гетеропереходов.

Четвертая глава представляет собой подробное исследование локального анодного окисления графена и MoSe_2 . Подробно изучен размер окисленной точки от параметров процесса (напряжения, времени воздействия, влажности). Показан набор параметров для анизотропного в слое и изотропного режимов окисления. Предложена феноменологическая формула для описания кинетики окисления. Получено разрешение вплоть до 10 нм.

Пятая глава посвящена формированию многослойных наноструктур MoSe_2 с усиленной фотолюминесценцией с помощью локального анодного окисления. Показано, что при определенном размере наноструктур происходит формирование квазинезависимых монослоев внутри многослойной матрицы. Предложена модель для формирования таких структур.

Шестая глава представляет собой исследование механической зондовой литографии применительно к слоистым материалам. Разработан новый подход с разрешением до 20 нм, основанный на последовательном удалении с поверхности, позволяющий нивелировать анизотропные свойства слоистых материалов. С использованием разработанной методики сформированы дисковые нанорезонаторы из объемного MoSe_2 на модах шепчущей галереи. Экспериментально и теоретически изучены свойства

данных структур. Показано усиление фотолюминесценции в области от 850 до 1050 нм до 2-х порядков за счёт эффекта Парселла.

Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Изложенные в работе результаты являются новыми, научно и практически значимыми.

По диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1) Автор не поясняет в работе выбор техники зонда Кельвина для исследования локальных особенностей работы выхода;

2) При создании микрорезонаторов на основе слоистых материалов автор демонстрирует изменение морфологии при прокислении по периметру. При этом утверждается, что наблюдаемая впоследствии фотолюминесценция – есть результат накопления оксида между монослоями, которое приводит к расслоению флэйков. При этом, детального исследования химического состава накопленного расслаивающего материала не проводится;

3) При исследовании зависимости работы выхода слоистых материалов от количества монослоев автор утверждает, что наблюдается ее насыщение, что не следует из представленных в диссертации графиков и требует дополнительных пояснений.

Вышеизложенные замечания не являются принципиальными и не снижают общей **высокой оценки** диссертационной работы Б.Р. Бородина. Работа представляет из себя законченное научное исследование, посвященное одному из наиболее актуальных направлений современной физики полупроводников.

Основные результаты работы по теме диссертации опубликованы в 13 оригинальных статьях. Стоит отметить, публикации в высокоцитируемых научных изданиях первого квартиля 2D Materials и Nanoscale Horizons, как наиболее важные. Научные положения, выносимые на защиту, хорошо сформулированы и адекватно отражают суть полученных результатов, которые являются достоверными и актуальными.

Результаты диссертационной работы можно рекомендовать к использованию в фундаментальных и прикладных исследованиях дихалькогенидов переходных металлов в СПбГУ (г. Санкт-Петербург), УрФУ (г. Екатеринбург), ДВФУ (г. Владивосток), НГУ (г. Новосибирск), ИТМО (г. Санкт-Петербург), ФТИ им. А.Ф. Иоффе (г. Санкт-Петербург), МФТИ, Физтех (г. Долгопрудный) и др.

Заключение. Диссертационная работа Бородина Богдана Романовича «Сканирующая зондовая литография дихалькогенидов переходных металлов и исследование электронных и оптических свойств структур на их основе» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11. Физика полупроводников является законченной научно-квалификационной работой и отвечает требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям согласно Положению о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки

«Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», а её автор Бородин Богдан Романович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв ведущей организации был обсужден и одобрен на расширенном научном заседании Центра фотоники и двумерных материалов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт» (национальный исследовательский университет) 21.04.2023 г., протокол № 4-1.

канд. физ.-мат. наук

Большаков Алексей Дмитриевич

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

Телефон: 8 (921) 948-0384

Адрес электронной почты: bolshakov.ad@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», центр фотоники и двумерных материалов, лаборатория функциональных наноматериалов

Должность: старший научный сотрудник – заведующий лабораторией

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>

канд. физ.-мат. наук

Арсенин Алексей Владимирович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер. 9

Телефон: 8 (495) 408-4544

Адрес электронной почты: arsenin.av@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», центр фотоники и двумерных материалов.

Должность: зам. директора, ведущий научный сотрудник – заведующий лабораторией

Web-сайт организации: <https://mipt.ru>