

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
УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

Аттестационное дело № _____

Решение диссертационного совета от 01.06.2023 № 7 _____

О присуждении Бородину Богдану Романовичу, гражданину РФ, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Сканирующая зондовая литография дихалькогенидов переходных металлов и исследование электронных и оптических свойств структур на их основе», по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» принята к защите «20» марта 2023 г., протокол № 4, диссертационным советом ФТИ 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, утвержденным 12 июля 2019 г. приказом директора ФТИ им. А.Ф. Иоффе № 75.

Соискатель Бородин Богдан Романович, 1995 года рождения, в 2019 г. окончил Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по направлению подготовки 11.04.04 – «электроника и наноэлектроника». С 2019 по 2023 гг. проходил обучение по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников» в аспирантуре при Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе. В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника в лаборатории оптики поверхности ФТИ им. А.Ф. Иоффе.

Диссертационная работа выполнена в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук, расположенном по адресу 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26. Научный руководитель – Алексеев Прохор Анатольевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории Оптики поверхности Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук.

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (Институтский пер., 9, г. Долгопрудный, Московская обл., 141701) в своем заключении, подписанном заведующим лабораторией, заместителем директора центра фотоники и двумерных материалов, кандидатом физико-математических наук Арсениным Алексеем Владимировичем и заведующим лабораторией функциональных наноматериалов Большаковым Алексеем Дмитриевичем, утвержденном проректором по научной работе МФТИ, кандидатом физико-математических наук Баганом Виктором Анатольевичем, дала

положительный отзыв и отметила, что диссертационная работа является актуальной, законченной, выполнена на высоком научном уровне и соответствует профилю совета 34.01.02 (специальность 1.3.11 – «физика полупроводников»).

В отзыве содержатся следующие 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 флейков. 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 насыщение в этой зависимости, что не вполне верно.

Отмечено, что указанные замечания не снижают общую высокую оценку диссертации. Результаты работы обладают научной и практической ценностью, обоснованы и достоверны. Проведенные исследования являются актуальными и своевременными. Результаты диссертации апробированы на многочисленных международных и всероссийских научных конференциях, опубликованы в 13 научных статьях в рецензируемых журналах, отвечающих требованиям ВАК.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Бородин Богдан Романович, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «физика полупроводников».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обусловливается их высокой квалификацией, а также сходством тематик работ, проводимых ведущей организацией и оппонентами, с тематикой диссертационной работы. На защите на все замечания соискателем даны исчерпывающие квалифицированные ответы.

Официальные оппоненты:

1. Мухин Иван Сергеевич, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования и науки Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова РАН, заведующий лабораторией возобновляемых источников энергии.

2. Милёхин Александр Германович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения РАН, заведующий лабораторией ближнепольной оптической спектроскопии и наносенсорике.

Официальные оппоненты дали положительные отзывы на диссертацию.

Вопросы и замечания официального оппонента Мухина И.С.

1. В главе 3 с помощью АСМ визуализации убедительно продемонстрирован процесс фотоокисления монослоев MoSe_2 , перенесенных на слои графена, при длительной выдержке в атмосфере с относительно высокой влажностью при условиях естественного освещения. Было бы интересным сравнить спектры фотolumинесценции MoSe_2 до и после процесса фотоокисления (спектральное положение экситонной линии и интенсивность).

2. На рис. 4.6 представлены АСМ изображения наноструктур, созданных локальным анодным окислением участков MoSe_2 . При этом можно отметить наличие дрейфа образца. В частности, окружности на рис. б) не являются четко concentрическими. Возможно ли полностью устранить данный негативный эффект, в существенно меньшей степени характерный для других видов литографии (например, электронной)?

3. Особый интерес вызывают работы по исследованию локального анизотропного оксидирования флейков MoSe_2 , демонстрирующие возможности как по созданию наноструктур на поверхности чешуек, так и исследованию взаимной ориентации плоскостей в многослойных структурах. Возможно ли анизотропное прокисление флейков на толщину более двух слоев? Какие ограничения процесса?

4. Вопрос к главе 5. Можно ли предсказать, как изменение влажности окружающей среды при процессе локального анодного окисления (например, уменьшение по сравнению с оптимальными 60-65%) изменит оптимальный латеральный размер микроструктуры, демонстрирующей яркую ФЛ после окисления вследствие разделения слоев?

5. Чем объясняется возбуждение мод различного порядка в одном и том же сформированном микродиске при измерениях темнопольного рассеяния и ФЛ (рис. 6.6)?

Вопросы и замечания официального оппонента Милёхина А.Г.

1. Автор в обоснование актуальности темы диссертации отмечает, что «физические свойства дихалькогенидов переходных металлов, а также их зависимости от толщины слабо изучены». В связи с этим, хотелось бы иметь в Главе 6 обсуждение ограничений методики ФЗСЛ по толщине слоистого материала. Этот вопрос важен, поскольку зонный спектр ДПМ меняется с непрямоугольного к прямоугольному с уменьшением толщины слоя ДПМ, приводя к значительному увеличению интенсивности ФЛ.

2. Автор обсуждает причину разной интенсивности ФЛ тонких слоев MoSe_2 на разных поверхностях (МСГ и ДСГ на SiC) в сравнении с MoSe_2 на SiO_2 . При этом толщина слоя SiO_2 не указана. Если толщина слоя такая же, как в работе [А3] (300 нм), то при обсуждении интенсивности ФЛ образца MoSe_2 на SiO_2 следует учитывать эффект интерференции на толщине слоя SiO_2 , который может приводить к значительному увеличению сигнала ФЛ.

3. На стр. 76 обсуждается «Оксид MoSe_2 », растворимый в воде. По всей видимости, это- лабораторный жаргон. Пояснение к тому, что представляет собой окисленный слой MoSe_2 (состоящий из MoO_3 и Se_2O_3), появляется лишь на стр. 98, однако, не ясно, идентичны ли эти понятия. На стр. 88 упоминаются «Столбики погрешностей». Смысл этого понятия также не ясен.

4. Отмечаются неудачные формулировки типа «рамановские моды демонстрируют и 2D, и 3D составляющие...» (стр. 102) вместо, например, «рамановские моды демонстрируют и 2D, и 3D структуру кристалла», «Результаты опытов были нанесены на график» (стр. 123) вместо «результаты экспериментов представлены на графике», «На рисунках 6.5(г-е) показаны АСМ-изображения процесса создания резонатора» (стр. 127) вместо «На рисунках 6.5(г-е) показаны АСМ-изображения, иллюстрирующие процесс создания резонатора», «особенности в ФЛ и рассеянии» (стр. 129) вместо «особенности в спектрах ФЛ и рассеяния» и др. Во введении вместо «слои скреплены силой ван-дер-ваальса» следовало бы написать «слои скреплены силой Ван-дер-Ваальса».

5. Одна и та же разработанная методика зондовой литографии по-разному называется в диссертации: механическая зондовая литография, фрикционная сканирующая зондовая литография, фрикционная зондовая литография. Следовало бы придерживаться единого названия.

6. Наличие незначительного числа опечаток (стр.52, 2 абзац, стр.67, 2 абзац), пропущенных слов (стр.13, 2 абзац), несогласований падежей (стр.13, 2 абзац, стр.20, 1 абзац, стр.29, 2 абзац, стр.74, 84, стр.127, последний абзац), стр.133, четвертая строка) и произвольная пунктуация, хотя и не искажают существо диссертации, однако, затрудняют ее прочтение.

На автореферат поступило 4 отзыва, все они положительные.

1. Отзыв к.ф.-м.н. Рахлина Максима Владимировича, н.с. лаб. Оптики кристаллов и гетероструктур с экстремальной двумерностью, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26).

2. Отзыв к.ф.-м.н. Гейдта Павла Викторовича, зав. лаб. Функциональной диагностики низкоразмерных структур для наноэлектроники, Новосибирский национальный исследовательский университет (630090, Новосибирская обл., г. Новосибирск, ул. Пирогова, 26).

3. Отзыв д.ф.-м.н. Анкудинова Александра Витальевича, в.н.с. лаб. Физико-химических свойств полупроводников, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26).

4. Отзыв PhD Кравцова Василия Андреевича, в.н.с. лаб. Низкоразмерных квантовых материалов, ИТМО (197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, лит. А)

Научная и практическая значимость работы

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований решен большой комплекс экспериментальных задач, которые являются актуальными для современной физики и техники полупроводниковых наноструктур.

1. Показано, что работа выхода исследованных дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) нелинейно возрастает с увеличением толщины и начинает выходить на насыщение после ~ 10 слоёв. Методом Кельвин-зонд микроскопии определены работы выхода монослоя MoSe_2 на графене, монослоя MoSe_2 на Ni, монослоя WS_2 на Au, монослоя WSe_2 на Ni.

2. Впервые исследованы фотоокислительные процессы на гетеропереходах ван-дер-ваальсовых гетероструктур (SiC/графен/MoSe₂). Показано, что работа выхода подложки оказывает существенное влияние как на оптические свойства гетероперехода, так и на его устойчивость в условиях окружающей среды. Продемонстрировано селективное фотоокисление на гетеропереходе MoSe₂/(монослойный графен) и подавление этого процесса на гетеропереходе MoSe₂/(двухслойный графен). Показано, что наличие высокого гетеробарьера приводит к фотоиндуцированному окислению гетероструктуры.

3. Наиболее детально исследован процесс локального анодного окисления SiC/графена и MoSe₂. Определены режимы (изотропный и анизотропный) и параметры окисления. Детально описан процесс протекания окисления. Предложен феноменологический закон для этого процесса. Продемонстрировано разрешение литографии локального анодного окисления вплоть до 10 нм.

4. Показано, что при определенных геометрических параметрах формируемых многослойных структур можно преодолеть ван-дер-ваальсовы силы в отдельных слоях и получить структуру промежуточной размерности (2D/3D) в которой многослойная (3D) структура состоит из квази-независимых (2D) монослоев. При формировании таких структур интенсивность их фотолюминесценции возрастает вплоть до 3-х порядков по сравнению с изначальной структурой.

5. Разработан новый подход к механической зондовой литографии – фрикционная зондовая литография. Данный подход основан на многократном удалении нескольких атомарных слоёв с поверхности образца.

6. С использованием разработанной методики впервые были сформированы оптические резонаторы с модами шепчущей галереи из объемного MoSe₂. Слабая непрямозонная ФЛ объемного MoSe₂ усиливается резонаторами до 2-х порядков за счёт эффекта Парселла. В ходе экспериментов были изучены оптические свойства нанофотонных резонаторов толщиной 70 нм и диаметром от 1.4 до 10 мкм.

Диссертация является законченной, последовательной и внутренне согласованной научной работой, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение. Полученные результаты воспроизводимы и повторяемы, что подтверждает их достоверность. Для получения представленных в диссертационном исследовании результатов применялось современное высокоточное оборудование, а также общепринятые стандарты научных исследований. Данные, полученные различными методами, дополняют друг друга и подтверждают взаимную достоверность результатов.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертационном исследовании результаты были получены непосредственно автором или при его личном участии. Автор принимал участие в постановке целей и задач, проведении экспериментов, разработке методик, анализе результатов и моделировании. Автор участвовал в написании статей и представлении результатов на конференциях.

Апробация работы

Результаты данной работы были доложены на следующих конференциях:

1. Международная конференция «Физика.СПб» в 2017, 2018, 2019, 2020 и 2021 годах.
2. Международная школа-конференция «Saint-Petersburg OPEN» в 2018, 2019 и 2020 годах.
3. Всероссийская молодежная конференция по физике полупроводников и наноструктур, полупроводниковой опто- и наноэлектронике в 2018, 2019 и 2020 годах.
4. VI Научно-практическая конференция с международным участием «Наука настоящего и будущего» в 2018 году.
5. Международная конференция «Scanning Probe Microscopy (SPM-2018) в 2018 году.
6. Международная конференция по метаматериалам и нанофотонике «METANANO» в 2020 и 2021 годах.
7. Международная конференция «Nanostructures for Photonics» в 2021 году.
8. Симпозиум «Нанофизика и наноэлектроника» в 2022 году.

По результатам исследований, составляющих содержание диссертации, опубликовано 13 статей в рецензируемых журналах, входящих в базы данных Web of Science и Scopus (с указанием личного вклада автора):

1. Borodin B. R. et al. Kelvin probe microscopy of MoSe₂ monolayers on graphene //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1124. – №. 8. – С. 081031.

Личный вклад – разработка методики эксперимента, проведение экспериментов по получению поверхностного потенциала методом Кельвин-зонд микроскопии, обработка и анализ данных АСМ, подготовка текста статьи к печати.

2. Borodin B. R. et al. MoSe₂/graphene/6H-SiC heterojunctions: energy band diagram and photodegradation //Semiconductor Science and Technology. – 2019. – Т. 34. – №. 12. – С. 125007.

Личный вклад – разработка методики эксперимента, проведение экспериментов по получению поверхностного потенциала методом Кельвин-зонд микроскопии, обработка и анализ данных АСМ, подготовка текста статьи к печати.

3. Alekseev P. A. et al. Optical and electrical properties of the MoSe₂/graphene heterostructures //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 1092. – №. 1. – С. 012002.

Личный вклад – проведение экспериментов по получению ВАХ тонких слоёв MoSe₂ на графене и поверхностного потенциала методом Кельвин-зонд микроскопии, обработка и анализ экспериментальных данных.

4. Borodin B. R. et al. Kelvin probe force gradient microscopy of WSe₂ monolayers on Ni //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – Т. 1400. – №. 5. – С. 055012.

Личный вклад – разработка концепции эксперимента, проведение экспериментов по получению поверхностного потенциала методом Кельвин-зонд микроскопии, обработка и анализ данных АСМ, подготовка текста статьи к печати.

5. Borodin B. R., Benimetskiy F. A., Alekseev P. A. Substrate-dependent degradation of thin TMDC layers in ambient conditions //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1695. – №. 1. – С. 012197.

Личный вклад – разработка концепции эксперимента, проведение экспериментов по получению поверхностного потенциала методом Кельвин-зонд микроскопии, обработка и анализ данных АСМ, подготовка текста статьи к печати.

6. Алексеев П. А. и др. Локальное анодное окисление слоев графена на SiC //Письма в Журнал технической физики. – 2018. – Т. 44. – №. 9. – С. 34-40.

Личный вклад – проведение экспериментов по окислению графена на SiC, поиск режимов окисления, анализ и обработка данных АСМ.

7. Borodin B. R., Benimetskiy F. A., Alekseev P. A. Study of local anodic oxidation regimes in MoSe₂ //Nanotechnology. – 2021. – Т. 32. – №. 15. – С. 155304.

Личный вклад – проведение экспериментов по окислению MoSe₂, поиск режимов окисления, обработка и анализ полученных данных, разработка модели и феноменологического уравнения для описания процесса окисления, подготовка текста статьи к печати.

8. Borodin B. R. et al. Anisotropy of local anodic oxidation process in thin MoSe₂ films //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Т. 1697. – №. 1. – С. 012096.

Личный вклад – проведение экспериментов по окислению MoSe₂, обработка и анализ полученных данных, подготовка текста статьи к печати.

9. Borodin B. R. et al. Photoluminescence enhancement in multilayered MoSe₂ nanostructures obtained by local anodic oxidation //2D Materials. – 2021. – Т. 9. – №. 1. – С. 015010.

Личный вклад – разработка методики эксперимента, проведение экспериментов по созданию наноструктур методом локального анодного окисления, обработка и анализ полученных данных, разработка модели расслоения, моделирование процесса расслоения в программном пакете COMSOL Multiphysics, подготовка текста статьи к печати.

10. Borodin B. R. et al. Local anodic oxidation as a method of fabrication optoelectronic devices based on thin TMDC layers //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Т. 2300. – №. 1. – С. 020011.

Личный вклад – проведение экспериментов по созданию наноструктур методом локального анодного окисления, обработка и анализ полученных данных, подготовка текста статьи к печати.

11. Borodin B. R., Benimetskiy F. A., Alekseev P. A. Mechanical frictional scanning probe lithography of TMDCs //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2103. – №. 1. – С. 012090.

Личный вклад – разработка методики фрикционной сканирующей зондовой литографии, проведение экспериментов по литографии методом ФСЗЛ, обработка и анализ полученных данных, подготовка текста статьи к печати.

12. Borodin B. R. et al. Mechanical scanning probe lithography of nanophotonic devices based on multilayer TMDCs //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 2015. – №. 1. – С. 012020.

Личный вклад – проведение экспериментов по созданию наноструктур методом ФСЗЛ, обработка и анализ полученных данных, подготовка текста статьи к печати.

13. Borodin B. R. et al. Indirect bandgap MoSe₂ resonators for light-emitting nanophotonics //Nanoscale Horizons. – 2023. – Т. 8. – №. 3. – С. 396-403.

Личный вклад – разработка методики эксперимента, проведение экспериментов по созданию нанофотонных резонаторов методом ФСЗЛ, измерение ФЛ с температурным и временным разрешением, обработка и анализ полученных данных, подготовка текста статьи к печати.

На заседании 1 июня 2023 г. диссертационный совет принял решение присудить Бородину Богдану Романовичу ученую степень кандидата физико-математических наук

При проведении голосования диссертационного совета в количестве 19 человек из 25 членов совета, из них 11 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, очно проголосовали:

За присуждение Бородину Богдану Романовичу ученой степени кандидата физико-математических наук подано голосов – 11

Против – 0

Недействительных бюллетеней – 0

Из 7 членов совета, участвовавших дистанционно, за присуждение Бородину Богдану Романовичу ученой степени кандидата физико-математических наук проголосовали:

«за» – 6

«против» – 0

«не голосовал» – 1

Итого: из 25 членов совета участвовали в очно-заочном голосовании – 19.

За: 18

Против: 0

Воздержались: 0

Не проголосовал: 1

Председатель диссертационного

совета,

академик РАН

Сурис Роберт Арнольдович

Ученый секретарь диссертационного

совета,

д. ф.-м. н.

Сорокин Лев Михайлович

1 июня 2023 г.