

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора физико-математических наук Мухина Ивана Сергеевича 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»

Актуальность темы диссертации

Диссертационная работа Бородина Богдана Романовича посвящена исследованию дихалькогенидов переходных металлов (ДПМ) и структур на их основе. Дихалькогениды переходных металлов являются объектом активных исследований в современной физике полупроводников. Это связано с их уникальными физическими свойствами, такими как выраженные оптические свойства, большие значения энергии связи экситонов, сильная спин-долинная связь, что представляет интерес для различных областей науки и технологий. Стоит отметить, что ряд свойств подобных материалов такие, как электронные и оптические на данный момент изучены недостаточно подробно. Кроме того, методы литографии данных материалов, не использующие резисты, вносящие существенное загрязнение поверхности флейков ДМП, развиты относительно слабо. Вследствие чрезвычайной чувствительности к поверхностным адсорбатам и высокой химической анизотропии применение стандартных подходы к литографии затруднено в связи с деградацией свойств данных материалов. Таким образом задачи, решаемые в работе Бородина Богдана Романовича и посвященные исследованию гетероструктур типа «ДПМ/проводящая подложка», являются **актуальными**, а результаты, безсомнений, востребованными в современной физике полупроводников.

Научная новизна результатов

В представленной диссертационной работе можно выделить ряд новых и важных результатов. Во-первых, исследована работа выхода ДПМ различного состава и количества слоев на различных проводящих подложках. Получены значения работы выхода монослоёв и её зависимость от количества слоёв. Показано формирование гетеропереходов между ДМП и проводящими металлическими подложками, исследованы их оптические и фотокаталитические свойства. Сформулирован принцип устойчивости таких ван-дер-ваальсовых гетероструктур в условиях окружающей среды. Во-вторых, детально исследованы и усовершенствованы методики зондовой литографии рассматриваемых слоистых материалов. Учет анизотропных свойств этих материалов позволил получить разрешение зондовой литографии на уровне 10 нм. И в-третьих, разработанные методики литографии были применены для создания наноструктур нового типа, а именно

квазиразделенных монослоев внутри многослойной матрицы MoSe_2 , которые продемонстрировали усиление фотолюминесценции на уровне до 3-х порядков в сравнении с исходным состоянием, и оптических микродисковых резонаторов из непрямозонного объемного MoSe_2 с добротность до 100, за счет сильной локализации поля при возбуждении мод шепчущей галереи.

Основного содержание работы

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

Во **введении** диссертации автор обосновывает актуальность и новизну работы, практическую значимость результатов, формулирует цели и задачи диссертационного исследования, а также положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** представлен литературный обзор по теме диссертации. Подробно изложена история возникновения данного направления физики от первых теоретических работ до появления сформировавшегося научного направления. Приведены данные о разнообразии двумерных материалов, обзор их основных свойств и способов получения. Демонстрируются примеры существующих устройств на основе данных материалов.

Во **второй главе** представлены основные принципы различных методов сканирующей зондовой микроскопии, используемые в работе. Описаны подходы к исследованию топографии флейков, локальных электронных свойств структур, а также методы зондовой литографии для модификации ДПМ.

В **третьей главе** экспериментальным образом определяются значения работы выхода различных ДМП на проводящих подложках. Приведена работа выхода для монослоев MoSe_2 , WSe_2 и WS_2 и ее эволюция с толщиной слоев. Показано, что подложка оказывает существенное влияние на свойства гетероперехода и его устойчивость в условиях окружающей среды.

В **четвертой главе** исследуется процесс локального анодного окисления MoSe_2 и графена. Показана кинетика процесса окисления, предложена модель для описания размера формируемой окисленной области в зависимости от времени воздействия и приложенного электрического напряжения. Параметрически разделены изотропный и анизотропный в плоскости слоя режимы окисления. Экспериментально продемонстрировано разрешение метода на уровне до 10 нм.

В **пятой главе** продемонстрировано использование локального анодного окисления при изготовлении многослойных наноструктур из MoSe_2

характеризующихся усиленной фотолюминесценцией (ФЛ). Особенностью сформированных структур является наличие квазинеразделенных монослоев, образующихся в результате разрыва слабых межслойных связей под действие механических сил, возникающих при локальном анодном окислении и проникновении растворенных оксидов между слоями. Приводится модель формирования и условия, при которых возникает описанный процесс.

В **шестой главе** исследуется механическая зондовая литография MoSe_2 . Показано, что классическая реализация силовой литографии приводит к формированию дефектов в следствии механической анизотропии материала. Предложено использовать фрикционный подход, заключающийся в последовательном удалении нескольких слоев ДПМ за одну итерацию. Продемонстрировано, что данный подход обеспечивает контроль глубины формирования микрорисунка, при этом разрешение метода составляет порядка 20 нм. С использованием данной методики были изготовлены микродисковые резонаторы диаметром от 1.4 до 10 мкм из флейков MoSe_2 толщиной 70 нм. Показано, что в таких резонаторах, состоящих из непрямоугольного материала, можно добиться выраженного усиления фотолюминесценции за счет возникновения мод шепчущей галереи.

В **Заключении** приведены основные выводы по диссертации.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов обеспечивается корректной постановкой цели и задач исследования, использованием современных экспериментальных и технологических методов. Представленные численные и экспериментальные результаты согласуются с результатами, полученными в других научных группах, не противоречат существующим научным представлениям и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. Основные результаты работы по теме диссертации опубликованы в 13 оригинальных статьях в журналах, индексируемых в базах Scopus и Web of Science. Стоит отметить, что среди них есть публикации в высокорейтинговых журналах, таких как 2D Materials и Nanoscale Horizons, за первым авторством Бородина Б.Р. Результаты исследований являются достоверными и актуальными. Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере отражают суть полученных результатов. Текст диссертации изложен в доступной форме.

К работе можно сделать следующие комментарии:

1. В главе 3 с помощью АСМ визуализации убедительно продемонстрирован процесс фотоокисления монослоев MoSe_2 , перенесенных на графен, при длительной выдержке в атмосфере с относительно высокой влажностью при условиях естественного освещения. Было бы интересным

сравнить спектры фотолюминесценции 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 концентрическими. Возможно ли полностью устранить данный негативный эффект, существенно в 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 в следствии 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)?

Указанные замечания не являются принципиальными и не влияют на общую **положительную оценку и научную значимость** диссертационной работы Бородина Б.Р. Работа представляет собой законченное исследование, посвященное одному из наиболее актуальных направлений современной физики полупроводников. Результаты работы будут востребованы как при проведении фундаментальных исследований, так и при решении прикладных задач.

По значимости полученных результатов и научному уровню диссертация полностью соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Автор диссертации, Бородин Богдан Романович,

заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.11 – «Физика полупроводников».

Официальный оппонент,
Мухин Иван Сергеевич
доктор физико-математических наук,
заведующий лабораторией Возобновляемых источников
энергии, Федеральное государственное бюджетное
учреждение высшего образования и науки «Санкт-
Петербургский национальный исследовательский
академический университет имени Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук», 194021, г. Санкт-Петербург, ул.
Хлопина, д. 8, к. 3, лит. А
+7 (951)-661-02-58
imukhin@yandex.ru

«22» мая 2023

И. С. Мухин