

ОТЗЫВ официального оппонента

на диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук Логинова Артема Борисовича на тему: «Формирование пленок двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения» по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Диссертационная работа Логинова Артема Борисовича посвящена изучению механизмов формирования двумерных материалов методом химического осаждения из газовой фазы и исследованию физических свойств полученных материалов в зависимости от условий осаждения. Графен и двумерные полупроводниковые материалы обладают уникальными электрофизическими и оптическими свойствами, наиболее ярко проявляющимися в моно- и бислоях этих материалов, а также гетероструктур на их основе. К настоящему времени предложено большое количество устройств, реализованных на таких структурах, в частности, полевые транзисторы, светодиоды и фотодетекторы, сенсоры, устройства элементной базы ИТ и др.

Вместе с тем показано, что наилучшими характеристиками обладают нанослои, полученные методами эксфолиации из объемных слоистых кристаллов, который позволяет получить единичные уникальные устройства, однако совершенно нетехнологичен. Моно- и бислои, полученные методами осаждения на подложку, в подавляющем большинстве имеют значительную концентрацию дефектов и уступают по своим характеристикам эксфолиированным слоям. Для оптических приложений часто требуются существенные толщины материала, которые бы сохраняли свойства монослоев. Рассматриваемая диссертация как раз и направлена на разработку методов получения таких материалов и доказательства получения требуемых физических свойств, в связи с чем эта работа является исключительно актуальной.

В своем исследовании автора сфокусировался на изучении особенностей синтеза таких двумерных материалов как графен, дисульфид вольфрама (WS_2) и дисульфид молибдена (MoS_2) как наиболее ярких представителей класса двумерных материалов, перспективных для использования в электронных и оптоэлектронных устройствах. Первостепенной задачей является определение влияния параметров синтеза на конечные морфологические, структурные и физические свойства получаемых пленочных покрытий отводится важное место в современной физике двумерных материалов. Отдельное внимание в работе уделяется разработке новых методик анализа структуры покрытий в процессе

роста. Тематика работы учитывает современные запросы на создание технологий получения материалов передовых электронных устройств, а диссертация А.Б. Логинова представляет высокий интерес с точки зрения перспективных приложений.

Структура диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемых источников, включающего 161 наименование. Работа содержит 141 страницу, 64 иллюстраций и 1 таблицу.

Во введении обосновывается актуальность темы исследований, поставлены цели и задачи работы.

В первой главе представлен детальный литературный обзор, в котором приведены основные свойства двумерных материалов и отдельных их представителей. Приведено сравнение двумерных материалов с ближайшими аналогами – системами с двумерным электронным газом на основе классических полупроводников. Описаны основные методики синтеза двумерных материалов с обоснованием выбора метода химического газофазного осаждения для исследований в рамках диссертационной работы. Перечислены основные методы исследования двумерных материалов.

Во второй главе представлена новая методика исследования динамики изменения структуры поверхности подложек и осаждаемого на них покрытия, заключающаяся в получении с помощью сканирующего зондового микроскопа трехмерных изображений одной и той же области поверхности образца при его нагреве до высоких температур и последующем охлаждении без выноса образца из реакционной зоны.

В третьей главе с помощью этой методики экспериментально исследовано влияние неоднородностей поверхности никелевой подложки на формирование графеновой пленки, состоящей из совокупности наноразмерных газонаполненных пузырьков. Показано, что под действием силы притяжения со стороны зонда туннельного микроскопа происходит отрыв графеновой пленки от подложки, что приводит к объединению пузырьков.

В четвертой главе описывается влияние параметров синтеза MoS_2 , WS_2 покрытий на их морфологические и структурные свойства. Описываются особенности роста пленок при использовании порошкообразных прекурсоров MoO_3 , WO_3 и S и предлагается новая методика синтеза с использованием газообразных прекурсоров – H_2S и термически распыляемого металла.

Продemonстрирована возможность получения покрытий, состоящих из вертикально ориентированных наностенок MoS_2 . Определены стадии формирования пленок, экспериментально изучены и теоретически обоснованы изменения свойств пленок на различных стадиях их формирования. Описывается трансформация фотолюминесценции от трионной к нейтрально-экситонной при переходе от планарного роста пленки к вертикальному. Описывается возможность синтеза пленок переменного химического состава для формирования гетероструктур. Приводится описание оптических и электрических свойств гетероструктуры WS_2/MoS_2 с новым для этой пары материалов типом зонного выравнивания.

В пятой главе изучаются изменения физических свойств пленок под влиянием внешних возбуждений: действием линейно поляризованного лазерного излучения и изменением химического состава окружающей среды. Описывается возможность создания анизотропного упорядочения наностенок MoS_2 при воздействии на пленку линейно поляризованного наносекундного лазерного импульса. Исследована анизотропия фотолюминесценции в обработанных таким образом пленках, с помощью чего были выделены вклады в фотолюминесценцию в исходных необработанных пленках от двух подсистем: наностенок и горизонтальной пленки. Описывается изменение электрической проводимости при изменении концентрации паров воды и аммиака в окружающей пленку газовой среде.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в систематическом исследовании влияния параметров роста пленок графена, MoS_2 и WS_2 на их морфологические, структурные и физические свойства. Предложены оригинальные методы получения двумерных материалов и методы изучения динамики их морфологических свойств. Впервые использованы прекурсоры в виде газообразного сероводорода и паров металла для синтеза MoS_2 и WS_2 покрытий в виде совокупности вертикально ориентированных наностенок. Определены пять стадий формирования пленок MoS_2 и WS_2 , описывающих переход от планарного роста к вертикальному, сопровождающегося трансформацией фотолюминесцентных свойств и изменением характера роста электрической проводимости. Продemonстрировано формирование гетероструктур WS_2/MoS_2 нового для этих материалов типа и исследованы их свойства. Предложен метод

селективной лазерной абляции для формирования анизотропной ориентации вертикальных наностенок в пленке, позволяющий отделить вклад в фотолюминесценцию от подсистемы наностенок и подстилающей пленки.

Достоверность защищаемых положений

Все положения, выносимые на защиту, а также выводы и рекомендации полностью обоснованы экспериментальными результатами и расчетами. Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методик, воспроизводимостью результатов и согласием с литературными данными

Практическая значимость работы

Представленные результаты вносят вклад в развитие представлений о механизмах формирования двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения и способствуют оптимизации методов синтеза для получения материалов с наперед заданными свойствами. Материалы, получаемые предложенным методом синтеза с использованием газообразных прекурсоров, могут быть использованы для создания перспективных электронных и оптоэлектронных устройств.

Наиболее значимыми результатами считаю следующие: (1) отработка параметров осаждения MoS_2 и WS_2 , приводящих к устойчивому формированию с высокой плотностью монослойных вертикальных стенок этих материалов; (2) реализация методики диагностики морфологии поверхности осаждаемых структур непосредственно в камере осаждения, позволившей исследовать динамику процесса осаждения, визуализировать морфологию структур и финализировать процесс при достижении требуемых характеристик; (3) разделение вкладов в фотолюминесценцию от подсистемы вертикальных наностенок и подстилающей пленки.

В процессе ознакомления с диссертацией и подготовки отзыва мною были высказаны следующие **замечания по работе**:

1. При описании трансформации спектра фотолюминесценции от трионного к нейтрально-экситонному в процессе роста пленки, особое внимание уделяется изменению концентрации носителей зарядов в ДПМ кристаллитах. Было бы полезно провести дополнительные прямые измерения концентрации носителей зарядов, например, с использованием эффекта Холла.

2. Для более надежного определения механизмов транспорта зарядов между слоями WS_2 и MoS_2 в гетероструктуре, приводящего к гашению ФЛ, экспериментальные результаты следовало бы дополнить данными по фотолюминесценции с временным разрешением или провести дополнительные pump-probe измерения.
3. Некоторые полученные результаты и выводы, касающиеся физических свойств полученных материалов, выглядели бы существенно более глубокими, если бы были подтверждены моделированием.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости работы, не затрагивают ее основные положения и не снижают общей положительной оценки.

В диссертационном исследовании Логинова А.Б. «Формирование пленок двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения» решены значимые научно-практические задачи в рамках заявленной предметной области. Текст выполнен с соблюдением норм научного стиля, оформлен в соответствии с требованиями и соответствует профилю специальности 1.3.8 — «Физика конденсированного состояния», а именно следующим направлениям: «Теоретическое и экспериментальное исследование физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности», «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами». Результаты исследования опубликованы в рецензируемых научных изданиях, что подтверждает их научную состоятельность. Содержание автореферата должным образом отражает ключевые положения диссертационной работы.

Заключение

Диссертационное исследование представляет собой завершенную научную работу, выполненную на актуальную тематику с высокой степенью научной проработанности. Поставленные цель и задачи обладают существенной научной новизной, а положения, вынесенные на защиту, полноценно отражают основные результаты исследования.

Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.8 «Физика конденсированного состояния» (по физико-математическим наукам), а

также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В.Ломоносова, а также оформлена согласно приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Таким образом, соискатель Логинов Артем Борисович заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией «Фемтосекундная оптика
для нанотехнологий», кафедра наноэлектроники,
ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет»

25.08.2025 г.

Мишина Елена Дмитриевна

Контактные данные

Тел.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

05.27.01 – Твердотельная электроника, радиоэлектронные
компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах

Адрес места работы:

119454, ЦФО, г. Москва, Проспект Вернадского, д. 78,
Институт перспективных технологий и
индустриального программирования, кафедра наноэлектроники
Контактный телефон: +7 (499) 600-80-80, e-mail: mishina@mirea.ru