

**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**

Актуальность темы диссертации

Развитие технологий создания двумерных (2D) материалов является одним из наиболее быстроразвивающихся направлений современной физики конденсированного состояния. Свойства графена, диалкогенидов переходных металлов (ДПМ) и их гетероструктур открывают широкие перспективы в области микроэлектроники, фотоники и сенсорики. Однако, практическое применение этих материалов во многом сдерживается слабой изученностью механизмов их формирования, а также недостаточным развитием методик синтеза с контролируемыми морфологическими характеристиками и физическими свойствами. В диссертации Логинова А.Б. систематически исследованы процессы роста 2D покрытий в процессе газофазного химического осаждения (ГФХО), предложены новые технологические решения, позволяющие управлять морфологией и физическими свойствами получаемых материалов. Это определяет высокую актуальность работы.

Содержание и структура диссертационной работы

Диссертация Логинова А.Б. состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 161 наименование. Работа изложена на 141 странице и содержит 64 иллюстрации и 1 таблицу, что свидетельствует о значительном объеме проделанной экспериментальной и аналитической работы.

Во введении обоснована актуальность выбранной темы, определены цель и задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет собой подробный литературный обзор по тематике двумерных материалов. Рассматриваются физические свойства графена и ДПМ, включая их структурные, электронные и оптические особенности. Отдельное внимание уделено методам получения двумерных материалов, включая механическую эксфолиацию, молекулярно-лучевую эпитаксию и метод газофазного химического осаждения. Описываются актуальные задачи по управлению морфологией и структурой пленок, а также современные методы их исследования.

Вторая глава посвящена разработке экспериментальной методики для in-situ анализа морфологии пленок непосредственно в камере синтеза между этапами их формирования. Автором предложена оригинальная конструкция встраиваемого сканирующего зондового микроскопа, обеспечивающего стабилизацию положения образца при температурах до 1000°C. Описаны технические решения по компенсации температурного дрейфа, виброразвязке и получению изображений морфологии покрытий.

Третья глава содержит результаты исследований синтеза графеновых пленок на поликристаллическом никеле методом ГФХО. Показано влияние микроструктуры подложки на морфологию графена, в частности, образование наноразмерных пузырей в местах границ зерен. Описаны особенности взаимодействия зонда СТМ с графеновой пленкой, в том числе процессы локального отрыва пленки и объединения пузырей при приложении внешнего неоднородного электрического поля.

В четвертой главе изложены результаты исследования механизмов формирования пленок MoS_2 и WS_2 с использованием нового варианта ГФХО, основанного на применении газообразного сероводорода и паров металлов. Продемонстрирована возможность роста пленок как в виде планарных кристаллитов, так и в виде вертикально ориентированных наностенок за счет изменения параметров синтеза. Выделены пять стадий роста ДПМ пленок, охарактеризованы изменения их морфологии, фотолюминесцентных и

электрофизических свойств. Приведены данные по синтезу гетероструктур WS_2/MoS_2 и их особенностям.

Пятая глава посвящена исследованию особенностей изменения физических и структурных свойств пленок при внешних воздействиях, не связанных с процедурой синтеза. Автором разработан метод селективной лазерной абляции поляризованным наносекундным лазерным излучением для формирования анизотропных пленок с направленным распределением наностенок. Приведены результаты измерений оптических свойств (ФЛ и КРС), демонстрирующие влияние различных подсистем анизотропных пленок на их спектральные характеристики. Отдельное внимание уделено сенсорным свойствам пленок MoS_2 , показана их пригодность для создания газовых детекторов и фотоприемников.

В заключении сформулированы основные научные результаты работы, подтверждающие достижение поставленных целей.

Степень обоснованности положений, выносимых на защиту

Автором предложена оригинальная методика исследования морфологии пленок непосредственно в реакционной камере с использованием встроенного сканирующего зондового микроскопа. Приведены детальные экспериментальные данные, подтверждающие влияние поликристаллической структуры подложек на морфологию графеновых пленок и процессы их дефектации. Выделены и обоснованы стадии формирования ДПМ покрытий (MoS_2 , WS_2), показана их связь с изменением фотолюминесцентных и электрофизических характеристик. Существенным результатом является демонстрация возможности формирования гетероструктур WS_2/MoS_2 с новым для этих материалов типом взаиморасположения зон. Все положения, выносимые на защиту, логически вытекают из результатов проведенных исследований и подтверждены экспериментально.

Достоверность и новизна научных выводов и рекомендаций

Комплексный подход, включающий разработку оригинальных экспериментальных методик, использование современных средств анализа (СТМ, АСМ, РЭМ, ФЛ-спектроскопии) и согласование полученных данных с теоретическими моделями и литературными данными, обеспечивает высокую степень достоверности результатов. Научная новизна работы заключается в реализации *in-situ* методик морфологического анализа в условиях высокотемпературного синтеза, обнаружении эффекта образования пузырей в графеновых пленках, описании многостадийной динамики роста ДПМ покрытий, а также предложении метода селективной лазерной абляции для создания анизотропных структур. Впервые показана возможность быстрого формирования сплошных покрытий ДПМ с помощью газообразных прекурсоров, что имеет важное практическое значение.

Положения, выносимые на защиту в достаточной степени обоснованы.

Личный вклад соискателя является значительным: все результаты получены им самостоятельно или при его участии.

Личный вклад соискателя достаточен для признания самостоятельного характера исследования: все полученные данные либо принадлежат ему лично, либо реализованы при его участии.

Замечания по диссертационной работе:

- В разделе, посвященном сенсорным свойствам пленок MoS_2 , показаны результаты откликов на пары аммиака и воды, однако не проведен анализ селективности отклика в присутствии других возможных загрязнителей, например, этанола или оксидов азота;
- Автором в основном исследуются структурные и фотолюминесцентные свойства, а электрическая характеристика ограничивается измерением проводимости. В то же время свойства, критически важные для

практических применений в электронике, такие как подвижность носителей заряда, время жизни экситонов, остались вне поля зрения.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

Заключение

Диссертационная работа Логинова Артема Борисовича «Формирование пленок двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения» является завершенным научным исследованием, в котором решены важные задачи, соответствующие современному уровню развития физики конденсированного состояния.

Содержание диссертация соответствует специальности 1.3.8 Физика конденсированного состояния (по естественным наукам), а именно следующим ее направлениям: «Разработка экспериментальных методов изучения физических свойств и создание физических основ промышленной технологии получения материалов с определенными свойствами», «Теоретическое и экспериментальное исследование воздействия различных видов излучений, высокотемпературной плазмы на природу изменений физических свойств конденсированных веществ». Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода, 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 требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук 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, доцент,
Заведующий лабораторией терагерцовой спектроскопии
Московского физико-технического института (национального
исследовательского университета)

Горшунов Борис Петрович

Дата подписания

28.08.2025

Контактные данные:

тел.: , e-mail:

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.07- Физика конденсированного состояния

Адрес места работы:

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9,
Московский физико-технический институт (национальный
исследовательский университет), лаборатория терагерцовой спектроскопии
Тел.: ; e-mail: gorshunov.bp@mipt.ru

Подпись Горшунова Бориса Петровича зав