

ОТЗЫВ официального оппонента
на (о) диссертацию (и) 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

Двумерные (2D) материалы, такие как графен, дихалькогениды переходных металлов (ДПМ) и др. в настоящее время привлекают нарастающий интерес благодаря своим уникальным свойствам и возможности их использования в перспективных электронных и оптоэлектронных устройствах. Ограничения в использовании этих материалов в современных приборах во многом связаны с недостаточным развитием методов их синтеза. В частности, морфологические особенности графеновых и ДПМ покрытий существенным образом влияют на их физические свойства. Определение зависимости этих свойств от кристаллической структуры и морфологических особенностей получаемых пленок требуют систематических исследований для оптимизации методов синтеза и получения материалов с заданными свойствами.

Диссертационная работа А.Б. Логинова посвящена экспериментальному исследованию механизмов роста пленок 2D материалов, таких, как графен, MoS_2 и WS_2 в ходе процесса газофазного химического осаждения (ГФХО) и изучению взаимосвязи параметров синтеза с морфологией получаемых пленок, их структурными, оптическими и электрофизическими свойствами. В работе предложена новая методика исследования структуры синтезируемых пленок непосредственно в реакционной камере без их выноса на воздух, заключающаяся в использовании внедренного в камеру сканирующего зондового микроскопа.

В работе показано влияние поликристаллической структуры никелевой подложки на структуру графеновой пленки, образующейся на ней в виде совокупности наноразмерных пузырьков. Предложен новый вариант ГФХО, использующий газообразный сероводород и пары металлов в качестве прекурсоров, для получения ДПМ покрытий и гетероструктур на их основе. Определены стадии роста MoS_2 и WS_2 пленок на различных подложках и исследовано изменение их физических свойств на этих стадиях, что является важным для дальнейшего развития ГФХО методов и получения материалов, востребованных в современной электронике. Определены параметры роста пленок ДПМ, состоящих из вертикально-ориентированных наностенок, исследованы их оптические и электрические свойства, продемонстрирована перспективность их использования в сенсорных и оптических устройствах.

Таким образом диссертационная работа, основной целью которой является определение механизмов роста и установление зависимостей морфологических, структурных и физических свойств графеновых и ДПМ пленок от параметров синтеза, представляется важной и актуальной.

Содержание диссертационной работы

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 приведена актуальность выбранной темы работы, сформулирована цель и задачи, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

Первая глава представляет из себя обзор существующей литературы и научных исследований, посвященных 2D материалам – графену и полупроводниковым ДПМ. Рассматриваются общие физические свойства двумерных материалов и их отдельных представителей. Описываются методы получения 2D материалов и гетероструктур на их основе. Приводятся основные методы исследования структуры и свойств 2D покрытий.

Сформулированы основные задачи, решение которых предлагается диссертантом для выявления механизмов формирования и закономерных связей между параметрами роста и морфологическими и физическими свойствами 2D покрытий.

Вторая глава посвящена описанию новой методики исследования морфологии поверхности подложек с использованием разработанной головки сканирующего зондового микроскопа, позволяющей нагрев образцов до температур порядка 1000°C и наблюдение одной и той же области на поверхности после охлаждения без необходимости выноса образца из реакционной камеры. В главе приведены пути решения основных проблем, связанных с необратимым перемещением образца относительно зонда в процессе температурного расширения и уменьшением влияния внешних вибраций, а также результаты их экспериментальной апробации.

Третья глава посвящена описанию исследований влияния поликристаллической структуры никелевой подложки на морфологию образующейся на ней в результате пиролиза метана графеновой пленки. Выявлено, что при данной структуре подложки образованная графеновая пленка имеет структуру наноразмерных газонаполненных пузырьков нанометровых размеров, имеющих тенденцию к объединению при воздействии внешним электрическим полем, создаваемым зондом сканирующего туннельного микроскопа (СТМ).

Четвертая глава посвящена описанию исследований стадий формирования MoS_2 и WS_2 пленок в процессе нового варианта ГФХО синтеза, использующим газообразные прекурсоры – сероводород и пары металлов. Выделены пять стадий формирования ДПМ пленок, описывающие переход от горизонтального роста отдельных планарных монослойных кристаллитов к вертикальному, характеризующемуся образованием наностенок. Приведено экспериментальное подтверждение и теоретическое обоснование трансформации спектров фотолюминесценции (ФЛ), заключающейся в переходе от преобладания пика трионной рекомбинации к

нейтрально-экситонной. Описана возможность определения морфологии пленки по характеру изменения ее электрической проводимости, измеренной непосредственно в процессе синтеза. Продемонстрирована возможность синтеза гетероструктур ДПМ с помощью предложенного метода ГФХО.

Пятая глава посвящена описанию взаимодействия синтезированных пленок с оптическим излучением и газовым окружением. С помощью предложенного метода селективной лазерной абляции продемонстрирована возможность создания анизотропии в пленке и определен вклад в ФЛ от различных подсистем пленки. Продемонстрирована возможность использования осажденных покрытий в качестве оптических детекторов и газовых резистивных сенсоров.

В заключении приведены основные результаты и выводы диссертационной работы.

Научная новизна работы заключается в том, что с использованием новой методики контроля морфологии покрытий было определено влияние поликристаллической структуры подложки на морфологию графенового покрытия. Автором предложена новая методика ГФХО синтеза ДПМ покрытий, позволяющая формирование сплошных покрытий за времена порядка нескольких десятков секунд, а также обеспечивающей рост пленок в виде вертикально-ориентированных наностенок. Были выявлены стадии формирования ДПМ покрытия и определены изменения физических свойств пленки на каждой из этих стадий. Предложен метод создания анизотропии в пленке с помощью метода селективной лазерной абляции и определено влияние различных составляющих пленок на их физические свойства. Предложен метод формирования гетероструктур WS_2/MoS_2 нового типа.

Практическая значимость работы заключается в развитии технологии синтеза и анализа морфологии 2D материалов, таких как графен, MoS_2 , WS_2 . Выявлено влияние структуры подложки на морфологию графеновых пленок. Определена многостадийная динамика формирования

ДПМ покрытия, исследованы структурно-морфологические, оптические и электрофизические свойства покрытий на различных стадиях их формирования. Сформулированы модели, объясняющие взаимосвязь параметров синтеза с физическими свойствами двумерных полупроводниковых материалов и гетероструктур на их основе. Созданы прототипы устройств на основе синтезируемых полупроводниковых материалов и определены их характеристики, демонстрирующие перспективность их использования.

Обоснованность и достоверность результатов определяется использованием апробированных источников образцов для исследования, их всесторонним и комплексным анализом с использованием современных экспериментальных методик, демонстрацией воспроизводимости получаемых данных. Полученные на современном оборудовании экспериментальные результаты согласуются с результатами приведенных в работе теоретических расчетов, а также с литературными данными. Результаты исследований были апробированы на российских и международных конференциях и опубликованы в российских и международных рецензируемых научных изданиях, входящих, в том числе, в базы данных Scopus и Web of Science.

Замечания по диссертационной работе:

1. Название диссертации подразумевает исследование процессов формирования двумерных материалов. При этом Глава 5 не имеет отношения к синтезу, а посвящена взаимодействию пленок со линейно-поляризованным светом и газовым окружением.
2. Измерения поляризационной зависимости спектров ФЛ и КРС, изложенные в Главе 5, имеют большую погрешность, источник которой в диссертации не описан.
3. В Главе 4 отмечается, что по мере увеличения размеров наностенок в процессе синтеза, пик ФЛ становится менее интенсивным и сдвигается

в красную область. Однако причина, вызывающее смещение максимума пика, не указывается.

4. Положения с 3 по 6, выносимые на защиту, сформулированы слишком растянуто. Каждый из упомянутых пунктов больше соответствует абстракту.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы и не затрагивают основные положения и выводы. В диссертационной работе Логинова Артема Борисовича «Формирование пленок двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения» решены важные научные задачи, имеющие практическое значение в предметной области проводившихся исследований. Материал диссертации четко структурирован, изложен последовательно и логично. Диссертационная работа написана технически грамотным языком, в целом хорошо оформлена и ее содержание полностью соответствует специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния», 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 физических свойств упорядоченных и неупорядоченных неорганических и органических систем, включая классические и квантовые жидкости, стекла различной природы, дисперсные и квантовые системы, системы пониженной размерности». Материалы диссертационной работы в достаточной мере опубликованы автором в авторитетных научных изданиях. Содержание автореферата полностью соответствует основным положениям диссертации.

Заключение

Диссертационная работа представляет завершённую научно-исследовательскую работу, выполненную на актуальную тематику на достаточно высоком уровне. Сформулированные цель и задачи отвечают

критериям новизны, а положения, выносимые на защиту, полностью отражают содержание.

Диссертационная работа соискателя отвечает критериям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует 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 требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание 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,
ведущий научный сотрудник лаборатории алмазных материалов
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки, Федеральный
исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова
Российской академии наук» ИОФ РАН

Попов Михаил Юрьевич

28.08.2025 г.

Контактные данные:

тел.: , e-mail: mi

Специальность, по которой офиц
защищена диссертация:

01.04.17 (Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества)

Адрес места работы:

119991 ГСП-1, г. Москва, ул. Вавилова, д. 38.

ИОФ РАН, лаборатория алмазных материалов

Тел.: +7 (916) 100 2436, e-mail: mikhail.yu.popov@mail.ru