

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертационную работу Логинова Артема Борисовича «Формирование пленок двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.8 – «Физика конденсированного состояния».

Двумерные материалы, такие как графен и дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), обладают уникальными физико-химическими свойствами, делающими их перспективными для применения в электронике, фотонике, сенсорике и других областях. При этом оптические и электрические характеристики ДПМ сильно зависят от морфологии и структурных особенностей, что требует изучения и точного контроля за ними на стадии синтеза. Одним из наиболее универсальных и потенциально масштабируемых методов получения таких материалов является газофазное химическое осаждение (ГФХО). Однако, несмотря на значительное количество работ, многие вопросы, касающиеся механизмов роста пленок и влияния условий газофазного синтеза на свойства покрытий, остаются открытыми. Определение взаимосвязи параметров формирования пленочных материалов с их морфологическими и физическими свойствами требует проведения систематических комплексных исследований, включая разработку и использование новых методов анализа структуры материала в процессе синтеза.

Диссертация Логинова А.Б. посвящена экспериментальному исследованию процессов формирования пленок двумерных материалов графена, MoS_2 и WS_2 методом газофазного химического осаждения. В работе предложены новые подходы к контролю морфологии синтезируемых пленок непосредственно в реакционной камере, а также разработаны новые методы осаждения, позволяющие получать покрытия с заданными структурными и физическими свойствами. Полученные результаты позволяют углубить понимание механизмов роста пленок и обладают потенциалом для практического применения в микро- и оптоэлектронике.

Содержание диссертационной работы:

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемых источников, включающего 159 наименований. Работа содержит 140 страниц, 64 иллюстраций и 1 таблицу.

Глава 1 содержит обзор литературы по двумерным материалам, их свойствам и методам получения. Особое внимание уделено графену и диалкогоенидам переходных металлов, а также методам анализа их структуры и морфологии.

Глава 2 посвящена разработке и испытанию встроенного в реакционную камеру сканирующего зондового микроскопа, позволяющего анализ морфологии пленок с высоким пространственным разрешением между этапами высокотемпературного синтеза. Описаны технические решения по компенсации теплового дрейфа и вибровывязке.

Глава 3 рассматривает формирование графеновых пленок на поликристаллическом никеле. С помощью разработанного встроенного в реакционную камеру сканирующего зондового микроскопа установлено влияние неоднородностей рельефа подложки на морфологию графеновой пленки, заключающееся в образовании наноразмерных газонаполненных пузырей. Описывается взаимодействие графеновой пленки с зондом микроскопа, подложкой и зондом микроскопа, приводящая к частичному отрыву пленки от подложки и объединению пузырей.

Глава 4 описывает процессы осаждения пленок MoS_2 и WS_2 как с порошкообразных, так и с газообразных прекурсоров. Описываются условия синтеза, при которых осажденная пленка состоит из вертикальных наностенок. Выявлены имеющие существенные различия стадии роста покрытий и сформулирована модель, определяющая взаимосвязь морфологических и структурных особенностей пленок с их оптическими и электрическими свойствами. Приводится описание и объяснение механизма экспериментально наблюдаемой трансформации фотолюминесцентных свойств при переходе от планарного к ортогональному, по отношению к подложке, росту кристаллитов. Также представлен способ получения гетероструктур на основе этих материалов.

Глава 5 содержит исследование оптических и электрических свойств синтезированных пленок и гетероструктур. Показана возможность создания анизотропии в пленке, содержащей наностенки, с помощью лазерной абляции линейно поляризованным излучением, а также продемонстрировано применение пленок в сенсорных устройствах и фотодетекторах.

Оценка новизны и практической значимости

Научная новизна работы заключается в реализации методики контроля морфологических особенностей формирующихся покрытий непосредственно в процессе их синтеза, а также в выявлении новых эффектов, связанных с

особенностями роста графена и ДПМ на различных подложках. Предложены технические решения, обеспечивающие быстрый и контролируемый рост пленок с различной ориентацией кристаллитов. Работа обладает практической значимостью в контексте разработки методов получения функциональных покрытий и гетероструктур, пригодных для применения в сенсорах, фотонных устройствах и микроэлектронике.

Обоснованность и надежность полученных в диссертационной работе результатов обеспечиваются использованием проверенных и широко применяемых методик и технических средств для получения и исследования образцов, комплексным подходом к их анализу, сопоставлением с данными современных исследований. Экспериментальные данные, полученные на оборудовании, отвечающим современным техническим требованиям, и находятся в согласии как с результатами теоретических моделей, представленных в работе, так и с имеющимися в научной литературе сведениями. Достоверность выводов подтверждается также воспроизводимостью полученных результатов и их соответствием имеющимся научным представлениям. Результаты исследований прошли апробацию в ходе выступлений на профильных отечественных и международных научных конференциях и опубликованы в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы научного цитирования, включая Scopus и Web of Science.

К основным **достоинствам** работы можно отнести:

1. Детальный литературный обзор, показывающий глубокое понимание автором современного положения в физике двумерных систем.
2. Подробное техническое описание предложенных в работе новых методик синтеза и анализа морфологии пленок, позволяющее воспроизведение описываемых результатов диссертации.
3. Выявление основных стадий формирования MoS_2 и WS_2 и их описание в терминах, применимых для описания роста пленок других двумерных материалов

Представленная работа выполнена на высоком научном уровне, содержит оригинальные и значимые научные результаты, написана технически грамотным языком и четко структурирована.

Считаю, что диссертационная работа «Формирование пленок двумерных материалов в процессе газофазного химического осаждения» полностью

соответствует специальности 1.3.8 - «Физика конденсированного состояния», а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», и может быть рекомендована к защите.

Научный руководитель

Доктор физико-математических наук, профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова

23.04.2025 г.

Образцов Александр Николаевич