ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Гончарова Олега Юрьевича «Физико-химические основы низкотемпературного газофазного осаждения тугоплавких покрытий восстановлением галогенидов металлами», представленной на соискание ученой степени доктора химических наук по специальности 1.4.4 – Физическая химия

Диссертационная работа О. Ю. Гончарова посвящена разработке физико-химических основ низкотемпературного безводородного химического газофазного осаждения тугоплавких покрытий с использованием металлов-восстановителей. Актуальность выбранного направления определяется необходимостью снижения температуры процессов CVD, поскольку процессы с галогенидными прекурсорами (кроме фторидных) с участием водорода требуют температур свыше 900 °C.

Несомненным достоинством работы является её комплексный характер. Автор не ограничивается исследованием отдельных процессов получения покрытий, а рассматривает весь комплекс физико-химических вопросов, определяющих возможность реализации предложенного подхода: термодинамику многокомпонентных систем, полноту и достоверность исходных термодинамических данных, прогнозирование фазового состава покрытий, кинетические ограничения, взаимодействие реагентов с конструкционными материалами, способы дозирования реагентов и аппаратурное оформление процесса. Такой подход позволяет рассматривать полученные результаты не как совокупность отдельных экспериментальных данных, а как целостную научно обоснованную методологию.

К числу наиболее значимых результатов работы следует отнести разработку нового подхода к газофазному осаждению тугоплавких покрытий восстановлением галогенидов парами металлов-восстановителей, прежде всего кадмия и цинка. Показана принципиальная возможность снижения температуры осаждения на 150–250 К по сравнению с традиционными водородными процессами. Существенное значение имеет разработанная корреляционная методика оценки термодинамических свойств химических соединений, позволившая восполнить недостаток исходных данных для расчётов и оценить свойства 108 соединений. Не менее интересным представляется предложенный послойный термодинамический анализ, позволяющий прогнозировать изменение фазового и химического состава покрытия по глубине.

Важной частью работы является экспериментальная проверка теоретических положений. Получены покрытия Ta, Mo, Re, TaC, HfC и HfB_2, установлены условия их формирования, исследованы фазовый состав и морфология. Особо следует отметить установление температурных интервалов формирования α- и β-модификаций тантала, а также выявление особенностей взаимодействия танталового покрытия со стальной

подложкой. Полученные результаты подтверждают практическую применимость разработанного термодинамического подхода и его способность предсказывать реальные особенности процессов осаждения.

Самостоятельную научную и практическую ценность имеет разработка методик точного дозирования конденсированных реагентов и модульного CVD-оборудования. Созданные устройства обеспечивают раздельную подачу реагентов, контролируемое формирование парогазовых смесей и возможность реализации различных вариантов процесса. Положительно следует оценить и разработку системы улавливания токсичных продуктов, что особенно существенно при использовании кадмия и его галогенидов. Практическая значимость работы дополнительно подтверждается патентованием способов осаждения тантала и карбида тантала, а также разработанных устройств дозирования.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обеспечены сочетанием термодинамического моделирования и экспериментальных исследований с использованием рентгенофазового анализа, РФЭС, GDOES, электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа. Существенным достоинством является сопоставление результатов расчётов с экспериментальными и литературными данными. Автором также достаточно убедительно продемонстрирован личный вклад в разработку методик расчёта, проведение экспериментальных исследований и создание оборудования.

Вместе с тем работа вызывает ряд вопросов, которые могли бы быть предметом научной дискуссии.

1. В части автореферата, посвященной актуальности темы исследования, указывается, что процессы химического осаждения из газовой фазы реализуются при давлениях, близких к атмосферному. Представляется, что такое обобщение является не вполне корректным, поскольку наряду с процессами CVD, проводимыми при давлениях, близких к атмосферному, широко применяются процессы химического осаждения при пониженном давлении, в частности LPCVD и UHVCVD.

2. При рассмотрении преимуществ использования металлов-восстановителей подчёркивается снижение коррозионной активности реакционной среды. Представляется интересным более подробно сопоставить суммарную коррозионную нагрузку на оборудование для процессов с кадмием и для традиционных водородных процессов, учитывая образование летучих галогенидов металла-восстановителя.

3. Предложенный послойный термодинамический анализ основан на представлении отдельных слоёв как локально равновесных подсистем. Было бы интересно уточнить границы применимости такого приближения для существенно неравновесных

процессов CVD, особенно при высоких скоростях роста покрытия и значительных градиентах температуры и концентрации реагентов.

4. В работе показано существенное влияние материала подложки на фазовый состав и структуру формируемых покрытий. В этой связи представляет интерес вопрос о возможности количественного прогнозирования влияния состава и состояния поверхности подложки на кинетику зарождения покрытия. Кроме того, интересно, в какой степени влияние подложки сохраняется при увеличении толщины покрытия, например, свыше 50 мкм?

Указанные вопросы не снижают общей высокой оценки диссертационной работы и имеют дискуссионный характер.

Таким образом, диссертация О. Ю. Гончарова представляет собой завершённое самостоятельное научное исследование, в котором развито перспективное научное направление, связанное с низкотемпературным безводородным химическим газофазным осаждением тугоплавких покрытий с использованием металлов-восстановителей. Полученные результаты обладают научной новизной, теоретической и практической значимостью, отличаются комплексностью и подтверждены результатами экспериментальных исследований, опубликованы в научной печати и апробированы на российских и международных научных конференциях.

Считаю, что диссертация Гончарова Олега Юрьевича «Физико-химические основы низкотемпературного газофазного осаждения тугоплавких покрытий восстановлением галогенидов металлами» соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора химических наук, а её автор заслуживает присуждения ученой степени доктора химических наук по специальности 1.4.4 – Физическая химия.

Кандидат химических наук, заведующий лабораторией гетерогенного синтеза
тугоплавких соединений Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Института физической химии и электрохимии
им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук (ИФХЭ РАН)

Душик Владимир Владимирович

(подпись)

05.10.2026г.

Подпись Душика В.В. заверяю

Секретарь Ученого совета
ИФХЭ РАН, к.х.н. И.Г. Варшавская

(должность) (подпись) Ф.И.О.

119071, Москва, Ленинский пр-т, д.31, корп.4; Тел.: +7 (495) 330-17-29; e-mail v.dushik@gmail.com

Вход. № 05-9190
«12» 10 2026 г.
подпись