

УТВЕРЖДАЮ

И.о. директора

ФГБУН Института теоретической и
прикладной механики

им. С.А. Христиановича СО РАН



 Е.И. Краус
«27» апреля 2026 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института теоретической и прикладной механики

им. С.А. Христиановича Сибирского отделения

Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

на диссертационную работу **Колосовского Данила Антоновича** «Влияние газодинамики разлета продуктов лазерной абляции на процесс осаждения и свойства проводящих покрытий», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 —
Механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность темы исследования

Диссертационная работа Колосовского Д.А. посвящена исследованию газодинамических процессов, сопровождающих наносекундное лазерное осаждение, и их влияния на формирование структуры и свойств тонких и сверхтонких проводящих покрытий.

Актуальность темы обусловлена необходимостью развития методов формирования функциональных тонкоплёночных материалов, востребованных в микро- и нанoeлектронике, оптоэлектронике и сенсорных системах. Особый интерес представляют сверхтонкие металлические покрытия, обладающие одновременно высокой электропроводностью и оптической прозрачностью.

Вместе с тем формирование сплошных металлических плёнок на несмачивающихся подложках сопряжено с фундаментальными ограничениями, связанными с особенностями механизмов роста. В этой связи исследование влияния параметров газодинамического разлёта продуктов лазерной абляции на процессы осаждения является актуальной научной задачей, имеющей как фундаментальное, так и прикладное значение.

Анализ содержания диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Во введении обоснована актуальность работы, связанная с необходимостью создания сверхтонких проводящих плёнок золота для прозрачной электроники и датчиков. Определены цель и задачи исследований, сформулированы научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу физических методов осаждения тонких плёнок из газовой фазы. Рассмотрена классификация методов, физические основы наносекундного лазерного осаждения, включая лазерную абляцию, газодинамический разлёт продуктов и рост плёнки на подложке. В заключительном разделе обозначены нерешённые вопросы, сформулированы цель и задачи исследования.

Вторая глава описывает методы эксперимента и моделирования. Описаны вакуумные камеры для лазерного осаждения в различных газовых средах. Используются мишени YBCO и золото, абляция Nd:YAG-лазером (1064/532 нм, 10 нс). Описаны методики анализа и изготовления макетов нагревательных элементов и датчика теплового потока на основе YBCO. Приведён подход к электрооптическому критерию качества. Численное моделирование газодинамики выполнено методом прямого статистического моделирования Монте-Карло (программа LasInEx).

Третья глава посвящена осаждению тонких (15–30 нм) и сверхтонких (5–10 нм) плёнок золота в вакууме. Показано, что при уменьшении толщины растёт пропускание и сопротивление. Для плёнок 5–10 нм наблюдается плазмонный минимум пропускания на 600 нм, что указывает на островковую структуру и отсутствие проводимости (сопротивление >200 кОм). Причина — высокое значение поверхностной энергии золота относительно подложек из кварца и кремния, что приводит к островковому механизму роста Вольмера–Вебера.

В четвёртой главе в атмосфере кислорода (10 Па) получены сверхтонкие проводящие плёнки золота толщиной ~3 нм без смачивающих слоёв. Отсутствие плазмонного провала в спектрах и конечное сопротивление подтверждают проводимость. Плёнки применимы для функционализации поверхности YBCO (создание смачивающего слоя для пайки, макет датчика теплового потока). Выявлена немонотонная зависимость морфологии от давления кислорода: при 10 Па — квазинепрерывная плёнка; при 50 Па — снова островковая. Проводящие плёнки получены также в аргоне (10 Па), что опровергает чисто химическую модель снижения порога перколяции. Предложен механизм, основанный на кинетике коалесценции и разрастания островков. Показано, что критический радиус зародыша $R_c \sim (E_k/J)^{1/3}$, где E_k — кинетическая энергия атомов, J — поток прилетающих на поверхность частиц. Снижение порога перколяции определяется газодинамикой лазерного факела.

Пятая глава посвящена газодинамике разлёта. Методом прямого статистического моделирования Монте-Карло рассчитаны поля концентрации золота и кислорода, показано формирование ударной волны. Выделены три режима: свободный разлёт (<1 Па), переходный (3–30 Па) и диффузионный (50–100 Па). Отношение E_k/J имеет локальный минимум при ~10 Па (переходный режим), что согласуется с экспериментальным оптимумом. В аргоне минимальное E_k/J выше, чем в кислороде, поэтому проводимость плёнок хуже. Увеличение расстояния мишень–подложка монотонно повышает E_k/J , ухудшая

условия роста. Увеличение радиуса лазерного пятна снижает E_k/J , способствуя формированию проводящих структур. В рамках ударно-волновой модели Предтеченского–Майорова получена оценка для отношения E_k/J , качественно согласующаяся с моделированием, но не описывающая немонотонность по давлению. Показано, что роль площади лазерного пятна как управляющего параметра ранее недооценивалась.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

Научная новизна исследования

Научная новизна диссертационной работы заключается в установлении закономерностей, связывающих параметры газодинамического разлёта продуктов лазерной абляции с процессами формирования структуры и свойств сверхтонких металлических покрытий.

В работе показано, что морфология и функциональные характеристики плёнок определяются не только поверхностными процессами, но и параметрами переноса частиц в газовой фазе.

Введён параметр, характеризующий соотношение кинетической энергии осаждаемых частиц и их потока, и установлена его связь с механизмами формирования плёнок.

Выявлено влияние давления и состава фонового газа, а также геометрических параметров лазерного воздействия на режимы разлёта факела и структуру покрытий.

Предложен механизм формирования сверхтонких плёнок, учитывающий конкуренцию процессов коалесценции и роста островков.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обеспечивается использованием современных экспериментальных методов исследования, включая морфологические, структурные и электрофизические методы анализа.

Численные результаты, полученные методом прямого статистического моделирования, согласуются с экспериментальными данными, что подтверждает корректность используемых моделей.

К числу сильных сторон работы следует отнести органичное сочетание экспериментальных исследований с численным моделированием методом Монте-Карло, обеспечившее высокую степень обоснованности полученных результатов. Реализация данного подхода стала возможной благодаря координированной работе соискателя под руководством научного руководителя и при участии научного консультанта, что способствовало эффективному объединению экспериментальных и теоретических методов.

Основные результаты работы опубликованы в рецензируемых журналах, а также апробированы на российских и международных конференциях.

Значимость полученных результатов для развития науки и практики

Полученные в диссертации результаты имеют значение для развития динамики разреженных газов и физики плазменно-газодинамических процессов.

Работа способствует углублению представлений о взаимосвязи процессов переноса вещества в газовой фазе и механизмов формирования тонких плёнок.

Практическая значимость результатов определяется возможностью их использования при разработке прозрачных проводящих покрытий, а также функциональных элементов оптоэлектронных устройств и датчиков.

Рекомендации по использованию результатов

Результаты диссертационной работы могут быть использованы:

- в научных организациях, занимающихся исследованиями в области механики газа и плазмы;
- при разработке технологий лазерного осаждения тонких плёнок;

- в учебном процессе при подготовке специалистов в области физики и механики разреженных сред.

Замечания по работе

1. В разделах 3.1 и 4.1 сравниваются вольт-амперные характеристики образцов (рис. 3.1 и 4.1) для разной толщины пленки. Однако размеры образцов не указаны, что затрудняет воспроизведение экспериментальных данных по измерению сопротивления пленок другими исследователями. Также неясно проводилось ли "донапыление" или использовались разные образцы для сравнения.
2. В численной части работы фоновый газ (молекулярный кислород) рассматривается как бесструктурная частица, то есть вращательные степени свободы молекул не учитываются. Как известно, это приводит к неверному значению показателя адиабаты для фонового газа, что может внести существенную ошибку в моделирование газодинамических процессов.
3. Кинетические энергии атомов золота достигают в расчетах 10 эВ и выше. Эти значения близки к энергии электронного возбуждения аргона и превышают пороги диссоциации, колебательного и электронного возбуждения кислорода. Отсутствие в модели учета этих процессов может внести существенные ошибки в оцениваемые параметры (среднюю кинетическую энергию и поток массы на поверхность мишени).
4. Недостаточно подробно описана численная методика. С какой температурой диффузно отражаются частицы фонового газа при отражении от поверхностей подложки и мишени? Температура пятна испарения в расчетах равнялась 20 000 К, означает ли это что молекулы фонового газа отражались от поверхности пятна испарения с такой температурой? В формулу диаметра столкновения входит температура; как определяется значение этой характерной температуры? Необходимо пояснить как вычислялись характерные диаметры при столкновении молекул разных сортов. В формуле числа выбранных пар на странице 35 отсутствует

множитель Δt . К тому же она представлена для однокомпонентного газа, а не для смеси, которая в реальности моделировалась. Кроме того, в диссертации не обсуждаются критически важные вопросы выбора параметров метода ПСМ и точности полученных результатов.

5. В литературе активно обсуждаются преимущества пико- и фемтосекундного лазерного напыления для получения более однородных и гладких покрытий за счёт изменения механизмов абляции и динамики плазменного шлейфа. В этой связи желательно ответить на вопрос, насколько целесообразен переход от наносекундного режима, использованного в диссертации, к более коротким импульсам для формирования ультратонких золотых плёнок, и в какой мере полученные закономерности и введённый параметр E_k/J могут быть перенесены на такие режимы?
6. Известно, что температура подложки существенно влияет на морфологию и сплошность ультратонких золотых плёнок, а в ряде работ показано, что подогрев или охлаждение подложки позволяет сдвигать толщину перехода от островковой структуры к сплошной. Возможно, использование контролируемого подогрева подложки является более простым способом управления перколяционным порогом по сравнению с детальной оптимизацией параметра E_k/J и газовой среды.

Заключение

Диссертационная работа Колосовского Данила Антоновича является завершённой научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача, имеющая значение для развития механики жидкости, газа и плазмы.

По своему содержанию и уровню выполнения диссертация соответствует требованиям, установленным Положением о присуждении ученых степеней (Постановление Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. в

действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации и включает основные полученные результаты.

Автор работы, Колосовский Данил Антонович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 — Механика жидкости, газа и плазмы.

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на заседании семинара «Теоретическая и прикладная механика» под руководством академика В.М. Фомина (протокол № 125 от 03 апреля 2026 г.).

Даем согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Колосовского Данила Антоновича и их последующую обработку.

Зам. директора по научной работе
к.ф.-м.н.
bond@itam.nsc.ru, +7 913 905 63 22

Бондарь Евгений Александрович

старший научный сотрудник лаборатории Вычислительной аэродинамики
к.т.н.
sasa@itam.nsc.ru, +7 913 934 59 02

Кашковский Александр Владимирович

научный сотрудник лаборатории Вычислительной аэродинамики
к.ф.-м.н.
shevr@itam.nsc.ru, +7 913 907 28 95

Шевырин Александр Анатольевич

старший научный сотрудник лаборатории Вычислительной аэродинамики

к.ф.-м.н.

zaitsev@itam.nsc.ru, +7 913 935 21 84

Зайцев Александр Васильевич

27 апреля 2026 г.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1

Телефон: 7 (383) 330-42-65

Эл. почта: admin@itam.nsc.ru

Сайт: <https://www.itam.nsc.ru/>

Подписи Бондаря Е.А., Кашковского А.В., Шевырина А.А. и Зайцева А.В. заверяю.

Ученый секретарь Института

к.ф.-м.н.

Кратова Юлия Владимировна

