



УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТ СО РАН
академик РАН Д.М. Маркович

«23» сентября 2025 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН)

Диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук «Влияние газодинамики разлета продуктов лазерной абляции на процесс осаждения и свойства проводящих покрытий» выполнена Колосовским Данилом Антоновичем в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Соискатель Колосовский Данил Антонович в 2021 г. с отличием окончил магистратуру ФФ НГУ по направлению подготовки 03.04.02 Физика. В период с 01.09.21 г. по 31.08.23 г. обучался в аспирантуре Института физики полупроводников им А. В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук. С 01.09.23 г. по 29.08.25 г. обучался в аспирантуре Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук. В период подготовки диссертации работал с 2023 г. в лаборатории разреженных газов ИТ СО РАН в должности инженера-исследователя, а с 2025 г. – в должности инженера в лаборатории физико-химических процессов в энергетике.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов по специальности 1.1.9 механика жидкости, газа и плазмы выдана в 2024 г. Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук Старинский Сергей Викторович, заведующий лабораторией физико-химических процессов в энергетике ИТ СО РАН. Научный консультант – доктор физико-математических наук Морозов Алексей Анатольевич, заведующий лабораторией разреженных газов ИТ СО РАН

По итогам обсуждения принято следующее **заключение**:

Цель работы

Выявить влияние режимов газодинамического разлёта продуктов абляции на формирование прозрачных проводящих покрытий при наносекундном лазерном осаждении.

Актуальность темы

Активное развитие микро- и нанoeлектроники с середины XX века играет ключевую роль в процессе цифровизации современного общества. Эти технологии стали фундаментом прогресса в ряде важнейших отраслей — от бытовой электроники и здравоохранения до автомобильной промышленности. Современные достижения в области полупроводников обеспечили высокую производительность и энергоэффективность, во многом благодаря появлению новых транзисторных архитектур и инновационных подходов к проектированию. Например, были созданы интегральные схемы с технологическими узлами в 3 нм (технология FinFET, реализованная компанией TSMC в 2022 году) и 2 нм (технология Gate-All-Around FET, TSMC, 2024 год).

Тем не менее дальнейшее развитие микро- и нанoeлектроники всё чаще ограничивается не столько архитектурными решениями, сколько фундаментальными свойствами материалов и межфазными взаимодействиями. Эти ограничения проявляются в самых разных аспектах. В транзисторных гетероструктурах они привели к необходимости замены традиционного SiO₂ на *high-k*-материалы. Схожие трудности возникают и в области оптоэлектроники: переход к гибким устройствам обострил проблему получения тонких, прозрачных, одновременно проводящих и гибких покрытий. Традиционно в качестве прозрачных электродов использовались покрытия оксида индия-олова (ITO), однако их высокая хрупкость и низкая механическая гибкость делают их непригодными для новых поколений гибких органических светодиодов, фотодетекторов и тонкоплёночных солнечных элементов. В этой связи особый интерес представляют сверхтонкие (толщина < 10 нм) металлические покрытия. Среди различных металлов именно золото является одним из наиболее перспективных кандидатов: оно сочетает высокую электропроводность и химическую стойкость, устойчиво к окислению, а также традиционно используется в кремниевой электронике как материал для контактов. Такая совместимость делает золотые плёнки особенно привлекательными для применения в качестве гибких прозрачных электродов и функциональных наноструктур в оптоэлектронике.

Реализация таких покрытий на типичных для микро- и нанoeлектроники подложках, таких как кремний или кварц, связана не только с технологическими трудностями, но и с

более общей фундаментальной проблемой — особенностями роста металлов на несмачивающих поверхностях. При осаждении золота из газовой фазы на кремний или кварц реализуется механизм роста Вольмера–Вебера. В результате формируется островковая морфология, а сплошное покрытие появляется лишь при толщине порядка 10–12 нм, что недопустимо для практических приложений.

Для решения этой проблемы предложено несколько подходов. Один из них — предварительное осаждение из газовой фазы смачивающих подслоёв, которые увеличивают поверхностную энергию подложки и подавляют островковый механизм роста. В качестве таких подслоёв используются материалы MoS_2 , CuO , MoO_3 , SU-8, Ti, Cr, графен, ZnO:Al , Ni, ITO, различные полимеры. Альтернативный метод — криогенное охлаждение подложки во время осаждения, что ограничивает поверхностную диффузию адатомов, способствует формированию мелких устойчивых нанокластеров и, как следствие, сплошных плёнок. Хотя оба подхода позволяют получить проводящие золотые плёнки толщиной порядка 2 нм, они обладают рядом ограничений. Подслои могут вызывать нежелательные оптические потери и не всегда совместимы с требованиями, предъявляемыми к гетероструктурам в оптоэлектронике. Их нанесение также сопряжено с технологическими трудностями. Использование криогенных температур, в свою очередь, может вызывать механические напряжения, трещины и деляминацию слоёв в многослойных структурах. Таким образом, несмотря на достигнутые успехи, ранние попытки решения этой задачи лишь частично обходили проблему, но не затрагивали её фундаментальную природу. Во всех случаях исходный механизм осаждения определяется динамикой газовой и плазменной среды, в которой происходит рост покрытия. Следовательно, для понимания и управления процессом необходимо анализировать его с позиции механики газа и плазмы.

Среди многочисленных технологий осаждения особое место занимает наносекундное лазерное осаждение, представляющее собой модельную систему для исследований в области механики газа и плазмы. В процессе наносекундного лазерного осаждения импульс высокой плотности энергии приводит к локальной абляции мишени, формированию неравновесной газовой струи продуктов абляции и последующему взаимодействию с окружающей разреженной газовой средой и подложкой. Газодинамика этого факела носит неравновесный, нестационарный и многокомпонентный характер: она включает расширение плазмы в вакуум или газ, образование ударных волн, а также взаимодействие ионов, атомов и кластеров в потоке.

Ключевая особенность наносекундного лазерного осаждения заключается в том, что именно параметры газодинамического потока — распределение скоростей ионов, давление и состав фона, длина пробега частиц, условия рекомбинации и охлаждения — определяют

коэффициент поверхностной диффузии адатомов и механизм роста плёнки. Таким образом, морфология покрытия и его электрофизические свойства во многом определяются газодинамическими процессами при разлете лазерного факела, а задача формирования сплошных сверхтонких плёнок на несмачивающихся подложках является частным случаем более общей задачи газодинамического управления свойствами получаемых покрытий при лазерной абляции.

Стоит отметить, что газодинамические процессы развиваются в микросекундных и субмикросекундных масштабах времени, что делает их прямое экспериментальное наблюдение крайне затруднительным: даже использование сверхскоростных камер не всегда позволяет зафиксировать эволюцию факела. В этой связи анализ морфологии и свойств осаждённых плёнок может быть использован для изучения газодинамики лазерной абляции. При этом особую значимость представляет численное моделирование, позволяющее воспроизводить и анализировать динамику разлёта продуктов абляции и их взаимодействие с газовой средой.

Изучение динамики разлёта продуктов лазерной абляции имеет двойное значение. С одной стороны, оно связано с решением фундаментальной задачи механики жидкости, газа и плазмы — исследованием процессов переноса массы, импульса и энергии в сильно нестационарных плазменно-газодинамических потоках. С другой стороны, полученные газодинамические результаты позволяют объяснить механизм формирования сплошных покрытий методом наносекундного лазерного осаждения и приблизиться к созданию сплошных металлических покрытий толщиной 2–3 нм, востребованных в современной микро- и нанoeлектронике. Поэтому тема диссертационной работы является **актуальной**.

Личный вклад автора

Постановка задач диссертационного исследования осуществлялась совместно с научными руководителями д.ф.-м.н. Старинским С.В. и д.ф.-м.н. Морозовым А.А. Экспериментальные данные, использованные в работе, получены соискателем лично либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в разработке и последующей модификации экспериментальных стендов. Газодинамическое моделирование разлёта продуктов абляции в условиях лазерного испарения выполнялось соискателем как самостоятельно, так и совместно с д.ф.-м.н. Морозовым А.А.

Поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследовать динамику разлета газа при наносекундном испарении в вакууме и разреженном фоновом газе в зависимости от фонового давления, расстояния мишень

- подложка и площади лазерного пятна на основе прямого статистического моделирования методом Монте-Карло.
2. Установить взаимосвязь между результатами прямого статистического моделирования методом Монте-Карло газодинамического разлета продуктов лазерной абляции со структурой и свойствами получаемых покрытий.
 3. Предложить механизм формирования сверхтонких плёнок золота, обусловленный газодинамическим разлетом лазерного факела.
 4. Получить проводящие тонкие и сверхтонкие плёнки золота на несмачивающихся подложках для использования в качестве прозрачных и непрозрачных электродов и нагревательных элементов.

Достоверность полученных результатов подтверждается применением современных методов экспериментальной диагностики и использованием высокоточного измерительного оборудования. Исследования проводились в режимах, обеспечивающих устойчивую воспроизводимость результатов, что позволяет сопоставлять их с данными, представленными в опубликованных работах по данной тематике. Корректность полученных численных данных дополнительно проверена путём сравнения с результатами расчётов, выполненных другими авторами с использованием различных численных методов.

Научная новизна

- Показано, что формирование сверхтонких проводящих металлических плёнок определяется параметрами газодинамического переноса частиц, а не исключительно поверхностными или химическими эффектами фонового газа. Введён и экспериментально обоснован газодинамический параметр E_k/J , связывающий кинетическую энергию E_k и поток осаждаемых частиц J с морфологией роста и порогом перколяции плёнки.
- Выявлена немонотонная зависимость морфологии сверхтонких золотых плёнок от давления фонового газа, обусловленная сменой газодинамических режимов разлёта лазерного факела в разреженной атмосфере.
- Установлено, что площадь лазерного пятна влияет на газодинамику разлета факела и, как следствие, определяет морфологию и порог перколяции сверхтонких металлических плёнок.

- Предложен механизм формирования сверхтонких плёнок, основанный на конкуренции процессов коалесценции и разрастания островков, управляемой соотношением кинетической энергии прилетающих частиц и их потока.
- Впервые получены сверхтонкие проводящие пленки золота толщиной 3 нм на несмачивающихся подложках при комнатной температуре без использования смачивающих слоёв методом наносекундного лазерного осаждения.

Научная и практическая значимость работы

Научная значимость работы проявляется в развитии и углублении научных представлений о газодинамике процессов, сопровождающих наносекундное лазерное осаждение различных материалов. В работе проанализировано влияние динамики разлёта продуктов абляции на механизмы формирования сверхтонких проводящих покрытий. На основе полученных результатов предложена модель, описывающая взаимосвязь разлёта продуктов абляции с процессами осаждения и формированием функциональных тонкоплёночных покрытий.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью применения полученных данных при разработке прозрачных проводящих покрытий для использования в качестве прозрачных электродов в оптоэлектронных и фотоэлектронных устройствах. К практическим результатам работы относится экспериментальная демонстрация возможности формирования полупрозрачных и прозрачных нагревателей на основе сверхтонких плёнок золота, а также датчиков теплового потока на основе плёнок YBCO с золотыми контактами.

Основные публикации автора по материалам диссертации:

1. **Kolosovsky D. A.**, Zalyalov T. M., Ponomarev S. A., Zhivodkov Yu. A., Shukhov Yu. G., Morozov A. A., Starinskiy S. V. Controlling the percolation threshold in adhesion-layer-free room-temperature nanosecond pulsed laser deposition of ultrathin gold films // *Applied Surface Science*. — 2026. — Vol. 719. — Art. 165049. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.165049.
2. **Kolosovsky D. A.**, Zalyalov T. M., Ponomarev S. A., Miskiv N. B., Morozov A. A., Shukhov Yu. G., Shevlyagin A. V., Kuchmizhak A. A., Starinskiy S. V. Adhesion layer free room-temperature pulsed laser deposition of ultrathin Au films // *Applied Surface Science*. — 2025. — Vol. 698. — Art. 163077. — DOI: 10.1016/j.apsusc.2025.163077.
3. **Колосовский Д. А.**, Пономарев С. А., Живодков Ю. А., Голяшов В. А., Егиян С. Р., Старинский С. В. Датчик теплового потока на основе тонкой плёнки YBCO // *Автометрия*. — 2025. — Т. 61, № 6. — С. 33–42. — DOI: 10.15372/AUT20250604.

4. Колосовский Д. А., Старинский С. В. Полупрозрачный нагреватель на основе тонких плёнок золота // *Автометрия*. — 2024. — Т. 60, № 4. — С. 26–37. — DOI: 10.15372/AUT20240404.
5. Колосовский Д. А., Старинский С. В., Миськив Н. Б. Устройство для создания полупрозрачного нагревателя на основе тонких плёнок благородных металлов методом импульсной лазерной абляции: патент РФ на изобретение № 2025104471 / 05. — Заявл. 27.02.2025. — Оpubл. 2026. — Патентообладатель: ФГБУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН.

Апробация работы

Основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, были представлены и апробированы на международных и всероссийских научных конференциях: Международная конференция по актуальным проблемам физики и технологии полупроводниковых наноструктур (Новосибирск, 2024); 15-ая Международная научно-практическая конференция по физике и технологии наногетероструктурной СВЧ-электроники «Мокеровские чтения» (Москва, 2024); XXVII Международная научно-техническая конференция по фотоэлектронике и приборам ночного видения (Москва, 2024); Всероссийская конференция с международным участием «XL Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2024); XVI Российская конференция по физике полупроводников (Санкт-Петербург, 2024); The first Siberian-Attica International Workshop on Laser Processing for Thermophysical Applications (Novosibirsk-Athens, 2024); XI International Scientific Conference «Actual Problems of Solid State Physics» (Minsk, Belarus, 2025); Российская конференция и школа молодых ученых по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2025» (Новосибирск, 2025); X Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Сочи, 2025), Всероссийская конференция «XLI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2025); Второй семинар по неравновесным течениям, посвященный 80-летию со дня рождения М.С. Иванова (Новосибирск, 2025).

Решение о рекомендации работы к защите

Диссертация «Влияние газодинамики разлета продуктов лазерной абляции на процесс осаждения и свойства проводящих покрытий» Колосовского Данила Антоновича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы (физико-математические науки).

Заключение принято на заседании семинара секции №4 «Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы» Ученого совета Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН) под руководством члена-корреспондент РАН, д.ф.-м.н. Кабова Олега Александровича.

Присутствовало на заседании 23 человека, в том числе 1 член-корреспондент РАН, 8 докторов наук, 10 кандидатов наук. Результаты голосования: «за» - 23 человек, «против» - нет, «воздерж.» - нет, протокол № 6-2025 от «19» сентября 2025 г.

Председатель семинара

д.ф.-м.н., профессор, чл. корр. РАН, Советник директора по научным вопросам, г.н.с., председатель секции Учёного совета ИТ СО РАН «Космическая энергетика, разреженные газы, плазма, микро- и наносистемы»

Кабов О.А.

Секретарь семинара

к.ф.-м.н., заведующий лабораторией энергоэффективных технологий для наземных и космических применений ИТ СО РАН

Чеверда В.В.