

УТВЕРЖДАЮ:

Директор Института
теплофизики УрО РАН

к.ф.-м.н.

Захаров М.С.

августа 2025 г.



ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки – Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук на диссертацию **Родионова Алексея Александровича** «Плазменно-индуцированные эффекты при наносекундной лазерной абляции и их роль в формировании супергидрофильных структур», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы

В настоящее время особое внимание уделяется использованию лазерного излучения для получения новых функциональных поверхностей с заданными свойствами, востребованных в различных практических приложениях. Лазерная абляция один из перспективных способов получения поверхностей с заданной нано- и микроструктурой, что важно для получения гидрофобных и гидрофильных поверхностей, а так же различных комбинаций таких свойств на одной поверхности. Метод импульсной лазерной абляции позволяет получать поверхности с высокой чистотой и воспроизводимостью морфологии, а так же позволяет контролировать процесс структурирования поверхности, благодаря чему можно получать материалы с уникальными поверхностными свойствами, на пример, сочетающих особую смачиваемость и низкую светопоглощающую способность. Материалы с такими свойствами востребованы в таких областях как солнечная энергетика, оптоэлектроника, авиационная промышленность и др.

Управление структуризацией вещества на микронном и субмикронном уровне требует детального понимания сложных и сверхбыстрых процессов протекающих при импульсной лазерной абляции на различных этапах, включая поглощение лазерного излучения, разогрев и абляцию облучаемого материала, разлет и конденсацию лазерного факела. Так же важным

фактором является выявление влияния внешней среды на доставку излучения, кинетику испарения и разлета лазерного факела, динамику движения лазерного факела. Все это позволяет заключить, что исследования в области получения поверхностей с заданной топологией методом лазерной абляции являются **актуальными**.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа изложена на 110 страницах, включая 45 рисунков и одну таблицу. Список цитируемой литературы содержит 159 наименований.

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна работы, представлены научные положения, выносимые на защиту, приведена научная и практическая значимость работы и дано обоснование их достоверности.

Первая глава диссертации посвящена анализу особенностей взаимодействия лазерного излучения с веществом и содержит обоснование применения импульсной лазерной абляции для достижения целей и задач диссертации. Рассматриваются ключевые параметры для контролируемого лазерного синтеза нанокompозитных материалов. Описаны ключевые параметры для лазерной обработки, а также свойства и области потенциального применения черного кремния. Представлены нерешенные вопросы, на решение которых направлена работа.

Во второй главе описаны экспериментальные стенды, используемые материалы, методы анализа образцов и численное моделирование испарения кремния. Экспериментальные стенды позволяли выполнять лазерный синтез в средах различных газов и при различных температурах образцов, что позволяло управлять химическим составом и структурой поверхности. Для анализа образцов были использованы сканирующая электронная микроскопия, энергодисперсионный анализ, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье, эллипсометрия, спектрофотометрия, оптическая микроскопия, а также высокоскоростная и CCD-камера. Кроме того, описана разработка и реализация трехкоординатной системы позиционирования, необходимой для проведения экспериментов, а так же проведено моделирование нагрева и испарения кремниевой мишени под действием наносекундных лазерных импульсов. Представлена численная модель нагрева и испарения кремниевой мишени под действием наносекундных лазерных импульсов. Основу модели составляет решение нестационарного уравнения теплопроводности с объёмным выделением энергии лазерного импульса.

Третья глава посвящена контролируемому осаждению нанокompозитных материалов. В главе приведен детальный анализ факторов, влияющих на процесс лазерного осаждения покрытий с управляемыми оптическими, химическими и морфологическими характеристиками. Рассмотрены механизмы формирования покрытий, включая влияние плотности энергии лазерного излучения, давления и состава фоновых газа, а также температуры области синтеза. Проведенные эксперименты позволили установить основные закономерности, определяющие морфологию, толщину, степень окисления и структуру осаждаемых плёнок.

Четвертая глава посвящена созданию покрытий методом лазерной абляции, в том числе влиянию фоновых условий на свойства смачивания поверхностей, получение супергидрофильных, супергидрофобных и бифильных поверхностей методом импульсной лазерной абляции, области применения полученных материалов. Показано, что наноструктуры оксида алюминия формировались на поверхности методом импульсной лазерной абляции в фоновом кислороде. Лазерная обработка монокристаллического кремния в некотором диапазоне плотностей энергии позволяет формировать супергидрофильные иерархические микро- и наноструктурированные поверхности или микроструктуры (черный кремний) с повышенным коэффициентом поглощения, а так же микроструктур (серый кремний) с сохранением и супергидрофильных свойств и повышенным коэффициентом поглощения при других плотностях энергий лазерного излучения. Определены области практического применения полученных материалов. Напыление фторполимерного покрытия на супергидрофильную поверхность обеспечивает переход к супергидрофобному состоянию. Селективное лазерное удаление позволяет формировать бифильные структуры с чёткими границами между зонами различной смачиваемости; найдены параметры воздействия, исключающие повреждение супергидрофильного кремния. Такие структуры демонстрируют эффективность в теплообменных задачах, обеспечивая локализацию центров парообразования. Показано, что абляция алюминия в атмосфере кислорода приводит к формированию на металлических сетках функционального покрытия оксида алюминия, с комбинированными гидрофобно-олеофильными свойствами смачивания, обеспечивающего эффективную сепарацию водонефтяных эмульсий.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

Соискателем получен ряд оригинальных результатов, определяющих **научную новизну** диссертации:

1. Установлено, что наличие на поверхности наночастиц серебра и каталитических наночастиц золота не влияет на степень окисления осаждаемых на их поверхность покрытий, в отличие от температуры подложки, повышение которой с 20 до 600 °С приводит к росту стехиометрического коэффициента с 1,4 до 2.
2. Впервые показана возможность синтеза прозрачных, коэффициент пропускания свыше 60% в видимом и ИК диапазонах, супергидрофильных покрытий на основе оксида алюминия методом лазерной абляции алюминия в фоновом кислороде.
3. Установлена взаимосвязь между массовым потоком аблированного кремния и диапазоном плотности энергии лазерного излучения (1–4 Дж/см²), при котором формируется конусообразная микроструктура, типичная для «чёрного кремния».
4. Впервые обнаружена и теоретически обоснована немонотонная зависимость массового потока аблированного кремния на длине волны 532 нм вблизи его порога модификации (0,5 Дж/см²).

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы заключается в развитии представлений о процессах, протекающих в ходе наносекундной лазерной абляции. Особое внимание уделено изучению влияния плазменной экранировки на массовый поток аблированного вещества. Совокупность накопленных данных позволит более точно управлять процессами, протекающими в ходе лазерной абляции и, как следствие, улучшить контроль над процессом осаждения материала.

Практическая значимость работы обусловлена возможностью использования полученных данных для создания покрытий, применяемых для задач сепарации водонефтяных эмульсий, интенсификации теплообмена, плазмоники (оптические фильтры), самоочистки. К важным практическим результатам можно отнести демонстрацию возможности создания супергидрофильных покрытий, обладающих высокой прозрачностью в видимом и ИК диапазонах, а также супергидрофильных поверхностей с повышенным коэффициентом поглощения.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием надежных методов диагностики, высокоточного оборудования, анализом неопределенностей, сравнением полученных данных с исследованиями других авторов, а так же высокой воспроизводимостью. Результаты аналитических расчетов и численного моделирования качественно и количественно описывают полученные экспериментальные данные.

Положения, выносимые на защиту подкреплены экспериментальными данными и теоретическими выкладками.

Существенных замечаний к материалам диссертационной работы нет. По содержанию диссертации возникли следующие вопросы:

1. Во второй главе дан очень краткий обзор большого числа экспериментальных стендов. До конца не понятно, какие из них использовались непосредственно диссертантом и какие именно результаты были получены на различном оборудовании. Кроме того, неопределенностям измерений уделено лишь полстраницы диссертационной работы, тогда как перечень используемого оборудования способного влиять на защищаемые положения, внушительный.
2. На рис. 3.6. диссертационной работы (рис. 5 автореферата) приведена зависимость толщины пленки от расстояния до пучка, полученные двумя методами измерений. Из рисунка видно, что зависимости полученные спектральной эллипсометрией сравниваются с одним измерением по методу сканирующей электронной микроскопии, что является некорректным.
3. В работе уделено очень мало внимания диапазону применения получаемых покрытий. Фактически нет никаких данных об их химической устойчивости, времени жизни и механическому истиранию.
4. В тексте диссертационной работы встречаются опечатки и грамматические ошибки.

Заключение

Диссертация **Родионова Алексея Александровича** является законченной научно-квалификационной работой, в которой последовательно исследованы сложные процессы тепломассообмена при наносекундном лазерном синтезе функциональных материалов в вакууме, фоновом газе и жидкости. Основные результаты работы опубликованы в 6 печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий. Проведена хорошая апробация работы на международных и всероссийских конференциях.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Исходя из актуальности, новизны, научной и практической значимости представленной работы, можно сделать заключение, что диссертация «Плазменно-индуцированные эффекты при наносекундной лазерной абляции и их роль в формировании супергидрофильных структур», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, выполнена на высоком научном уровне. Она отвечает требованиям п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а

ее автор **Родионов Алексей Александрович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на расширенном научном семинаре Института теплофизики УрО РАН 11 августа 2025 г., протокол №1. На заседании присутствовало 18 человек, в том числе 5 докторов наук по профилю диссертации

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией фазовых переходов и неравновесных процессов
ФГБУН Института теплофизики
Уральского отделения Российской
академии наук, доктор физико-
математических наук (1.3.14 –
Теплофизика и теоретическая
теплотехника)

Виноградов Андрей Владимирович