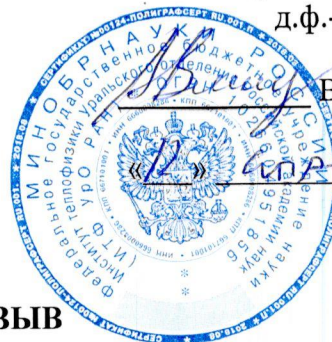


УТВЕРЖДАЮ:
Директор Института
теплофизики УрО РАН
Д.Ф.-М.Н.



Виноградов А.В.

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки – Института теплофизики Уральского отделения Российской академии наук на диссертацию Старинского Сергея Викторовича «Тепломассообмен при синтезе функциональных материалов наносекундными лазерными импульсами», представленной на соискание ученой степени доктора 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 механическими и теплофизическими свойствами, востребованных в различных практических приложениях. Например, для практического применения в процессах тепломассообмена важной задачей остается разработка методов получения бифильных, микро- и наноструктурированных интенсифицирующих поверхностей кипения и испарения. Одним из доступных и надежных методов получения таких поверхностей является импульсная лазерная абляция.

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. Исследование импульсной лазерной абляции в вакууме, фоновом газе и жидкости в идентичных условиях облучения, является **актуальным** как для понимания процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, так и для развития и оптимизации лазерного синтеза перспективных микро- и наноструктурированных функциональных поверхностей. Таким образом, поставленная в диссертационной работе цель и решенные задачи представляются **актуальными**.

Общая характеристика диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа изложена на 234 страницах, включая 125 рисунка. Список цитируемой литературы содержит 477 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.

В первой главе представлен обзор механизмов наносекундной лазерной абляции, рассмотрен вопрос использования наносекундной лазерной абляции для напыления тонких пленок. Далее представлен обзор работ, посвященных лазерной обработке поверхностей для управления их характеристиками. Следующий раздел главы посвящен описанию импульсной лазерной абляции веществ в жидкости. В заключительном разделе автором обозначены нерешенные проблемы.

Во второй главе описаны экспериментальные и теоретические подходы, используемые в работе. Дано описание экспериментальных стендов и методик измерения порогов модификации, отражательных характеристик мишеней; удаленной за импульс массы материала, ее углового распределения при разлете в вакууме; времяпролетной масс-спектрометрии продуктов абляции в вакууме и фоновом газе. Приводится описание экспериментального стенда для обработки поверхностей в различных средах и лазерного осаждения тонких пленок. Описаны методики анализа полученных образцов. Приведено описание экспериментальной установки по изучению взаимодействия капель жидкости с полученными поверхностями. Представлен анализ неопределенности измерений. Для описания нагрева мишени и процесса испарения металла под действием наносекундных лазерных импульсов выбрана тепловая модель, основанная на решении нестационарного уравнения теплопроводности. Для случая облучения мишеней в жидкости учитывается перегрев и гомогенное вскипание жидкости. Для описания результатов измерения оптических свойств синтезированных материалов реализована теоретическая модель на базе теории Ми, которая представляет собой точное решение задачи рассеяния электромагнитной волны на металлической сфере произвольного радиуса, помещенной в диэлектрическую среду. Для учета взаимовлияния частиц выполнены численные расчеты методом конечных размерностей во временной области с применением программного пакета.

В третьей главе представлены результаты исследования лазерной абляции серебра, золота и их сплавов в режимах осаждения тонких пленок. Приводятся данные о составе лазерного факела при абляции серебра, золота и их сплавов в атмосфере разреженного фоновых газа. Показаны результаты исследования влияния температуры фоновых газа в диапазоне 20 – 400 °С на состав продуктов лазерной абляции металлов. Далее представлены результаты изучения лазерной абляции серебра и золота с применением различных экспериментальных методик и приведен теоретический анализ лазерной абляции с помощью тепловой модели. Затем приводятся результаты исследований по влиянию плотности энергии лазерного излучения на эмиссию микрокапель. Анализируются результаты времяпролетных измерений. Далее обсуждаются процессы формирования пленок золота и серебра при их лазерном осаждении в вакууме и атмосфере фоновых газа. Затем рассматриваются оптические свойства полученных наноструктурных пленок. Обсуждается влияние температуры синтеза пленок на средний размер наночастиц. Заключительный раздел главы посвящен использованию синтезированных плазмонных покрытий для поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния света (SERS).

В четвертой главе представлены результаты исследования лазерного структурирования поверхностей при импульсной лазерной абляции в атмосфере фоновых

газа и влияние лазерного воздействия на поверхность различных материалов с целью управления их свойствами смачивания. Представлено сопоставление модификации поверхности монокристаллического кремния в воздухе пучками различной длины волны ИК и видимого диапазона. Далее рассмотрено влияние фонового газа (воздух, кислород и аргон) на морфологию и анализируется влияние параметров фонового газа на окисление продуктов абляции. Затем представлены результаты обработки поверхности кремния и металлов для достижения супергидрофильных свойств. Обсуждается функционализация супергидрофильных материалов для изменения свойств смачивания. Далее приводятся результаты исследования взаимодействия капель воды с поверхностью с различной смачиваемостью. Заключительный раздел главы посвящен созданию материалов с контрастной смачиваемостью.

Пятая глава посвящена исследованию тепломассобмена при лазерном воздействии на металл, погруженный в воду. Глава начинается с обсуждения результатов синтеза коллоидных растворов при абляции мишеней – золота, серебра, олова и сплавов на основе золота и серебра. Далее анализируются пороги модификации исследуемых металлов в различных средах. Показано, что пороги модификации исследуемых металлов и сплавов в воде, примерно 1,5 раза, выше соответствующих показаний в воздухе. Затем приводится сопоставление результатов численного моделирования лазерного нагрева мишеней в воде и воздухе. Проведено моделирование нагрева и плавления металлов для анализа роли жидкости при лазерном облучении металлов, погруженных в воду. В заключительном разделе главы приводятся результаты исследования уноса массы при абляции олова. Показано, что наночастицы металла в растворе могут формироваться в условиях, когда мишень не испаряется.

В **заключении** приведены основные результаты работы.

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

1. Получены новые данные о кластерном составе лазерного факела при абляции серебра, золота и их сплавов в вакууме и атмосфере фонового газа. Показано, что кластеры являются центрами конденсации для поступающих на поверхность атомов при формировании осаждаемого покрытия.
2. Впервые сопоставлена кинетика разлета продуктов абляции серебра, золота и их сплавов. Установлено, что времяпролетные распределения атомов благородных металлов идентичны при абляции простого вещества и сплава в вакууме лазерными импульсами с плотностью энергии 3-10 Дж/см².
3. Обнаружено формирование периодической микроструктуры при облучении монокристаллического кремния лазерными импульсами. Предложен механизм формирования таких микроструктур.
4. Экспериментально доказано, что гидрофилизация поверхности материалов при наносекундной лазерной абляции обусловлена возвращением продуктов абляции на мишень после взаимодействия с внешней средой.
5. Показано, что увеличение необходимой интенсивности излучения для лазерного плавления тугоплавких металлов пучками наносекундной длительности в воду обусловлено тем, что гомогенное вскипание жидкости происходит раньше, чем достигается температура плавления металла. Вскипание воды не влияет на модификацию поверхности металлов с температурой плавления ниже температуры

предельного перегрева воды, так как образования парового слоя происходит после плавления мишени.

6. Проведено сравнение механизмов лазерной абляции металлов в различных средах на основании данных о массе аблированного вещества в зависимости от интенсивности излучения. Впервые зарегистрировано образование коллоидных наночастиц металла в воде при облучении олова пучками с плотностью энергии, недостаточной для испарения мишени.

Теоретическая и практическая значимость работы

Научная значимость работы связана с более глубоким пониманием процесса тепломассообмена при воздействии на материалы высококонцентрированными потоками энергии. Полученные результаты позволяют проследить последовательность быстро протекающих процессов при наносекундном лазерном воздействии на вещество в различных средах. Новые результаты работы дополняют представления о механизмах наносекундной лазерной абляции в вакууме, фоновом газе и жидкости.

Практическая значимость работы заключается в предложенных подходах к созданию перспективных материалов для прикладного использования. Продемонстрировано перспективность использования стойких супергидрофильных поверхностей для интенсификации теплообмена при кипении и испарении. Созданы бифильные материалы для управления обтеканием в докавитационных режимах. Синтезированные поверхности для поверхностно-усиленной спектроскопии комбинационного рассеяния света (SERS) могут быть использованы в биомедицинских приложениях и медицинской диагностике.

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

Научные положения, выносимые на защиту подкреплены экспериментальными данными и теоретическими выкладками.

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

1. Согласно результатам исследования углового разлета лазерного факела, представленного в пп.3.3, можно ожидать неравномерное осаждение продуктов абляции на поверхность подложек. Однако, в пп 3.8 – 3.11 диссертации, посвященных влиянию условий облучения на топологические характеристики осаждаемых покрытий, этот вопрос не обсуждается. Как обеспечивалась равномерность осаждения с учетом конечного углового распределения?
2. В Главе 5 диссертации сопоставляются «пороговые» плотности энергии излучения для модификации материалов в воде и воздухе. Возникает вопрос – учитывалось ли рассеяние излучения по мере прохождения пучка в слое жидкости? Не связано ли увеличение порогов модификации в воде именно с этим процессом?

Заключение

Диссертация Старинского Сергея Викторовича 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 30 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 «Тепломассообмен при синтезе функциональных материалов наносекундными лазерными импульсами», представленная на соискание ученой степени доктора 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 докторским диссертациям, а ее автор Старинский Сергей Викторович **заслуживает** присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Настоящий отзыв обсужден и одобрен на научном семинаре Института теплофизики УрО РАН 11 апреля 2023 г., протокол №1. На заседании присутствовало 18 человек, в том числе 9 докторов наук по профилю диссертации.

Отзыв составил:

Заведующий лабораторией криогеники
и энергетики ФГБУН Института
теплофизики Уральского отделения
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук
(1.3.14 – Теплофизика и теоретическая
теплотехника)



Гасанов Байрамали Мехрали оглы

12.04.2023