

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата технических наук, заместителя директора, доцента
Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов ФГАОУ ВО
«Национального исследовательского Томского политехнического университета»
Феоктистова Дмитрия Владимировича
на диссертационную работу **Родионова Алексея Александровича «Плазменно-
индуцированные эффекты при наносекундной лазерной абляции и их роль в
формировании супергидрофильных структур»**,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Актуальность темы диссертации

Разработка теплотехнических систем и устройств нового поколения способных отводить тепловые потоки высокой плотности невозможна без развития фундаментальных знаний в области создания принципиально новых теплопередающих поверхностей, характеризующихся уникальными функциональными свойствами. Современные наукоемкие лазерные технологии относятся к прорывным технологиям в области микротекстурирования поверхностей металлов и кремния. Уже достигнутые к настоящему времени результаты показывают, что для решения актуальных задач в области теплотехники, теплофизики и теплоэнергетики лазерные технологии находятся вне конкуренции, поскольку позволяют получить результаты, которые с использованием других технологий либо трудно реализуемы, либо вовсе недостижимы. Диссертационная работа Родионова А.А. вносит вклад в эту область, поскольку в ней исследованы механизмы формирования супергидрофильных структур на основе кремния методом наносекундной лазерной абляции, что напрямую связано с интенсификацией теплообмена в условиях, испарения, кипения и конденсации. Полученные в работе результаты по созданию микроструктурированных поверхностей с контролируемой смачиваемостью и оптическими свойствами открывают новые возможности для разработки эффективных теплообменных аппаратов, способных работать в экстремальных условиях. Особую актуальность приобретают результаты исследования влияния параметров лазерной обработки на формирование черного кремния, что имеет непосредственное отношение к солнечной энергетике и системам преобразования тепловой энергии. В связи с вышеперечисленным тема диссертации Родионова А.А. актуальна, полученные результаты вносят вклад в решение задач теплофизики по созданию принципиально новых теплопередающих поверхностей с заданными приповерхностными свойствами для интенсификации теплообмена.

Новизна диссертационной работы

Родионов А.А. разработал подход к синтезу прозрачных (в видимом и ИК диапазонах) супергидрофильных покрытий на основе оксида алюминия методом наносекундной лазерной абляции алюминия в фоновом кислороде. Также им разработана методика получения кремния с коэффициентом поглощения ~90% в широком спектральном диапазоне.

Достоверность обеспечивается согласованностью полученных экспериментальных данных с известными, применением калиброванного и поверенного оборудования, непротиворечивостью, единством и логическими функциональными связями характеристик физико-химических превращений.

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. Результаты диссертационного исследования Родионова А.А. являются основой для решения актуальных проблем теплотехники и теплофизики – интенсификации процессов теплообмена, испарения и кипения теплоносителей за счет формирования заданных характеристик и приповерхностных свойств поверхностей теплообмена.

Объём и структура диссертации

Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список сокращений и литературы, изложена на 110 страницах, содержит 45 рисунков, 1 таблицу, список литературы из 159 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи, изложены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены физические основы взаимодействия наносекундного лазерного излучения с веществом, особенности ИЛА и условия, определяющие морфологию и состав формируемых структур, а также свойства и применение чёрного кремния. Определены нерешённые вопросы, связанные с управлением процессами, протекающими в плазме и на подложке.

Вторая глава описывает экспериментальные установки и методы анализа, стенды для ИЛА в различных газовых средах и при повышенной температуре. Также приведено описание трёхкоординатной системы позиционирования с блоком управления на базе Arduino Nano и пользовательским интерфейсом. Приведены методики СЭМ, ЭДС-анализа, ИК-спектроскопии, эллипсометрии, спектрофотометрии.

В третьей главе исследовано влияние фонового газа, температуры и каталитических наночастиц на морфологию и состав покрытий. Показано, что наночастицы Ag и Au не влияют на степень окисления, тогда как повышение температуры подложки с 20 до 600 °С увеличивает стехиометрический коэффициент с 1,4 до 2. Выявлено, что состав фонового газа и температура области синтеза существенно влияют на степень окисления плёнок, а механизмы окисления в основном реализуются в фоновом газе.

В четвёртой главе представлены результаты синтеза прозрачных супергидрофильных покрытий на основе Al_2O_3 методом ИЛА алюминия в кислороде, с коэффициентом пропускания свыше 60 % в видимом и ИК диапазонах и измеренном статическим углом < 5°, а также гидрофобных поверхностей на их основе. Приведены результаты синтеза «чёрного кремния» с коэффициентом поглощения ~90 % и супергидрофильными свойствами. Установлена взаимосвязь между массовым потоком аблированного кремния и диапазоном плотности энергии, а также обнаружена немонотонная зависимость массового потока вблизи порога модификации при 0,5 Дж/см², объяснённая влиянием плазменной экранировки.

Замечания и вопросы по диссертационной работе, имеющие дискуссионный характер

1. В первой главе диссертации содержится информация о применении черного кремния преимущественно для решения проблем обледенения, солнечной энергетики. При этом практически отсутствует анализ его потенциала и существующих исследований для задач теплофизики (теплопроводность, конвективный теплообмен, тепловое излучение, фазовые переходы). Хотя в четвертой главе приводится небольшой анализ использования поверхностей теплообмена из кремния для интенсификации процессов кипения. Каковы возможности применения черного кремния именно как материала для управления тепловыми потоками и решения задач теплопередачи?
2. Первая глава содержит ссылки на работы по лазерной физике, но недостаточно опирается на классические труды в области теплофизики и теплотехники. Мало ссылок на работы по нестационарной теплопроводности с фазовыми переходами, отсутствует анализ работ по тепломассообмену при высоких плотностях энергии. На какие исследования по тепломассообмену в условиях воздействия высоких плотностей энергии (лазерное излучение, точечные источники тепла), опирается автор, при сравнении полученных результатов?
3. В работе представлены данные по долговечности супергидрофильных поверхностей на основе черного кремния. Насколько существенно (в количественном выражении: проценты, разы, временные интервалы) показатели долговечности, достигнутые автором, превосходят известные аналоги (если превосходят)?
4. На рисунках в диссертации и автореферате (например, автореферат: рис. 5, 6а, 10, 12; аналогичные рисунки в основном тексте) представлены экспериментальные данные без указания доверительных интервалов, погрешностей измерений или статистической значимости различий. Каким образом оценивалась погрешность измерений для каждого из представленных типов данных? Какие конкретные методики использовались?
5. На странице 74 диссертации приведены данные о параметрах шероховатости, согласно которым при давлении около 80 Па формируется развитая микроструктура с шероховатостью $R_a=21$ мкм и $R_q=4$ мкм, что вызывает научный интерес, поскольку известно, что данные параметры содержат схожую информацию о характеристиках шероховатости и обычно соотношение выражается как $R_q=(1,0-1,3)R_a$, тогда как в представленных результатах наблюдается обратная зависимость. Последнее противоречит фундаментальным принципам теории шероховатости, согласно которой среднеквадратичное отклонение R_q по математическому определению не может быть меньше среднего арифметического отклонения R_a , так как квадратичная функция всегда дает больший вес экстремальным отклонениям профиля. Чем обусловлено столь существенное различие в значениях при сравнении с общеизвестной зависимостью?
6. Раздел 3.1. Результаты EDS (рис. 3.2) показывают 25.7 ат.% кислорода в микрокаплях, полученных при абляции кремния в аргоне (60 Па). Аргон это инертная среда. Объясните источник такого количества кислорода? EDS имеет систематические погрешности для легких элементов (O, C). Установленные значения O, C с точностью до десятых долей методологическая ошибка?

Несмотря на указанные замечания, диссертация Родионова Алексея Александровича «Плазменно-индуцированные эффекты при наносекундной лазерной абляции и их роль в формировании супергидрофильных структур» полностью соответствует критериям, установленным п.п. 9–11, 13, 14 Положения о присуждении учёных степеней

(Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности, а её автор по своей квалификации и по результатам проведенного исследования заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. теплофизика и теоретическая теплотехника.

Кандидат технических наук (05.14.04
– Промышленная теплоэнергетика),
Доцент, заместитель директора
Исследовательской школы физики
высокоэнергетических процессов
ФГАОУ ВО НИ ТПУ

Феоктистов Дмитрий
Владимирович

12.08.2025

Подпись Феоктистова Дмитрия Владимировича заверяю

Ученый секретарь

ФГАОУ ВО НИ ТПУ

В.Д. Новикова

печать



634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30

Телефон +7 (3822) 60-63-33

Адрес электронной почты fdv@tpu.ru

Наименование организации: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Я, Феоктистов Дмитрий Владимирович, даю свое согласие ИТ СО РАН на обработку моих следующих персональных данных:

фамилия, имя, отчество, почтовый адрес, телефон, адрес электронной почты, место работы, должность в целях размещения в информационно-телекоммуникационной сети и в единой информационной системе:

- паспортные данные, ИНН, СНИЛС, банковские реквизиты - в случае заключения договора возмездного оказания экспертных услуг по оппонированию диссертации для проведения бухгалтерских операций и налоговых отчислений.

Также данным согласием я разрешаю сбор моих персональных данных, их хранение, систематизацию, обновление, использование, а также осуществление любых иных действий, предусмотренных действующим законом Российской Федерации.