

Отзыв на диссертацию

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

Диссертация Родионова А.А. посвящена изучению взаимодействия наносекундного лазерного излучения с монокристаллическим кремнием, сопровождающегося образованием плазменного факела и последующей модификацией поверхности мишени. Основное внимание в работе уделено плазменно-индуцированным эффектам, оказывающим влияние на морфологию, химический состав и свойства смачивания синтезируемых покрытий. Объектом исследования являются процессы, протекающие при импульсной лазерной абляции в газовой фазе, в частности – формирование супергидрофильных поверхностей, включая прозрачные и поглощающие покрытия на основе Si и Al_2O_3 . Отличительной чертой диссертации является формирование материалов, обладающих одновременно определенными свойствами по отношению к смачиванию и по отношению к их прозрачности.

Свойства смачивания модифицированной поверхности напрямую зависят от её состава и шероховатости. В работе проведен детальный анализ параметров осаждения и обработки для контроля морфологии и состава поверхности, в частности степени ее окисления.

Следует отметить, что тематика диссертации находится на стыке фундаментальной теплофизики, лазерной технологии синтеза материалов и прикладной физики. В настоящее время возрастающий интерес вызывает разработка функциональных покрытий, обладающих не только специфической морфологией, но и заданными свойствами смачивания, прозрачности, поглощения и каталитической активности. При этом импульсная лазерная абляция наносекундной длительности остаётся доступной, воспроизводимой и масштабируемой технологией, позволяющей получать наноструктурированные материалы без использования агрессивных химических реактивов. Диссертационная работа Родионова А.А. вносит весомый вклад в развитие этого направления.

Основные научные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Проведен синтез нанокомпозитных материалов на основе SiO_x и наночастиц Ag & Au в фоновом кислороде, аргоне и их смеси в диапазоне давлений 2–60 Па при температуре фонового газа 20–600 °С. Установлено что наночастицы Ag & Au не

- вливают на степень окисления полученных покрытий. Изменение температуры с 20 до 600 °С позволило повысить степень окисления композитного материала с 1,4 до 2. Совокупность полученных данных позволяет заключить, что преимущественное окисление происходит на этапе разлета лазерного факела.
2. Был выполнен синтез пленок Al_2O_3 методом лазерной абляции алюминия в фоновом кислороде. Впервые показана возможность синтеза одновременно прозрачных и супергидрофильных покрытий на основе Al_2O_3 . Коэффициент пропускания гидрофильного материала – свыше 80%, супергидрофильного – свыше 60% в видимом и ИК диапазоне.
 3. Установлено значительное повышение массового потока аблированного вещества при снижении давления фонового газа с 20 до 2 Па. Обнаружено немонотонное поведение зависимости массового потока аблированного вещества в области близкой к порогу модификации материала ($\sim 0,5 \text{ Дж/см}^2$ для $\lambda = 532 \text{ нм}$). Предложен механизм возникновения немонотонности: при плотностях энергии ниже порога модификации материала испарение не происходит, что исключает экранирование, основной унос массы обусловлен вытеканием расплава мишени. Для подтверждения выдвинутой гипотезы проведено сопоставление экспериментальных данных с численной моделью.
 4. Проведена обработка монокристаллического кремния в многоимпульсном режиме абляции при плотностях энергии лазерного излучения $0,8\text{--}10 \text{ Дж/см}^2$. Впервые выявлена корреляция между массовым потоком аблированного вещества и диапазонами плотностей энергии необходимых для формирования развитых микроструктур. Корреляция обусловлена сменой механизма удаления материала с капельного на испарительный в области $0,5\text{--}3 \text{ Дж/см}^2$.
 5. Установлено, что в диапазоне $1\text{--}2 \text{ Дж/см}^2$ происходит формирование развитой микроструктуры с повышенным коэффициентом поглощения $\sim 90\%$ и супергидрофильными свойствами. Повышение плотности энергии лазерного излучения до $3\text{--}6 \text{ Дж/см}^2$ приводит к снижению поглощающей способности и свойств смачивания материала.

Работа сочетает в себе экспериментальные исследования с использованием широкого спектра аналитических методов (СЭМ, ИК-Фурье спектроскопия, спектрофотометрия, эллипсометрия и др.) и численное моделирование тепломассообмена с учётом фазовых переходов и плазменного экранирования. Создан (усовершенствован) удобный в

использовании экспериментальный стенд, позволяющий проводить различные эксперименты. Следует особо отметить разработку автором оригинального трехкоординатной системы позиционирования с пользовательским интерфейсом, что существенно повысило качество и воспроизводимость экспериментов.

Результаты диссертации обладают не только фундаментальной, но и высокой прикладной значимостью, так как демонстрируют возможность 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. Диссертация содержит конкретные рекомендации по получению «черного» кремния. Найдены конкретные параметры лазерных импульсов, являющиеся оптимальными для удаления фторополимера без нарушения структуры подложки и т.п.

Родионов А.А. проявил себя как самостоятельный исследователь, выполнивший значительный объем оригинальных исследований: от постановки задач, создания экспериментальных стендов и программного обеспечения до анализа результатов и формулировки выводов.

Работа изложена на 110 страницах, включает 45 рисунков и 1 таблицу, содержит список литературы из 159 наименований. По теме диссертации опубликовано 6 статей в журналах, рекомендованных ВАК, в том числе 3 в журналах первого квартиля (Q1) по данным Scopus. Результаты апробированы на ряде российских и международных конференций.

Диссертация не свободна от **недостатков**.

1. На стр. 8 сказано, что Диссертация состоит из 5 глав. На самом деле только 4. Надписи на рисунках в автореферате порою настолько мелкие, что не читаются. Вместо «в прошлой главе» следовало бы написать «в предыдущей главе» и т.п.
2. **Основной недостаток работы** состоит в очень далеком от совершенства изложении. Оно не всегда последовательно, нет четкого описания условий проведения экспериментов, наличие, например, в Главе 3 ссылки см. Главу 4. Глава 4 обширна. Где искать требуемую информацию? При описании численной модели (стр. 52) отсутствует выражение для объемного источника энергии, а также величин,

входящих в формулу (6). Отсутствуют подробности использования этой модели (значения коэффициентов, результаты расчетов и т.п.).

При прочтении диссертационной работы возникли также **вопросы**.

1. На стр. 79 сказано, что численные расчеты показали, что унос массы определяется исключительно гидродинамической неустойчивостью поверхности, а плазменная экранировка отсутствует. Кто проводил расчеты? По какой модели? Расчеты по поверхностным неустойчивостям чрезвычайно сложны.
2. На стр. 65-66 сказано: увеличение температуры газа приводит к росту стехиометрического коэффициента. Это обусловлено катализом химических реакций между продуктами абляции и кислородом, а также повышением вероятности рекомбинации частиц. Какой катализ? Что выступает в роли катализатора в факеле? Что подразумевается под частицами и их рекомбинацией? Может просто реакция такова, что выход ее продуктов увеличивается с температурой?
3. Перед проведением экспериментов образцы подвергались длительной очистке. Насколько сильно влияет качество очистки на свойства получаемых поверхностей? Упрощение очистки улучшает технологичность создания поверхностей.
4. Вопрос о применимости создания технологий в масштабах крупного производства (солнечные панели, авиастроение, очистка воды от нефти). Насколько большие площади модифицированного материала можно получить с помощью предлагаемой лазерной методики? Сколько литров, кубометров загрязненной нефтью водой можно очистить?

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.

Доктор физико-математических наук
(01.02.05 - Механика жидкости, газа и
плазмы), ведущий научный сотрудник
Федерального исследовательского центра
информационных и вычислительных
технологий


15.08.2025

Жуков Владимир Петрович

Подпись ведущего научного сотрудника
лаборатории вычислительных технологий
ФИЦ ИВТ, д.ф.-м.н. В.П. Жукова заверяю
учёный секретарь ФИЦ ИВТ к.ф.-м.н.





Н.В. Киланова

630090, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, 6, ФИЦ ИВТ

Телефон +7 (383) 330-61-50

Адрес электронной почты zukov@ict.nsc.ru

Наименование организации: Федеральный исследовательский центр информационных вычислительных технологий.

Я, Жуков Владимир Петрович, 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.

