

На правах рукописи



Бармина Екатерина Владимировна

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ С МНОГОФАЗНЫМИ
КОНДЕНСИРОВАННЫМИ СРЕДАМИ НАНОМЕТРОВОГО МАСШТАБА**

Специальность: 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Научном центре волновых исследований Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук (филиал)

Официальные оппоненты:

Панов Владимир Иванович
д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой Квантовой электроники
Физического факультета Московского государственного
университета

Леонов Алексей Георгиевич
д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики
Московского физико-технического института

Завестовская Ирина Николаевна
д.ф.-м.н., профессор, старший научный сотрудник РАН,
руководитель Высшей школы физиков Н. Г. Басова Национального
исследовательского Ядерного университета «МИФИ»

Ведущая организация:

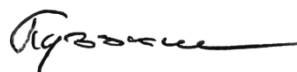
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН

Защита состоится «_____» _____ 2019 г. в 15 часов на заседании диссертационного
совета Д 002.063.01 в Институте общей физики им А.М. Прохорова РАН по адресу: 119991,
г. Москва, ул. Вавилова, д. 38.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института общей физики им.
А. М. Прохорова РАН, <http://www.gpi.ru/disser/compet.php>

Автореферат разослан «_____» _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



В. М. Кузькин

Актуальность работы

Диссертационная работа посвящена одному из активно развивающихся направлений современной лазерной физики - взаимодействию лазерного излучения с нанобъектами. Уникальность физико-химических свойств нанобъектов, получаемых с помощью лазерной абляции твердых тел, определяется как химической чистотой, так и большим разнообразием их морфологии - от упорядоченных микроконусов до наноразмерных (до 20 нм) периодических структур. Нанобъекты с различными физико-химическими свойствами уже нашли свои применения в биологии, медицине, микроэлектронике и промышленности. Представляется возможным расширить класс микро- и нанобъектов, которые будут иметь уникальные морфологические и физические свойства. Методы нанолитографии, ионного травления и электронно-лучевой эпитаксии позволяют создавать структуры с заданной морфологией, но требуют условий сверхвысокого вакуума, что обуславливает невозможность обработки крупногабаритных объектов. Получение микро- и нанобъектов с помощью лазерной абляции материалов отличается простотой реализации и практичностью, поскольку основано на самоорганизующихся процессах. При этом размеры облучаемого предмета не важны, благодаря быстро развивающимся технологиям управления лазерным пучком и созданию мощных лазеров с высокой частотой повторения импульсов.

Анализ литературы последних десятилетий показывает нарастающий интерес к новым эффектам, возникающим при взаимодействии лазерного излучения с многофазными нанобъектами, что связано с их уникальными свойствами, такими как усиление лазерного поля на нанобъектах вследствие плазмонного резонанса носителей и возникновение новых неустойчивостей в процессе лазерной абляции твердых тел. Взаимодействие лазерного излучения с наномасштабными объектами позволяет исследовать новые фундаментальные эффекты, не наблюдавшиеся ранее. Несомненна также и практическая значимость таких исследований, поскольку их результатом являются новые и улучшенные характеристики процессов, деталей и механизмов.

Целью диссертационной работы является исследование физико-химических аспектов взаимодействия импульсного лазерного излучения с многофазными конденсированными средами, а также выявление управляющих факторов в процессах, протекающих при лазерном формировании нанобъектов и их взаимодействии с лазерным излучением в жидкостях.

Задачами диссертационной работы являются поэтапные исследования многофазных процессов лазерной абляции твердых тел в жидкостях, а именно:

изменение рельефа поверхности твердого тела при лазерном воздействии;

изменение физико-химических свойств жидкости при лазерном нагреве и пробое;

выявление стадий лазерной модификации форм нанообъектов при переходе от абляции поверхности твердого тела к жидкости;

Защищаемые положения

1. Неупорядоченные микроструктурированные поверхности, полученные лазерной абляцией в воздухе, обладают высокой поглотительной способностью в оптическом и ближнем ИК-диапазонах.
2. Морфология самоорганизующихся и мелкомасштабных периодических наноструктур не зависит от длины волны и поляризации лазерного излучения в отличие от известных поверхностно-периодических структур.
3. Морфология наночастиц, получаемых при лазерной абляции металлов в водных растворах солей, зависит от валентности и концентрации ионов в них.
4. Взаимодействие лазерного излучения с нанообъектами в жидкостях приводит к изменению их химического состава.
5. Химическое травление лазерно-структурированных поверхностей приводит к образованию диссипативных структур нового типа.

Научная новизна

Экспериментально исследованы и описаны два типа новых наноструктур (самоорганизующихся и мелкомасштабных), которые образуются при лазерной абляции твердых тел в жидкостях субнаносекундными импульсами. Механизм формирования первых связан с выталкиванием расплава парами окружающей среды, а второго - с действием термокапиллярных сил и сил поверхностного натяжения на расплав, что подтверждается теоретической моделью.

Впервые детально рассмотрен процесс формирования плазмы пробоя при взаимодействии лазерного излучения с коллоидными системами на примере диссоциации жидкостей под действием электронов плазмы. Показано, что выход продуктов диссоциации напрямую зависит от материала наночастиц и их концентрации.

Обнаружен новый класс диссипативных структур при химическом травлении лазерно-микроструктурированных объектов с выделением пузырьков водорода. Теоретически и экспериментально показано, что эти пузырьки вследствие вязкого взаимодействия с жидкостью могут объединяться в самоорганизующиеся структуры, определяющиеся геометрией облученной поверхности.

Практическая значимость работы

Впервые созданы солнечные элементы на лазерно-структурированном кремнии с эффективностью 20% по сравнению с солнечными батареями на основе плоского кремния.

Показано, что эффективная работа выхода наноструктурированного W катода на 0,3 эВ меньше по сравнению с исходной поверхностью. Это может существенно увеличить срок службы такого катода в приборах и изделиях.

Установлено, что формирование наноструктур на карбиде кремния как основе светодиодов приводит к увеличению пропускания излучения в красной области спектра в 60 раз. Этот результат лег в основу международного патента: E. V. Barmina, G. A. Shafeev, E. Stratakis, C. Fotakis, «Nanostructuring of single crystal silicon carbide by picosecond UV laser radiation»- международный патент № 1008582, дата выдачи 06.10.2015.

Разработана технология лазерного наноструктурирования объектов скольжения, которая ведет к улучшению их антифрикционных свойств на 40% за счет формирования поверхностно-периодических структур заданной шероховатости и ориентации.

Развита технология направленного лазерного облучения твердых тел, позволяющая дистанционно структурировать объекты любой формы и размера.

Достоверность полученных результатов обеспечена применением современных апробированных методов исследования, использованием оборудования, обеспечивающего необходимую чувствительность и точность эксперимента, согласием полученных экспериментальных результатов с выводами теоретических моделей, а также полученным патентом.

Личный вклад диссертанта

Диссертационная работа является результатом многолетней работы автора по взаимодействию лазерного излучения с нанообъектами в Научном центре волновых исследований (НЦВИ ИОФРАН). Автором предложены методы и схемы экспериментальных исследований. В экспериментах, анализе образцов и обсуждении полученных результатов участвовали также А. В. Симакин, Н. А. Кириченко, С. В. Гудков, И. В. Баймлер, К. О. Айыбыжы, М. И. Жильникова, А. А. Серков, И. А. Сухов, В. Ю. Прищепа, О. В. Уваров, И. И. Раков, В. И. Стегайлов, С. И. Тютюнников, С. Н. Седых, И. А. Щербаков, С. Н. Андреев, П. И. Родин, Ю. Л. Калачев, Э. Стратакис, К. Фотакис, В. Скулас, М. Барбероглоу, А. Монусаки, Г. Вьё.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на международных и российских конференциях, в частности, на конференциях European Material Research Society EMRS- 2009 (г. Страсбург, Франция), EMRS- 2011 (г. Ницца, Франция), Laser precision microfabrication (LPM 2017, 2018), Advanced nanoparticles generation in liquids (ANGEL 2014, 2016, 2018), International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2013, г. Нага, Япония).

Результаты были доложены в форме приглашенных докладов на ANGEL 2018 и Российско-Китайской конференции технического обмена и сотрудничества по новым материалам на высоком уровне. Результаты работы были представлены на конференции «Современные нанотехнологии и нанофотоника для науки и производства», (г. Владимир, 2009), Всероссийской школе по лазерной физике и лазерным технологиям, (г. Саров, 2010, 2017), 54-ой, 60-ой, 61-ой Научной конференции МФТИ (г. Долгопрудный, 2011, 2017, 2018 гг.), Conference of laser ablation (COLA 2013-Искья, Италия), на XIII Забабахинских научных чтениях (г. Снежинск, 2017).

Результаты, полученные в диссертационной работе, неоднократно докладывались на научных семинарах Научного центра волновых исследований (филиал) Института общей физики им. А. М. Прохорова РАН (НЦВИ ИОФРАН), семинарах ИОФРАН. Работа поддержана грантами Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) 11-08-00574-а, 10-02-90044-Бел_а, 12-02-31053-мол_а, 15-32-20296, 07-02-00757_а, 15-02-04510_а, 16-02-01054_а, 18-52-70012-е-Азия_а, грантами Научной школы Ф. В. Бункина № 8108.2006.2, № 214.2012.2, Стипендией Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики СП-1442.2012.3 и грантами президента МК-4194.2015.2, МК-3606.2017.2, программами Президиума РАН I.42П «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов», № I7 «Актуальные проблемы фотоники, зондирование неоднородных сред и материалов», государственными контрактами №009/53/2012 от 12.05 2012 г., № 8383р/13450 от 14.09.2010, № 467/10/675-Г от 01.12.2010, № 8720-П от 15.10.2014, х/д № 8626-П и х/д № 8627-П от 10.09.2013, международным проектом ERA-Net-Rus 065 LAG NP, и Министерством образования РФ № 2013-1.3-14-513-0118.

Публикации

За время работы опубликовано 44 научные работы в международных рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК, из них 33 - по материалам диссертации (список публикаций по теме диссертации приведен в конце автореферата).

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 255 страниц, включая 136 рисунков, 8 таблиц и библиографию из 230 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** представлен детальный литературный обзор по выбранному направлению работы (основные публикации отражены в [1-31]), обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, научная новизна, основные положения, выносимые на защиту, научная и практическая значимости работы.

Исследованием структур, образующихся при лазерной абляции твердых, активно стали заниматься с самого момента появления лазеров. Если в 1960-х годах экспериментально были получены поверхностно-периодические структуры, то уже в 1990-х годах стали развиваться такие направления как лазерное микроструктурирование поверхностей в жидкостях и газах (группы Morenza, Pedraza, Mazur) и образование наночастиц в жидкостях. В настоящее время основными группами Kabashin, Завестовской, Булгаковой, Barcikowski, Amans, Mafune, Шафеева, Тарасенко получены фундаментальные результаты по образованию наночастиц при лазерной абляции твердых тел, выявлены основные экспериментальные параметры, влияющие на морфологию сферических или оболочечных наночастиц, исследованы процессы их фрагментации и агрегации. Однако уже известные результаты не отражают всего многообразия морфологий нанообъектов, получаемых с помощью лазерной абляции в жидкостях.

Если работ, посвященных лазерной генерации наночастиц, к настоящему моменту достаточно много, то работ по формированию самоорганизующихся наноструктур (СОНС) и мелкомасштабных периодических структур (меньше 100 нм) (МПС) на поверхности твердых тел насчитывается несколько десятков. Другими словами, есть ряд работ (группы Кудряшова, Guo и Vorobyev, Bonse, Reif, Stratakis, Lasagni) где отмечалось лазерное формирование СОНС или МПС, однако всестороннего экспериментального и детального теоретического исследования процесса образования целого ряда типов наноструктур никем не проводилось.

Отдельной задачей является исследование процесса взаимодействия лазерного излучения с наночастицами. Если исследованиям процесса формирования плазмы при лазерном воздействии на мишень посвящено достаточное количество работ Amans, Vogel, Barcikowski, Kennedy, Бункина Ф.В. и Бункина Н. Ф., то исследованиям формирования лазерного пробоя именно на наночастицах уделено существенно меньше внимания. Это связано со сложностью регистрации плазмы в малых временных и пространственных масштабах. В исследованиях формирования плазмы пробоя вокруг наночастиц хотелось бы выделить группы Merabia, Aitken, Plech. С одной стороны, в результате образования плазмы поглощение лазерного излучения коллоидом определяется как свойствами материала наночастиц, так и свойствами плазмы. Можно сказать, что характеристики плазмы напрямую зависят от параметров коллоидного раствора и самих наночастиц. С другой, при лазерном

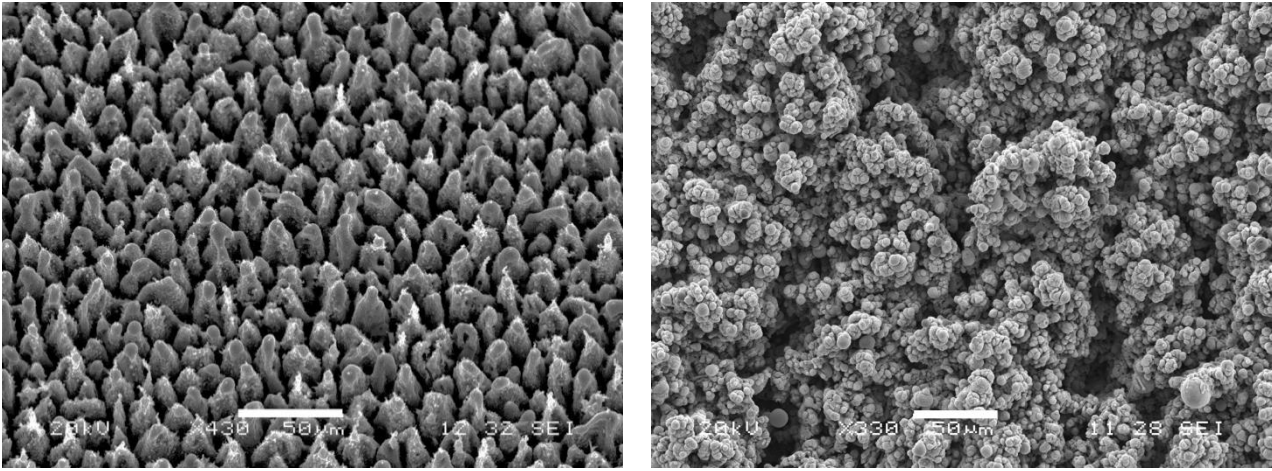
пробое в жидкостях среда внутри лазерного пучка подвергается сильному перегреву и ионизации. В таких условиях, как рабочая жидкость, так и сами наночастицы или примеси претерпевают химические изменения состава. Поскольку прямое исследование характеристик наноплазмы представляется сильно затруднительным, оценку ее температуры электронов можно осуществить с помощью регистрации косвенных продуктов диссоциации жидкости под действием лазерного пробоя.

Взаимодействие лазерного излучения с наночастицами в жидкостях, сопровождается не только возникновением оптического пробоя, но и усилением поля на наночастицах. Это существенным образом может сказываться на физико-химических свойствах раствора, в котором протекала лазерная абляция.

Также, формирование микро- и наноструктур на поверхности твердых тел также может приводить к визуализации новых гидродинамических эффектов на таких мишенях при их химическом травлении.

В настоящей работе детально и всесторонне рассмотрен процесс лазерной абляции твердых тел на воздухе и в жидкостях в тех аспектах, которые оставались неисследованными. Постадийное исследование этого процесса (от модификации мишени до изменения химического состава жидкости) позволило получить новые типы наноструктур и наночастиц с уникальной морфологией, впервые охарактеризовать плазму, возникающую вокруг наночастиц, а также создать новые функциональные наноматериалы с заданными размерами и свойствами. Полученные данные в диссертационной работе по лазерному формированию наномасштабных объектов с контролируемыми свойствами являются существенным вкладом в научное направление – лазерные нанотехнологии.

В первой главе приведены экспериментальные результаты по лазерному микроструктурированию твердых тел. Показано, что воздействие наносекундных лазерных импульсов на различные материалы (никель, нержавеющая сталь, медь, алюминий, кремний) на воздухе приводит к образованию на их поверхности периодических микроконусов (рис. 1а) или неупорядоченных микроструктур, покрытых наноструктурами (рис. 1б).



а

б

Рис. 1. Морфология микроструктур, образующихся при облучении материалов наносекундным лазерным излучением на воздухе: а-кремний, подвергнутый воздействию 10^3 лазерных импульсов, б-поверхность меди, число воздействующих импульсов- 4. Масштабная метка- 50 мкм.

В первом случае формирование микрообъектов связано с модуляцией расплава термокапиллярными волнами, во втором- с перераспределением расплава под действием паров окружающей среды. Определяющим фактором образования того или иного типа микроструктур является число импульсов, воздействующих на поверхность твердого тела. Установлено, что лазерное облучение материала на воздухе приводит к изменению его химического состава. Показано, что при падении излучения на систему микроструктур происходит его многократное переотражение между стенками микрорельефа и излучение не выходит обратно. Другими словами, образование микроструктур на поверхности материалов позволяет уменьшить ее коэффициент зеркального отражения на несколько порядков. Вместе с тем, образование оксидных пленок с шириной запрещенной зоны в ближней ИК-области на ряде металлов также вносит свой вклад в снижение отражательной способности материалов. Экспериментально продемонстрирована совместимость лазерного микроструктурирования поверхности дюралюминия с традиционными технологиями чернения поверхности (анодирование), что позволяет получать рекордно низкие значения коэффициента зеркального отражения (рис. 2).

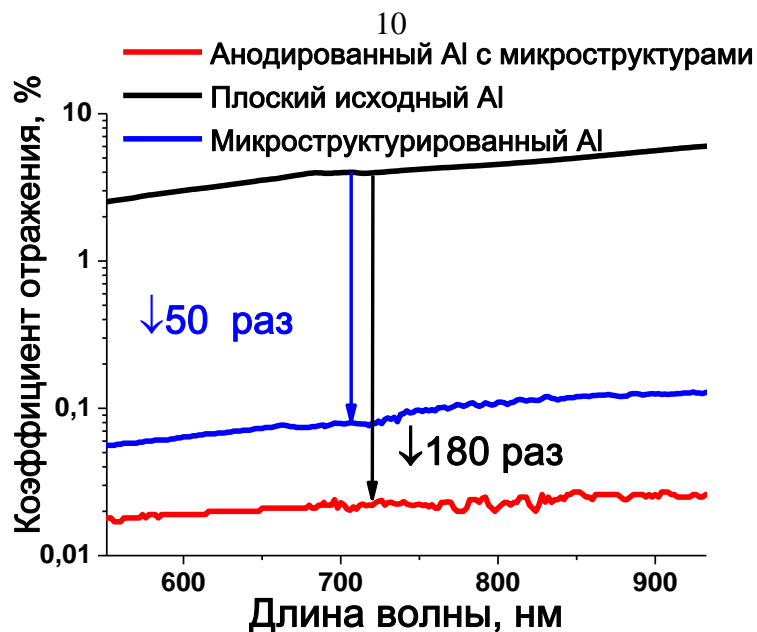


Рис. 2. Спектр зеркального отражения образца дюралюминия относительно алюминиевого зёркала. Верхняя (черная) кривая – исходная поверхность. Средняя (синяя) – дюралюминий, облученный в воздухе излучением наносекундного диапазона в режиме сканирования без анодирования. Нижняя (красная) – микроструктурированный и анодированный дюралюминий, импрегнированный наночастицами углерода.

Разработана технология создания солнечных батарей на основе лазерно-микроструктурированного кремния. Показано, что нанесение микроконусов на плоский кремний приводит к увеличению эффективности преобразования световой энергии в электрическую на 20%.

Во второй главе представлены результаты по лазерному наноструктурированию твердых тел.

В первом разделе подробно описаны физико-химические свойства самоорганизующихся наноструктур. Формирование наноструктур интерпретируется как результат работы сил давления окружающей среды на ванну расплава. По оценкам, необходимая разница давлений для образования наноструктуры диаметром 200 нм (вставка к рис. 3) равна 40 МПа. Большое разнообразие экспериментальных данных по морфологии НС, образующихся при абляции металлических мишеней короткими и ультракороткими лазерными импульсами, позволяет сформулировать их общие особенности. НС представляют собой нановыступы сферической или полусферической формы, размер которых растет с увеличением длительности лазерных импульсов (рис. 3).

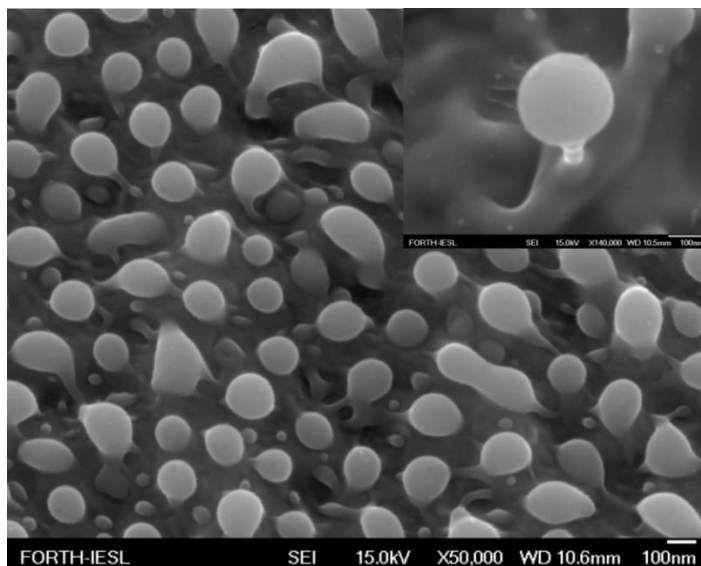


Рис. 3. Морфология самоорганизующихся наноструктур на поверхности никеля при воздействии на него лазерного излучения с длиной волны 248 нм и длительностью импульса 5 пс в этаноле. На вставке показан вид отдельно взятой наноструктуры. Масштабная метка- 100 нм.

Показано, что размер наноструктур не зависит от длины волны падающего излучения или его поляризации, поэтому можно сказать, что они являются самоорганизующимися и, как следствие, представляют отдельный класс наноструктур. Установлено, что формирование наноструктур в первую очередь происходит на тех участках мишени, размер или шероховатость которых лежат в нанометровом диапазоне (рис. 4).

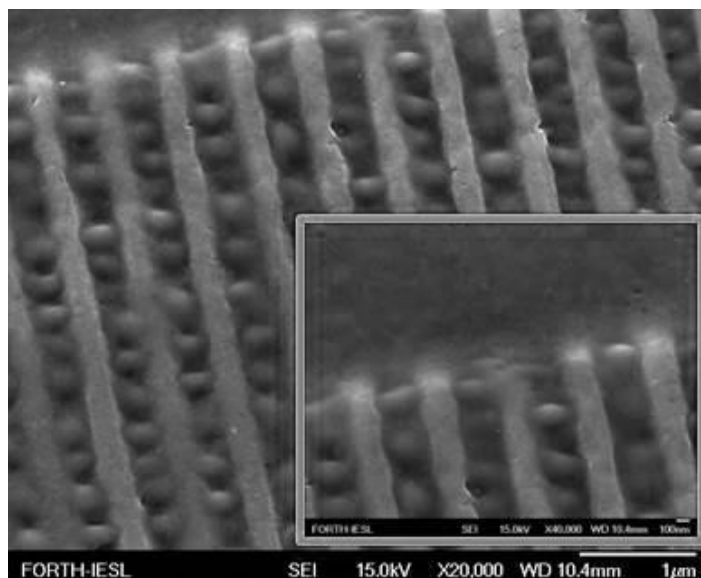


Рис. 4. Вид поверхности никеля с нанесенной периодической пре-структурой после воздействия на нее излучения Nd: YAG лазера с длительностью импульса 350 пс в этаноле. Масштабная метка- 1 мкм. На вставке показана граница между пре-структурированной и плоской поверхностями, масштабная метка 100 нм. Плотность энергии сопоставима с порогом плавления материала.

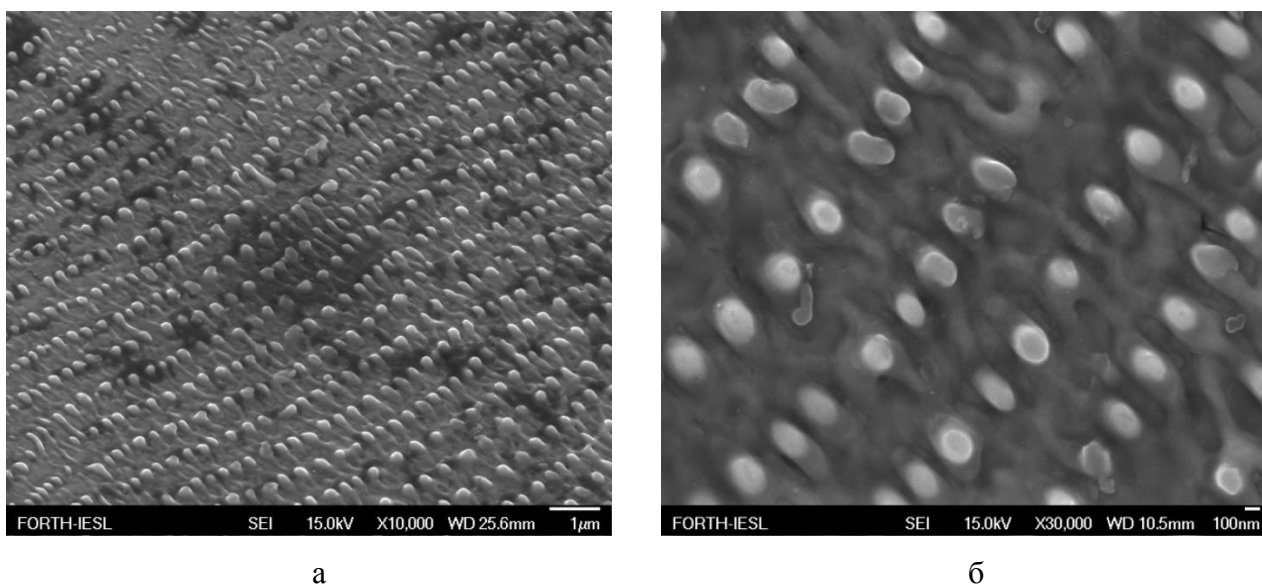
Показано, что в некоторых случаях распределение среднего поперечного размера наноструктур является бимодальным, при этом один из максимумов соответствует формированию самоорганизующихся наноструктур и не зависит от длины волны падающего излучения, а второй лежит на длине волны излучения использовавшегося лазера. Появление второго пика обусловлено образованием поверхностно-периодических структур (ППС). Приведенные результаты показывают, что формирование НС под действием суб-наносекундных лазерных импульсов в жидкостях является универсальным явлением, характерным не только для абляции благородных металлов в жидкостях. Показано, что морфология и размер самоорганизующихся наноструктур зависит от плотности энергии лазерного излучения, длительности и числа импульсов. Это обусловлено тем фактом, что толщина слоя расплава существенно зависит от вышеупомянутых параметров.

Впервые обнаружено, что максимум плотности наноструктур на поверхности вольфрама и никеля при их абляции фемтосекундными задержанными импульсами в этаноле достигается при задержке между импульсами порядка 1 пс. Этот максимум наблюдается при задержке порядка времени электрон-фононной релаксации электронов, что хорошо согласуется с другими как теоретическими, так и экспериментальными работами. Установлено, что период ППС как на кремнии, так и на вольфраме, не зависит от задержки между импульсами в рамках погрешности измерений.

Экспериментально исследованы оптические свойства наноструктурированных подложек серебра, золота, титана и никеля, декорированного золотом, при их абляции короткими лазерными импульсами в жидкостях. Исследование морфологии и спектров поглощения облученных мишеней обнаруживает, что образование наноструктур на них сопровождается смещением основного пика и появлением нового максимума в видимой части спектра, что обусловлено коллективными колебаниями электронов в наноструктурах. Данные о «плазмонной» люминесценции наноструктур на поверхности золота показывает, что при возбуждении с помощью излучения с длиной волны 457,9 нм коллективных колебаний электронов в наноструктурах наблюдается пик в области 515 нм в спектре люминесценции, что хорошо совпадает с положением пика плазмонного поглощения. Показано, что лазерное наноструктурирование никеля и последующее химическое осаждение Au на его поверхность приводит к формированию остроконечных наноразмерных Au многогранников. Было обнаружено, что они демонстрируют эффект гигантского комбинационного рассеяния (ГКР) с коэффициентом усиления сигнала модельных органических молекул 1,2-Bis(4-pyridyl)-ethylene (BPE, брутто-формула $C_{12}H_{10}N_2$) на такой подложке 10^8 раз. Частичный вклад в коэффициент усиления вносит малый радиус кривизны образовавшихся структур. Такого рода поверхности могут быть использованы в качестве

сенсоров мониторинга окружающей среды и биомолекул, а их изготовление значительно дешевле по сравнению с сенсорами на основе благородных металлах.

Продемонстрировано сосуществование двух типов структур – самоорганизующихся наноструктур и поверхностно-периодических структур (ППС). Установлено, что наноструктурирование с помощью метода двойной экспозиции приводит к образованию взаимно-пересеченных ППС, с расположенными на их вершинах наноструктурами (рис. 5). В этом случае наноструктуры уже не являются самоорганизующимися, поскольку их размер определяется периодом ППС.



а

б

Рис. 5. Вид поверхности вольфрама после облучения в этаноле. Метод двойной экспозиции. Nd: YAG лазер: длина волны излучения 1064 нм, длительность импульса-350 пс, частота следования импульсов 300 Гц, а- общий вид поверхности мишени, под углом 25° градусов (масштабная метка 1 мкм), б- увеличенное изображение (масштабная метка 100 нм).

Показано, что двукратное лазерное облучение материалов (W, Si, SiC) с поворотом образца на 90° между экспозициями приводит к формированию регулярного массива наноструктур, расположенных на вершинах ортогонально-пересеченных ППС, размер которых определяется размерами областей ортогонального пересечения ППС, и как следствие, периодом ППС. При помощи таких параметров, как показатель преломления окружающей жидкости, длина волны и плотность энергии лазерного излучения размер структур и их период можно контролировать.

Впервые показано, что наноструктурирование вольфрамовых катодов с использованием метода двойной экспозиции ведет к уменьшению эффективной работы выхода W на 0,3 эВ. Формирование наноструктур на поверхности карбида кремния с помощью метода двойной экспозиции приводит к увеличению пропускания излучения в

красной области спектра в 60 раз. Установлено, что модельный объект лазерно-наноструктурированной нержавеющей стали проходит по льду расстояние на 40% большее по сравнению с необлученным образцом. Такое существенное изменение обусловлено созданием гидрофобной поверхности при нанесении наноструктур. Увеличение краевого угла смачивания происходит из-за изменения параметров шероховатости поверхностей, которые зависят от плотности энергии воздействующего излучения.

Во втором разделе главы рассмотрены результаты по формированию ППС на поверхности чистого или пре-структурированного никеля при его лазерной абляции излучением с линейной и азимутальной поляризацией. Показано, что период ППС и их морфология напрямую зависят от направления и наличия пре-структуры (рис. 6).

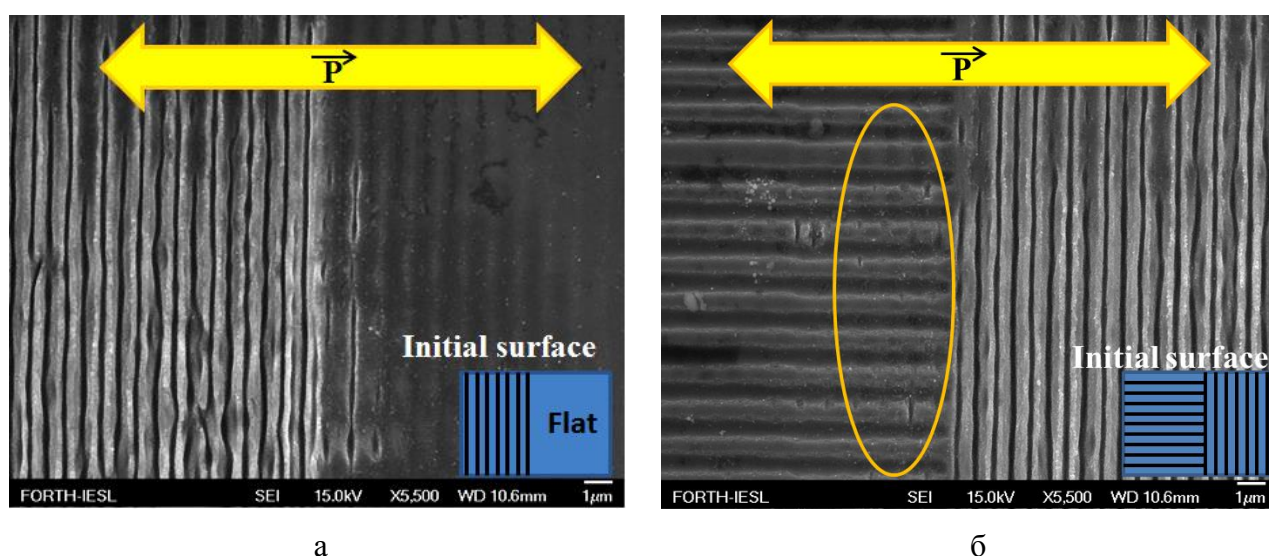


Рис. 6. Морфология поверхности никеля после его лазерного облучения. Yb:KGW лазер: длина волны излучения-1030 нм, длительность импульса-160 фс, частота следования импульсов-1кГц, плотность энергии лазерного излучения-0,1 Дж/см², 150 импульсов на точку. Масштабная метка-1 мкм. Желтой стрелкой показано направление поляризации лазерного излучения. На вставках схематично изображена поверхность никеля с периодическими пре-структурированными до его облучения: а- исходная поверхность состоит из периодических пре-структур, нанесенных с помощью электронно-лучевой литографии и чистого никеля, б- необлученная поверхность представляет собой взаимно-ортогональную систему периодических пре-структур. Желтым овалом обозначена область формирования ППС.

Если ориентация пре-структур перпендикулярна направлению распространения поверхностно-электромагнитных волн (ПЭВ), то ППС фактически не образуются. Другими словами, ортогональные пре-структуры мешают прохождению ПЭВ и поэтому ПЭВ затухают на такой поверхности очень быстро. Это хорошо заметно по остаточным следам

ППС (на рис. 6 обведено желтым овалом). Также обнаружено, что при воздействии высокоинтенсивного фемтосекундного лазерного излучения на пре-структурированный никель, имеющий синусоидальный рельеф с периодом λ , происходит генерация второй пространственной гармоники. Это выражается в том, что на начальной затравке, ориентация которой совпадает с направлением ПЭВ, формируются ППС с периодом $\lambda/2$ (рис. 6). Установлено, что при воздействии лазерного излучения с длительностью импульса 160 фс с азимутальной поляризацией на исходно гладкую поверхность никеля происходит образование ромбовидных упорядоченных структур, покрытых мелкомасштабными периодическими структурами (МПС) с периодом около 100 нм (рис. 7).

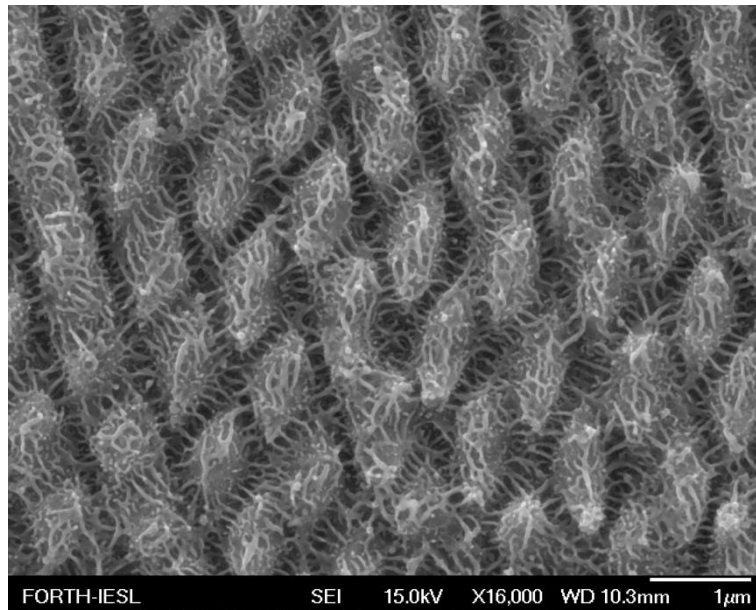
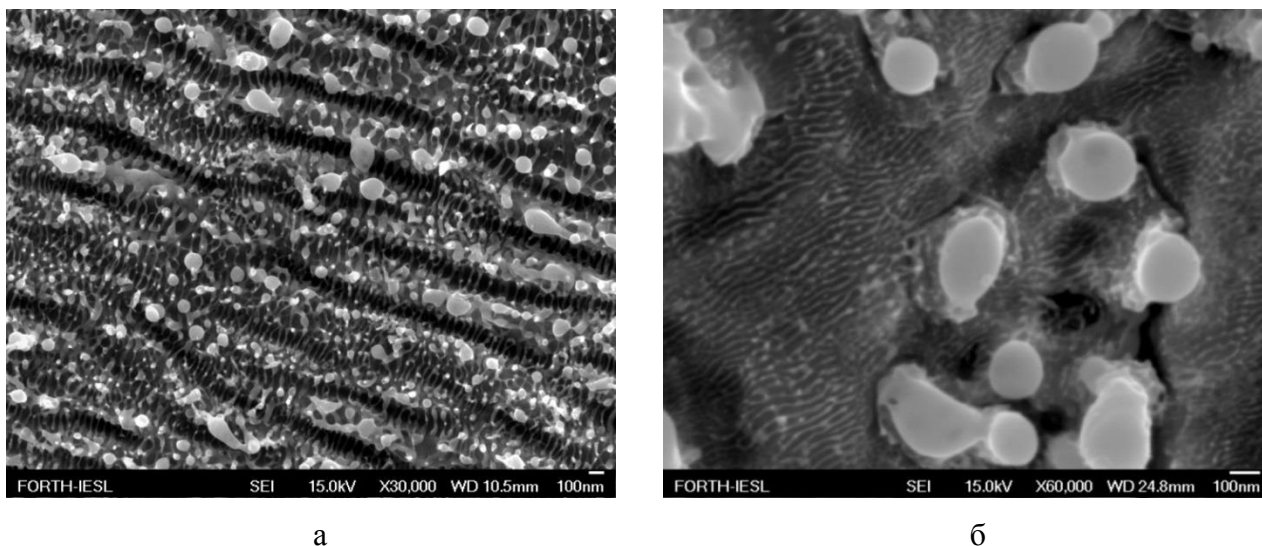


Рис. 7. Морфология пре-структурированной поверхности никеля после воздействия на него излучения с азимутальной поляризацией. Yb:KGW лазер: длина волны излучения-1030 нм, длительность импульса-160 фс, частота следования импульсов-1 кГц, плотность энергии лазерного излучения-0,5 Дж/см², 150 импульсов на точку, воздух. А- общий вид, б- увеличенное изображение. Масштабная метка- 1 мкм.

Образование наноромбов обусловлено самопересечением ПЭВ в процессе воздействия лазерного импульса. В пространстве между ромбами сформировались мелкомасштабные периодические структуры со средним периодом около 100 нм.

Показано, что мелкомасштабные периодические структуры с периодом 20-150 нм могут возникать при лазерной абляции твердых тел суб-наносекундными импульсами, как в жидкостях, так и на воздухе. Их период намного меньше чем длина волны лазерного излучения (рис. 8). При абляции линейно-поляризованным лазерным излучением ориентация МПС совпадает с вектором поляризации лазерного пучка. В ряде случаев МПС могут располагаться на ППС и их направления ортогональны. Показано, что МПС могут

образовываться, как и на ППС (рис. 8, а), так и сосуществовать с самоорганизующимися наноструктурами (рис. 8, б).



а

б

Рис. 8. Морфология МПС на поверхности металлов: а - тантал, воздействие импульсов Ti:sapphire лазера: длина волны излучения-800 нм, длительность импульса-180 фс, частота следования импульсов-1 кГц, плотность энергии лазерного излучения-10,2 Дж/см², 20 импульсов на точку, б- молибден, абляция излучением KrF лазера: длина волны излучения-248 нм, длительность импульса-5 пс, частота следования импульсов-10 Гц, плотность энергии лазерного излучения- 0.5 Дж/см², 20 импульсов на точку. Масштабная метка- 100 нм.

Впервые теоретически исследовано образование МПС на поверхностно-периодических структурах совместным численным решением задачи теплопроводности и Навье-Стокса. Образование МПС связано не с поляризацией лазерного излучения, а с развитием термокапиллярной неустойчивости слоя расплава на поверхности мишени. В случае протяженной ванны расплава возникающий нанорельеф подобен одномерным ячейкам Бенара. Формирование МПС происходит при однородном нагреве в отличие от ППС, вследствие этого их можно считать диссипативными структурами.

В третьей главе рассмотрено лазерное формирование наночастиц с уникальной морфологией. Впервые экспериментально показано, что лазерная абляция металлической золотой мишени в воде может приводить к образованию удлиненных наночастиц золота в присутствии двухвалентных ионов Са и Mg (рис. 9).

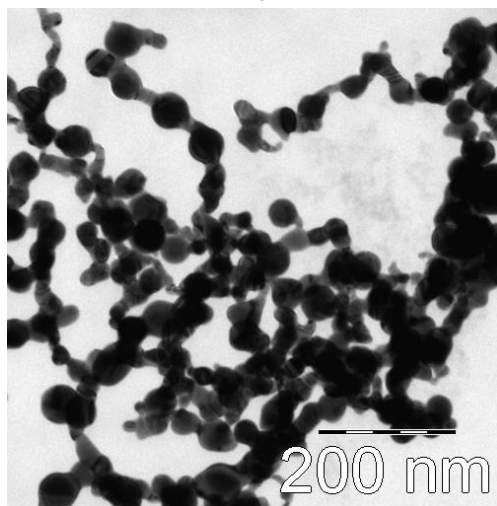


Рис. 9. Морфология наночастиц золота, образующихся при лазерной абляции мишени в водных растворах MgSO_4 с концентрацией 1 мг/мл. Масштабная метка- 200 нм.

Такие наночастицы характеризуются поглощением в красной и ИК-области спектра вследствие наличия продольного плазмонного резонанса, в дополнение к стандартному пику поперечного плазмонного резонанса золота в воде в районе 520 нм. При воздействии на коллоидный раствор удлинённых наночастиц импульсного лазерного излучения интенсивностью порядка 10^9 Вт/см² на начальной стадии облучения происходит агрегация удлинённых наночастиц. При дальнейшем облучении агрегация частиц сменяется их фрагментацией, т.е. увеличением доли малых сферических наночастиц. Одностадийная методика получения удлинённых наночастиц золота представляет интерес для их биомедицинских применений, поскольку такие наночастицы поглощают в полосе генерации большинства лазерных источников, применяемых в фотодинамической терапии и излучающих в красной области спектра.

Воздействие лазерного излучения на смесь коллоидов пар Fe-Al и Co-Al в абсолютном этаноле ведет к формированию композитных наночастиц. Так, при лазерной абляции взвеси железо-алюминия происходит формирование оболочечных наночастиц с железным ядром. Также было установлено, что наночастицы железа коагулируют под действием лазерного излучения и их начальный размер увеличивается втрое.

Показано, что воздействие лазерного излучения на смесь наностержней кобальта и наночастиц алюминия приводит к формированию наноструктур додекаэдрической формы (рис. 10).

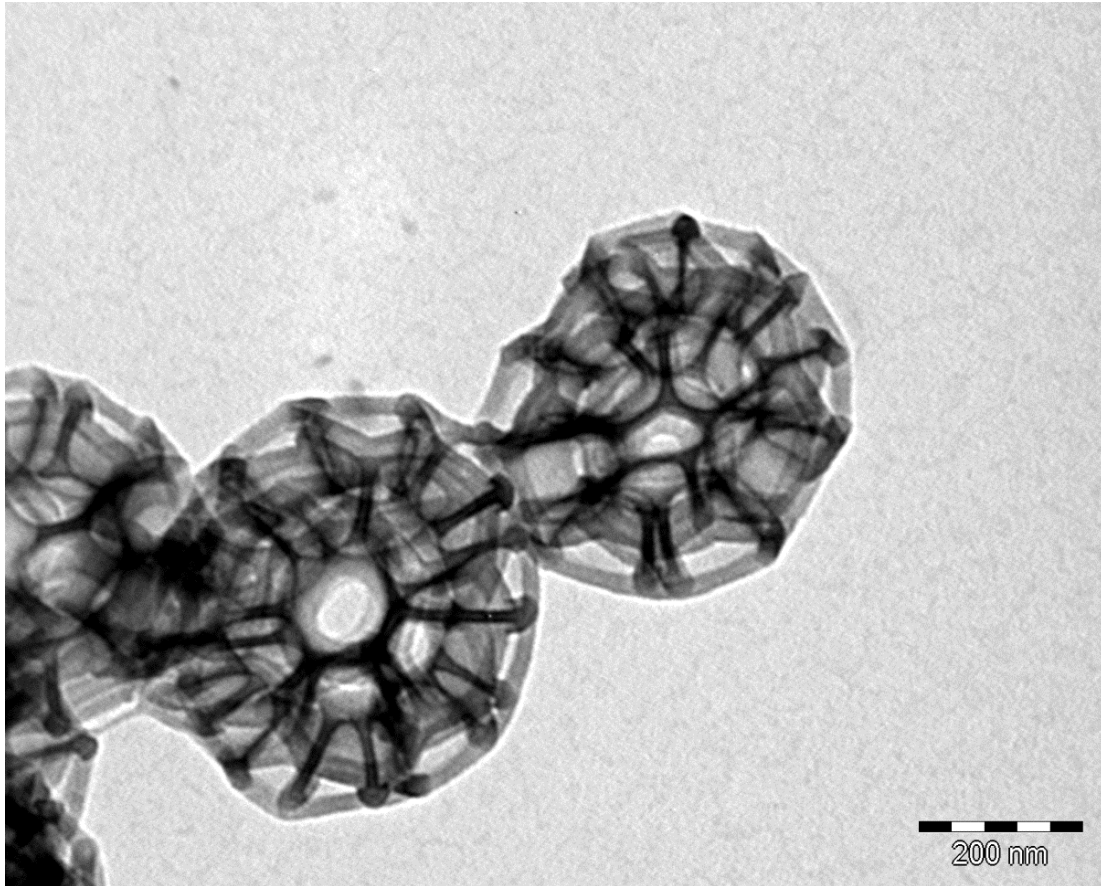


Рис. 10. Морфология Co-Al нанобъектов. Лазерное облучение взвеси наночастиц Co и Al в абсолютном этаноле. Nd:YAG лазер: длина волны излучения-1064 нм, длительность импульса-10 нс, частота следования импульсов-10 кГц, плотность энергии.

В этом случае механизм формирования наноструктур связан со смачиванием расплава алюминия еще твердыми наностержнями кобальта. Полученные результаты свидетельствуют о гибкости техники лазерной абляции в жидкостях, позволяющей получать наночастицы с большим разнообразием размеров и морфологий.

В четвертой главе представлены результаты по исследованию лазерного пробоя жидкостей в присутствии нанобъектов, приводящих к изменению химического состава первых. Экспериментально показано, что наиболее вероятной причиной пробоя прозрачных жидкостей является наличие в них твердых примесей нанометрового масштаба.

Установлено, что при лазерном облучении водных коллоидов наночастиц происходит разложение воды на молекулярные водород, кислород и перекись водорода, а также образуются гидроксильные радикалы под действием плазмы, формирующийся вокруг наночастиц. Вклад в генерацию продуктов диссоциации жидкостей вносят не только воздействие плазмы пробоя, но и возникающие акустические колебания, а также УФ-излучение плазмы.

Показано, что выход продуктов диссоциации молекулы воды существенно зависит от концентрации и материала наночастиц, а также параметров воздействующего излучения (рис. 11).

Выбор материала влияет на сечение поглощения наночастиц в коротковолновой области и, как следствие, на эффективность взаимодействия плазмы вокруг наночастиц с молекулами жидкости. Обсуждается корреляция свойств плазмы лазерного пробоя с генерацией продуктов диссоциации молекул воды



Рис. 11а. Зависимость выхода гидроксильных радикалов от концентрации наночастиц Ni в воде при воздействии на них излучения лазера Nd:YAG, время облучения - 3 мин.

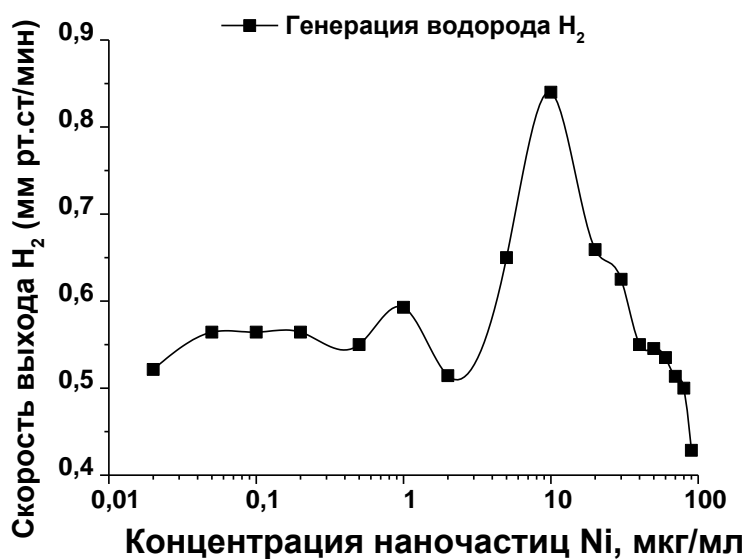
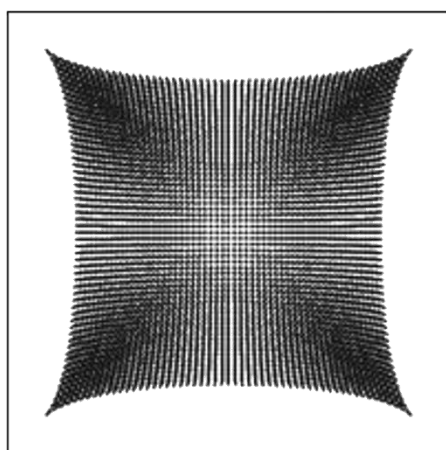


Рис. 11б. Зависимость скорости выхода водорода от концентрации наночастиц Ni в воде при воздействии на них излучения лазера Nd:YAG, время облучения - 15 мин. Погрешность измерений составляла 0,1 % (а) и 5% (б).

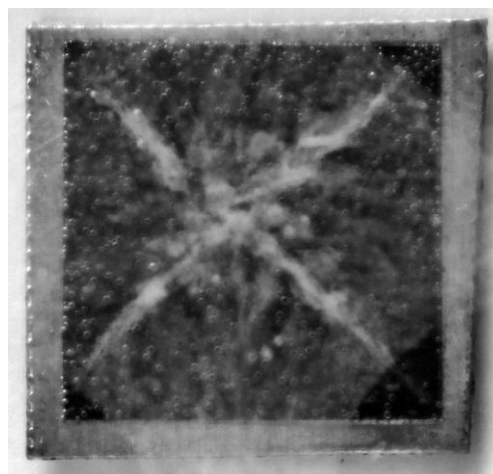
Впервые получены значения скоростей генерации водорода, характеризующие производительность различных образцов органических жидкостей с точки зрения получения молекулярного водорода. Показано, что скорости генерации водорода для них на порядок выше, чем для воды. Скорость генерации водорода зависит от молекулярной структуры и количества углерод-водородных связей в молекуле исследуемой жидкости. Наибольшие скорости генерации водорода наблюдаются при лазерном воздействии на этиловый и изопропиловый спирты. Хроматографическое определение состава облученных жидкостей показывает большое содержание в них ацетальдегидов.

В пятой главе представлены результаты, затрагивающие гидродинамические аспекты взаимодействия лазерного излучения с жидкостями и процессы самоорганизации пузырьков. В обоих случаях возможна передача момента вращения жидкости либо от лазерного пучка, либо от химической реакции взаимодействия металла с травителем.

Впервые экспериментально и теоретически описан новый тип диссипативных структур. Они образуются при подъеме микропузырьков водорода, испускаемых с поверхности во время химической реакции металла с используемой жидкостью. Механизм образования таких структур универсален и обусловлен положительной обратной связью между концентрацией пузырьков и потоками за счет вязкого взаимодействия. Было обнаружено, что пузырьки образуют стационарные структуры, симметрия которых зависит, но не совпадает с симметрией лазерно-облученных областей алюминиевой пластины. Разработанная теоретическая модель находится в хорошем соответствии с экспериментами (рис. 12).



а



б

Рис. 12. Сопоставление теоретического распределения плотности пузырьков над квадратной областью: а — расчетное распределение, б — экспериментальный снимок.

При некоторых допущениях давление растворенных газовых пузырьков описывается уравнениями, подобными уравнению состояния неидеального газа. Модель хорошо

описывает стационарные структуры, образованные пузырьками, для ряда геометрий лазерно-облученной области.

Успешное наблюдение самоорганизации пузырьков есть следствие уникального сочетания лазерной обработки металлов с относительно медленным химическим травлением алюминия. Подобные явления наблюдались как при травлении облученного алюминия растворами NaOH или аммиака, так и при химическом взаимодействии лазерномодифицированных пластин кремния с плавиковой кислотой.

В Заключение представлены основные результаты работы:

1. Экспериментально продемонстрировано, что коэффициент зеркального отражения ряда металлов и полупроводников (никель, нержавеющая сталь, медь, алюминий, кремний) может быть уменьшен на один-два порядка величины с помощью их многоимпульсной лазерной абляции в воздухе.
2. Установлено, что создание системы микроконусов на поверхности Si при его лазерной абляции приводит к увеличению эффективности солнечных элементов на основе кремния на 20%
3. Экспериментально показано, что морфология самоорганизующихся наноструктур зависит от лазерных параметров (длительность импульса, плотность энергии лазерного излучения, число импульсов, задержка между импульсами).
4. С помощью использования метода лазерной двойной экспозиции реализованы однородные двумерные массивы наноструктур на поверхностях SiC, W, Si.
5. Показано, что при воздействии фемтосекундных лазерных импульсов на систему периодических наноструктур с периодом λ возникает структура с периодом $\lambda/2$.
6. Исследован процесс образования мелкомасштабных периодических структур при воздействии фемто- и пикосекундных лазерных импульсов на металлы в жидкостях и на воздухе. Экспериментально и теоретически показано, что возникновение мелкомасштабных периодических структур связано с геометрией ванны расплава и термокапиллярной неустойчивостью типа Бенара-Марангони. Такого рода наноструктуры являются диссипативными.
7. При лазерной абляции твердых тел в жидкостях получены наночастицы уникальных морфологий. Установлено, что наличие двухвалентных ионов существенным образом способствует процессу образования цепочек наночастиц, а воздействие лазерного излучения на взвесь нанообъектов Co-Al приводит к формированию наночастиц с формой додекаэдра.
8. Обнаружено, что взаимодействие лазерного излучения с водными растворами наночастиц ведет к образованию продуктов ($\cdot\text{OH}$, H_2O_2 , H_2 , O_2) диссоциации молекул воды под действием лазерного пробоя плазмы. Выход продуктов диссоциации молекулы воды зависит

от концентрации и материала наночастиц. Показано, что углеродные нанообъекты, образующиеся при лазерном разложении органических жидкостей, являются затравками для их пиролиза, основными продуктами которого являются ацетальдегид и этанол.

9. Обнаружен новый тип диссипативных структур, образованных пузырьками водорода в процессе химического травления лазерно-модифицированных материалов. Экспериментально и теоретически исследована динамика установления стационарной картины самоорганизации газовых пузырьков на таких подложках. Механизм образования структур универсальный и обусловлен положительной обратной связью между концентрацией пузырьков и потоками жидкости за счет вязкого взаимодействия. Форма структур определяется геометрией лазерно-модифицированной области.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

A1. Barmina E. V., Shafeev G. A. Solar Cells Based on Laser-Modified Silicon //Physics of Wave Phenomena. – 2018. – V. 26. – №. 2. – P. 93-98.

A2. Barmina E. V. et al. Fabrication of Materials with Low Optical Reflectance Based on Laser-Microstructured Metal Surfaces //Physics of Wave Phenomena. – 2018. – V. 26. – №. 2. – С. 99-108.

A3. Бармина Е. В. и др. Образование наноструктур на поверхности тантала при его лазерной абляции в воде //Квантовая электроника. – 2009. – Т. 39. – №. 1. – С. 89-93.

A4. Бармина Е. В. и др. Генерация наноструктур на поверхности никеля при лазерной абляции в жидкости и их активность в гигантском комбинационном рассеянии //Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №. 4. – С. 346-348.

A5. Barmina E. V. et al. Laser control of the properties of nanostructures on Ta and Ni under their ablation in liquids //Journal of optoelectronics and advanced materials. – 2010. – V. 12. – №. 3. – P. 496-499.

A6. Бармина Е. В. и др. Генерация наноструктур при лазерной абляции металлов в жидкостях: новые результаты //Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №. 11. – С. 1012-1020.

A7. Barmina E. V., Stratakis E., Loukakos P. A., Shafeev G. A., Fotakis C. Ultrafast Laser-Assisted Surface Micro- and Nanostructuring // Ultrafast Laser Processing: From Micro- to Nanoscale. – Pan Stanford, 2013.

A8. Barmina E. V. et al. Laser ablation of titanium in liquid in external electric field //Applied Surface Science. – 2015. – V. 348. – P. 16-21.

A9. Barmina E. V., Kuzmin P. G., Shafeev G. A., Serkov A. A., Stratakis E. Femtosecond laser ablation of solids in liquids// Femtosecond lasers: New Research. – Nova Science Publisher, Inc., 2013.

- A10. Barmina E. V. et al. Laser-assisted generation of gold nanoparticles and nanostructures in liquid and their plasmonic luminescence // *Applied Physics A*. – 2014. – V. 115. – №. 3. – P. 747-752.
- A11. Serkov A. A., Barmina E. V. et al. Stainless steel surface wettability control via laser ablation in external electric field // *Applied Physics A*. – 2016. – V. 122. – №. 12. – P. 1067.
- A12. Barmina E. V. et al. Laser-assisted nanostructuring of Tungsten in liquid environment // *Applied Surface Science*. – 2012. – V. 258. – №. 15. – P. 5898-5902.
- A13. Barmina E. V. et al. Nano-textured W shows improvement of thermionic emission properties // *Applied Physics A*. – 2012. – V. 106. – №. 1. – P. 1-4.
- A14. Бармина Е. В., Серков А. А., Шафеев Г. А. Наноструктурирование монокристаллического карбида кремния пикосекундным ультрафиолетовым лазерным излучением // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43. – №. 12. – С. 1091-1093.
- A15. Barmina E. V. et al. Nanostructuring of single-crystal silicon carbide by femtosecond laser irradiation in a liquid // *Physics of Wave Phenomena*. – 2014. – V. 22. – №. 1. – P. 15-18.
- A16. Barmina E. V., Shafeev G. A., Stratakis E., Fotakis C. Nanostructuring of single crystal silicon carbide by picosecond UV laser radiation// *Международный патент № 1008582, дата выдачи 06.10.2015, срок действия до 01.08.2034.*
- A17. Barmina E. V. et al. Laser-assisted nanostructuring of Silicon in liquid environment // *Applied Physics A*. – 2014. – V. 117. – №. 1. – P. 359-364.
- A18. Barmina E. V. et al. Laser Nano-Structuring of Pre-Structured Substrates // *Journal of Laser Micro Nanoengineering*. – 2018. – V. 13. – №. 1. – P. 6-9.
- A19. Kirichenko N. A., Barmina E. V., Shafeev G. A. Theoretical and Experimental Investigation of the Formation of High Spatial Frequency Periodic Structures on Metal Surfaces Irradiated by Ultrashort Laser Pulses// *Physics of Wave Phenomena*. – 2018, – V. 26. – №. 1. – P. 264–273.
- A20. Бармина Е. В., Шафеев Г. А. Образование оболочечных наночастиц Fe@ Al при лазерном облучении смеси коллоидов в этаноле // *Квантовая электроника*. – 2018. – Т. 48. – №. 7. – С. 637-640.
- A21. Zhil'nikova M. I., Barmina E. V., Shafeev G. A. Laser-Assisted Formation of Elongated Au Nanoparticles and Subsequent Dynamics of Their Morphology under Pulsed Irradiation in Water // *Physics of Wave Phenomena*. – 2018. – V. 26. – №. 2. – P. 85-92.
- A22. Barmina E. V. et al. Laser Alloying of Co Nanorods and Al Nanoparticles in a Liquid // *ChemPhysChem*. – 2017. – V. 18. – №. 9. – P. 1069-1073.
- A23 Barmina E. V. et al. Optical properties of nanocomposites based on polymers and metal nanoparticles // *Physics of Wave Phenomena*. – 2017. – V. 25. – №. 3. – P. 165-169.

- A24. Barmina E. V., Simakin A. V., Shafeev G. A. Balance of O₂ and H₂ content under laser-induced breakdown of aqueous colloidal solutions //Chemical Physics Letters. – 2017. – V. 678. – P. 192-195.
- A25. Barmina E. V., Simakin A. V., Shafeev G. A. Hydrogen emission under laser exposure of colloidal solutions of nanoparticles //Chemical Physics Letters. – 2016. – V. 655. – P. 35-38.
- A26. Barmina E. V. et al. Stable Products of Laser-Induced Breakdown of Aqueous Colloidal Solutions of Nanoparticles//Journal of Laser Micro Nanoengineering. – 2018. – V. 12. – №. 3. – P. 254-257.
- A27. Бармина Е. В. и др. Генерация водорода при лазерном облучении органических жидкостей //Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 8. – С. 738-742.
- A28. Бармина Е. В. и др. Генерация водорода при лазерном облучении коллоидов железа и бериллия в воде //Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 6. – С. 533-538.
- A29. Barmina E. V. et al. Self-organization of hydrogen gas bubbles rising from the surface of the laser-irradiated aluminum target under its etching in a dilute alkaline solution //Physics of Wave Phenomena. – 2012. – V. 20. – №. 3. – P. 159-165.
- A30. Бармина Е. В. и др. самоорганизация ансамбля поднимающихся газовых пузырьков //Труды ИОФАН. – 2013. – Т. 69. – С. 71-85.
- A31. Barmina E. V., Kuzmin P. G., Shafeev G. A. Self-organization of hydrogen gas bubbles rising above laser-etched metallic aluminum in a weakly basic aqueous solution //Physical Review E. – 2011. – V. 84. – №. 4. – P. 045302.
- A32. Barmina E. V. et al. Self-organization of ascending-bubble ensembles //Physical Review E. – 2013. – V. 87. – №. 5. – P. 053001.
- A33. Barmina E. V., Shafeev G. A. Contactless Transfer of an Angular Momentum to a Liquid Layer Using a Scanning Laser Beam //Physics of Wave Phenomena. – 2018. – V. 26. – №. 4. – P. 259-263.

Список цитируемой литературы:

1. Sanchez F. et al. Whiskerlike structure growth on silicon exposed to ArF excimer laser irradiation //Applied physics letters. – 1996. – V. 69. – №. 5. – P. 620-622.
2. Pedraza A. J., Fowlkes J. D., Lowndes D. H. Silicon microcolumn arrays grown by nanosecond pulsed-excimer laser irradiation //Applied Physics Letters. – 1999. – V. 74. – №. 16. – P. 2322-2324.
3. Shen M. Y. et al. Formation of regular arrays of silicon microspikes by femtosecond laser irradiation through a mask //Applied physics letters. – 2003. – V. 82. – №. 11. – P. 1715-1717.
4. Dolgaev S. I. et al. Initial stage of the development of three-dimensional periodic structures in laser melting //Quantum Electronics. – 2004. – V. 34. – №. 8. – P. 771.

5. Karabutov A. V. et al. Low-field electron emission of Si microtip arrays produced by laser beam evaporation //Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. – 2003. – V. 21. – №. 1. – P. 449-452.
6. Zorba V. et al. Making silicon hydrophobic: wettability control by two-lengthscale simultaneous patterning with femtosecond laser irradiation //Nanotechnology. – 2006. – V. 17. – №. 13. – P. 3234.
7. Starikov D. et al. Spectral and surface analysis of heated micro-column arrays fabricated by laser-assisted surface modification //Infrared physics & technology. – 2004. – V. 45. – №. 3. – P. 159-167.
8. Ахманов С. А. и др. Воздействие мощного лазерного излучения на поверхность полупроводников и металлов: нелинейно-оптические эффекты и нелинейно-оптическая диагностика //Успехи физических наук. – 1985. – Т. 147. – №. 12. – С. 675-745.
9. Sipe J. E. et al. Laser-induced periodic surface structure. I. Theory //Physical Review B. – 1983. – V. 27. – №. 2. – P. 1141.
10. Заведеев Е. В. и др. Образование наноструктур при лазерной абляции серебра в жидкостях //Квантовая электроника. – 2006. – Т. 36. – №. 10. – С. 978-980.
11. Vorobyev A. Y., Guo C. Femtosecond laser nanostructuring of metals //Optics express. – 2006. – V. 14. – №. 6. – P. 2164-2169.
12. Голосов Е. В. и др. Фемтосекундная лазерная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2009. – Т. 90. – №. 2. – С. 116-120.
13. Завестовская И. Н. Лазерное наноструктурирование поверхности материалов //Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №. 11. – С. 942-954.
14. Reif J. et al. Ripples revisited: non-classical morphology at the bottom of femtosecond laser ablation craters in transparent dielectrics //Applied Surface Science. – 2002. – V. 197. – P. 891-895.
15. Dufft D. et al. Femtosecond laser-induced periodic surface structures revisited: a comparative study on ZnO //Journal of Applied Physics. – 2009. – V. 105. – №. 3. – P. 034908.
16. Lang V., Rank A., Lasagni A. F. Large Area One-Step Fabrication of Three-Level Multiple-Scaled Micro and Nanostructured Nickel Sleeves for Roll-to-Roll Hot Embossing //Advanced Engineering Materials. – 2017. – V. 19. – №. 8. – P. 1700126.
17. Neddersen J., Chumanov G., Cotton T. M. Laser ablation of metals: a new method for preparing SERS active colloids //Applied Spectroscopy. – 1993. – V. 47. – №. 12. – P. 1959-1964.
18. Fojtik A., Henglein A. Laser ablation of films and suspended particles in a solvent: formation of cluster and colloid solutions //Berichte der Bunsen-Gesellschaft. – 1993. – V. 97. – №. 2. – P. 252-254.

19. Noack J., Vogel A. Laser-induced plasma formation in water at nanosecond to femtosecond time scales: calculation of thresholds, absorption coefficients, and energy density //IEEE journal of quantum electronics. – 1999. – V. 35. – №. 8. – P. 1156-1167.
20. Lam J. et al. γ -Al₂O₃ nanoparticles synthesised by pulsed laser ablation in liquids: a plasma analysis //Physical Chemistry Chemical Physics. – 2014. – V. 16. – №. 3. – P. 963-973.
21. Ibrahimkuty S. et al. Nanoparticle formation in a cavitation bubble after pulsed laser ablation in liquid studied with high time resolution small angle x-ray scattering //Applied Physics Letters. – 2012. – V. 101. – №. 10. – P. 103104.
22. Lam J. et al. Dynamical study of bubble expansion following laser ablation in liquids //Applied Physics Letters. – 2016. – V. 108. – №. 7. – P. 074104.
23. Kennedy P. K. A first-order model for computation of laser-induced breakdown thresholds in ocular and aqueous media. I. Theory //IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1995. – V. 31. – №. 12. – P. 2241-2249.
24. Бункин Н. Ф., Бункин Ф. В. Бабстонная структура воды и водных растворов электролитов //Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – №. 9. – С. 933-952.
25. Linstrom P. J., Mallard W. G. NIST Standard Reference Database Number 69; National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, 2005 //Google Scholar.
26. Bunkin I. F., Luk'yanchuk B. S., Shafeev G. A. Thermal diffusion instability and formation of structures as a result of laser heating of absorbing liquids //Soviet Journal of Quantum Electronics. – 1985. – V. 15. – №. 12. – P. 1581.
27. Viznyuk S. A., Sukhodol'skiĭ A. T. Thermocapillary self-interaction of laser radiation in thin layers of an absorbing liquid //Quantum Electronics. – 1988. – V. 18. – №. 4. – P. 489-491.
28. Wu M., Gharib M. Experimental studies on the shape and path of small air bubbles rising in clean water //Physics of fluids. – 2002. – V. 14. – №. 7. – P. L49-L52.
29. Legendre D., Magnaudet J., Mougin G. Hydrodynamic interactions between two spherical bubbles rising side by side in a viscous liquid //Journal of Fluid Mechanics. – 2003. – V. 497. – P. 133-166.
30. Van Wijngaarden L. The mean rise velocity of pairwise-interacting bubbles in liquid //Journal of fluid mechanics. – 1993. – V. 251. – P. 55-78.
31. Mercado J. M. et al. On bubble clustering and energy spectra in pseudo-turbulence //Journal of fluid mechanics. – 2010. – V. 650. – P. 287-306.