

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 535.33: 621.373.8 (043.3)

Баззал Ходор

**ДИНАМИКА ПРОЦЕССОВ В АБЛЯЦИОННОЙ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМЕ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ФОРМИРОВАНИЕ МОЛЕКУЛЯРНЫХ
НАНОКЛАСТЕРОВ И НАНОПОРОШКОВ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 - оптика

Минск, 2022

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете**.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ -

Зажогин Анатолий Павлович,
доктор физико-математических наук, профессор.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Чумаков Александр Никитич,
доктор физико-математических наук, доцент,
главный научный сотрудник
Центра физики плазмы ГНУ «Институт физики
им. Б.И. Степанова НАН Беларуси»;

Пузырев Михаил Валентинович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией лазерной
плазмодинамики НИУ «Институт прикладных
физических проблем имени А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета.

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**Белорусский национальный технический
университет.**

Защита состоится 30 сентября 2022 г. в 14.00 часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: Минск, ул. Ленинградская, 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.

Почтовый адрес: пр-т Независимости 4, Минск, 220030.

Телефон ученого секретаря: 209-57-09.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан «15» июня 2022 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Одним из самых распространенных направлений в нанотехнологиях являются нанопорошковые технологии, поскольку нанопорошки находят применение в электронике, медицине, биологии, химическом катализе и других областях науки и техники. Важной практической задачей является развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами.

Особый интерес материаловедов привлекает нанокерамика на основе оксида алюминия (Al_2O_3). Она широко используется в микро- и нанoeлектронике благодаря высоким показателям износостойкости, плотности, твердости, прочности при изгибе, стойкости к химически агрессивным средам, теплопроводности и высокому напряжению пробоя (25 кВ/мм). Небольшие добавки нитрида алюминия улучшают теплопроводящие свойства нанокерамик. Введение в нанопорошок оксида алюминия небольшой добавки нанопорошка металлического алюминия обеспечивает дополнительное увеличение относительной плотности материала и улучшение однородности компактов.

Нанопорошки, полученные с помощью наносекундного лазерного излучения, в большинстве случаев имеют сферическую форму и малую степень агломерации, что хорошо соответствует требованиям технологии производства нанокерамики. Однако, из-за низкой производительности и высоких затрат энергии метод моноимпульсного лазерного воздействия не нашел широкого применения в производстве. Существенным недостатком, также ограничивающим применение этого метода при получении качественных нанопорошков, является возможность образования микрокапель размером $0,1 \div 1$ мкм и более при абляции мишеней.

Метод двухимпульсного наносекундного лазерного воздействия имеет значительно меньше недостатков. Он позволяет проводить одновременно высокочувствительный спектральный анализ, контролировать концентрацию возбужденных и заряженных частиц в плазме, управлять составом лазерной плазмы, направляемой в воздушную среду атмосферного давления.

Вместе с тем физические процессы, связанные с образованием лазерной плазмы, ее разлетом и формированием лазерного факела, осаждением продуктов на подложке настолько многофакторны, что трудно получить достаточно простые закономерности, описывающих их.

В связи с вышесказанным актуальность диссертационной работы обусловлена необходимостью как совершенствования существующих методик спектрального анализа процессов в лазерном факеле, так и изучения возможностей практического использования сдвоенных лазерных импульсов для получения нанопорошков Al, AlN, Al_2O_3 при воздействии только лазерного излучения на алюминиевые сплавы в воздушной атмосфере.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами, темами

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с заданиями, входящими в следующие программы и проекты:

ГПНИ «Электроника и фотоника»; тема 857/03 «Разработка лазерных атомно-эмиссионных многоканальных спектроскопических методов экспресс-анализа элементного состава биологических субстратов человека». 01.01.16-31.12.18 гг.; номер гос. регистрации: №20162093;

ГПНИ «Электроника и фотоника»; тема 519/03 «Разработка лазерных атомно-эмиссионных многоканальных спектроскопических методов экспресс-анализа элементного состава биологических субстратов человека с онкопатологией». 01.04.19-31.12.20 гг.; номер гос. регистрации: №20191561.

Цель и задачи исследования

Цель работы показать возможность и определить условия получения ионов, субоксидов и нитридов алюминия в лазерной плазме методом абляции алюминиевых мишеней сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере для использования в технологиях получения нанопорошков Al , Al_2O_3 , AlN и напылении тонких пленок.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие основные задачи:

- исследовать влияние параметров сдвоенных лазерных импульсов (интервала между импульсами, их энергий) на процессы образования атомов и ионов Al , O , N , молекул AlO и AlN по интенсивности их линий и полос в атомно-эмиссионных спектрах;

- изучить влияния количества последовательных сдвоенных импульсов в серии на процессы образования атомов и ионов Al , O , N , молекул AlN и AlO , Al_2O_3 и формирования микроканала при пробивке мишеней из сплавов алюминия;

- изучить динамику процессов поступления вещества из алюминиевых сплавов в абляционную плазму, возбуждаемую одиночными и сдвоенными лазерными импульсами, а также определить влияние основных компонентов сплавов и атмосферы на интенсивность спектральных линий элементов и полос молекул;

- исследовать влияние типа и величины расфокусировки возбуждающих импульсов, а также угла падения излучения на мишень на процессы формирования ионов алюминия, субоксидов и нитридов алюминия в плазме;

- оценить возможности практического получения смешанных нанопорошков алюминия, оксидов и нитридов алюминия, а также и содержащих в своем составе оксиды Cu и Mg , прекурсоров для получения новых типов нанокерамик.

Объектом исследования являются нанопорошки, получаемые при воздействии сериями сдвоенных мощных наносекундных лазерных импульсов на мишени из сплавов алюминия в атмосфере воздуха.

Предметом исследования являются процессы, влияющие на выход нанопорошков Al , Al_2O_3 и AlN при абляции мишеней из сплавов алюминия в атмосфере воздуха сериями сдвоенных лазерных импульсов, спектральный контроль процессов методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

– впервые показана возможность практического получения смесей нанопорошков Al , Al_2O_3 и AlN , прекурсоров для изготовления специальных нанокерамик, при воздействии серий мощных сдвоенных лазерных импульсов наносекундной длительности на поверхность образцов из алюминиевых сплавов в атмосфере воздуха;

– экспериментально определены оптимальные значения количества импульсов, временного интервала и энергии сдвоенных лазерных импульсов, обеспечивающие наиболее эффективный рост количества молекул AlO и AlN в лазерном факеле за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия, кислорода и азота на выходе из импульсного микросопла;

– определены параметры расфокусированных лазерных импульсов и условия воздействия на мишень, обеспечивающих необходимые соотношения ионов, субоксидов, нитридов алюминия в лазерном факеле при получении смешанных нанопорошков Al , Al_2O_3 и AlN для разработки нанокерамик перспективных для создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов;

– разработаны методики для практического получения смешанных нанопорошков Al , Al_2O_3 , AlN с оксидами Cu и Mg , которые можно использовать при получении нанопленок и нанокерамик специального назначения.

Положения, выносимые на защиту

1. Количество ионов алюминия, кислорода и азота в лазерной плазме увеличивается на несколько порядков при использовании для возбуждения сдвоенных лазерных импульсов с межимпульсным интервалом 8–12 мкс по сравнению с нулевым интервалом, при этом обеспечивается образование субоксидов и нитридов алюминия.

2. Образование ионов алюминия в лазерном факеле происходит преимущественно при энергии импульсов более 40 мДж и числе сдвоенных импульсов в серии порядка 10-15, в то же время, образование молекул субоксидов и нитридов алюминия в лазерном факеле наблюдается при увеличении количества последовательных импульсов до 50-60 при характерном размере сопла длиной $\approx 350-450$ мкм и диаметром $\approx 150-200$ мкм, что объяснено перемешиванием газа, содержащего ионы алюминия, кислорода и азота, на выходе из сопла.

3. Количество наноконплексов оксидов и нитридов алюминия, образующихся в лазерном факеле при воздействии на мишень серий из 50-60 импульсов с энергией более 40 мДж, расфокусированных в пределах ± 2 мм, уменьшается почти на порядок по сравнению с воздействием сфокусированными импульсами. Количество ионов алюминия с увеличением расфокусировки увеличивается в несколько раз. Для увеличения доли алюминия в смешанных нанопорошках, выгоднее использовать область положительной расфокусировки излучения лазера.

4. Использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов обеспечивает более чем стократное увеличение количества получаемого нанопорошка по сравнению с моноимпульсным облучением при одинаковых используемых энергетических условиях. Использование 10-15 высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов в серии позволяет получать смешанные нанопорошки, содержащие преимущественно наночастицы алюминия размером 55-60 нм и небольшое количество оксида алюминия. При использовании количества импульсов в серии порядка 50-60 преимущественно образуются нанопорошки, содержащие оксид алюминия с размером наночастиц 30-38 нм, небольшое количество нитрида алюминия с размером наночастиц 18-20 нм и алюминия (55-62 нм). При использовании расфокусированного лазерного излучения на +1 мм образуются смеси нанопорошков содержащих алюминий, оксид и нитрид алюминия с более широким размерным составом.

Личный вклад соискателя ученой степени

Содержание диссертационной работы отражает личный вклад соискателя в проведение экспериментальных и теоретических исследований, анализ и интерпретацию полученных результатов. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Вклад научного руководителя диссертационной работы д.ф.-м.н. профессора *А.П. Зажогина* состоял в формулировании темы диссертационной работы, определении основных целей и задач исследований, обосновании выбора объектов изучения,

обсуждении полученных результатов. Соавтор ряда работ д.ф.-м.н. профессор *Воропай Е.С.* участвовал в обсуждении практического использования результатов анализа эмиссионных спектров молекул и радикалов. Ряд работ опубликован совместно с *Фадаиян А.Р.* (объекты исследований - нанопленки нитрида алюминия), *Trinh H. N. (Цинь Н.Х)* (объекты исследований - жидкие биосубстраты человека), *Патапович М.П.* (объекты исследований - твердые биосубстраты человека, методы осаждения элементов), результаты которых не вошли в диссертацию. Научные сотрудники Алексеенко Н.А., Коваленко М.Н. – электронная микроскопия продуктов. Ряд работ опубликован со студентами Лычковским В. В. и Цинь Х., которым соискатель оказывал практическую помощь при выполнении ими курсовых и дипломных работ.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты диссертационной работы были представлены на следующих научных конференциях: Международная научно-практическая конференция «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 28-29 апреля 2015 г., 11-12 мая 2017 г., 16-17 мая 2019 г.), Международная научно-техническая конференция «Квантовая электроника» (Минск, 9-13 ноября 2015 г., 13-17 ноября 2017 г., 18-22 ноября 2019 г.), Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом» (Минск, 19-22 сентября 2017 г., 21-24 сентября 2021 г.), IX Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники» (Минск, 14-16 октября 2020 г.), Международная научно-практическая конференция «Физика конденсированного состояния» (Гродно, 16 апреля 2015 г., 21 апреля 2016 г., 21 апреля 2017 г.), V Республиканская научная конференция «Актуальные вопросы физики и техники» (Гомель, 21 апреля 2016 г.), Международная научно-техническая конференция «Микро- и нанотехнологии в электронике» (Нальчик, Россия, 1-6 июня 2015 г., 30 мая-4 июня 2016 г., 3-5 июня 2019 г.), Всероссийская, Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, 3-5 февраля 2016 г., 1-3 февраля 2017 г., 23-25 января 2019 г., 29-31 января 2020 г., 27-29 января 2021 г.), VIII Международная конференция «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» (Москва, 19-22 ноября 2019 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Результаты диссертационной работы опубликованы в 43 научных работах, в числе которых 6 статей в научных рецензируемых журналах (Вестник БГУ, «Журнал БГУ. Физика», ЖПС) в соответствии с пунктом 18 Положения о присуждении ученых

степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общим объемом 3,1 авторского листа), 7 статей в межвузовском сборнике научных трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов» (Россия), 30 статей в сборниках научных трудов и материалов конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка. Полный объем диссертационной работы составляет 121 страницу; включая 50 рисунков на 42 страницах; 11 таблиц на 9 страницах. Библиографический список содержит 200 наименований на 20 страницах, включая собственные публикации автора.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

В **главе 1** представлен обзор литературных данных по применению и процессах получения нанопорошков Al, AlN, Al₂O₃ различными физико-химическими методами. Отмечены основные недостатки и достоинства используемых на практике методов.

Рассмотрены вопросы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твердых тел, сопровождающиеся нагреванием, плавлением, испарением и взрывным вскипанием вещества. Проанализирована зависимость процессов формирования абляционной плазмы и ее последующей эволюции от параметров лазерных импульсов. Отдельное внимание уделено методическим основам получения нанопорошков с помощью лазерного излучения и методам лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (ЛАЭС).

В **главе 2** подробно описана используемая в работе экспериментальная установка на базе лазерного спектрометра LSS-1. Она позволяет использовать для абляции вещества и возбуждения спектров как одиночные (ОЛИ), так и сдвоенные (СЛИ) лазерные импульсы, сдвинутые во времени друг относительно друга. Это существенно расширяет возможности использования прибора как для проведения атомно-эмиссионного спектрального анализа, так и для разработки методов получения нанопорошков. Частота повторения импульсов 10 Гц. Длина волны излучения 1,064 мкм. Длительность импульса ≈ 15 нс.

Рассмотрены вопросы взаимодействия лазерного излучения с поверхностью твердых тел. Оценена зависимость процессов формирования приповерхностной лазерной плазмы и ее последующей эволюции от параметров лазерных импульсов. Детально рассмотрены методические основы

лазерного атомно-эмиссионного анализа, определения температуры в областях образования ионов и субоксидов AlO , а также вопросы изменения плотности мощности при расфокусировке и изменении угла падения лазерного излучения на поверхность мишени. Для возможности одновременного определения компонентов, входящих в состав лазерной плазмы, подобраны аналитические линии для $Al I$, $Al II$, $Al III$, $N II$, $O II$ и полосы AlN и AlO .

Глава 3 содержит результаты исследования условий и механизмов образования ионов алюминия, азота и кислорода, субоксидов и нитридов алюминия в лазерной плазме при воздействии серий одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха.

Динамика изменения атомного и ионного состава и образования нанокластеров Al , AlO и AlN в лазерной плазме исследована методом лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии (ЛАЭМС).

Изучено воздействие сдвоенных лазерных импульсов на пластинки из алюминиевых сплавов АД1 и Д16Т толщиной 1 мм в зависимости от энергии (10–75 мДж) и временного интервала между ними (0–100 мкс). Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер пятна фокусировки примерно 50 мкм, плотность мощности на мишени меняется от 10^9 до $2 \cdot 10^{11}$ Вт.см⁻².

Динамику образования молекул оценивали по интенсивности полос AlO (484,21 нм) и AlN (507,8 нм), ионов алюминия, кислорода и азота (прекурсоры для образования AlO , AlN) по интенсивности линий алюминия $Al II$ (466,3 нм), $Al III$ (452,92 нм), кислорода $O II$ (407,8 нм) и азота $N II$ (399,5 нм) в эмиссионных спектрах. На рисунке 1 в качестве примера приведена зависимость интенсивности полос субоксида AlO и нитрида алюминия AlN , линий ионов Al , $N II$ и $O II$ в спектрах алюминиевых сплавов от межимпульсного интервала. Энергия импульсов 40 мДж, интервал между импульсами изменялся от 0 до 70 мкс. Число последовательных сдвоенных импульсов в серии - 40. Размер пятна повреждения примерно 120 мкм.

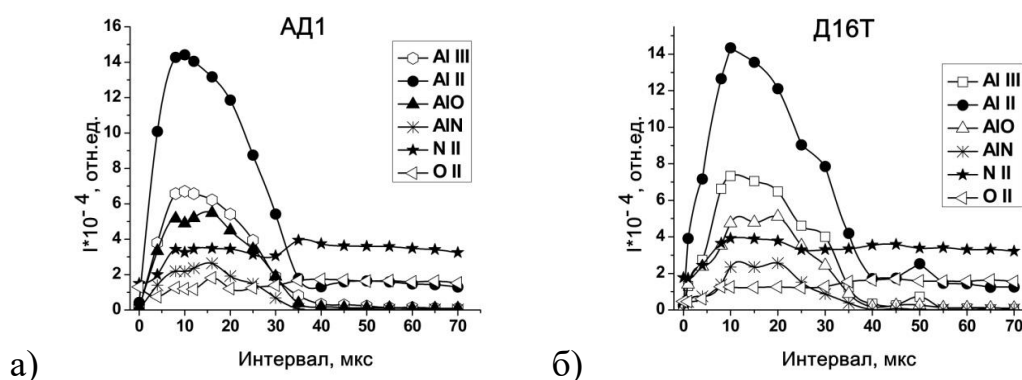


Рисунок 1. – Интенсивность линий ионов алюминия, кислорода и азота, полос AlN и AlO в спектрах сплавов в зависимости от межимпульсного интервала

Образование комплексов AlO , AlN и ионов алюминия в лазерной плазме более существенно при задержке воздействия второго импульса в интервале 1–40 мкс. С увеличением временной задержки интенсивность линий ионов $Al II$ и полос комплексов AlO , AlN уменьшается практически до нуля. Процесс образования ионов кислорода $O II$ и азота $N II$ идет практически антибатно, что свидетельствует о большой вероятности образования AlO и AlN из ионов Al , O и N .

Нами также показано, что интенсивность линий ионов Al , O и N и полос оксида и нитрида алюминия, зависит от энергии накачки (рисунок 2). Она неравномерно увеличивается с изменением интервала от 5 до 12 мкс. Наличие такого влияния при абляции мишени указывает на особенности взаимодействия излучения с продуктами конденсации паров металла внутри образующегося достаточно глубокого канала.

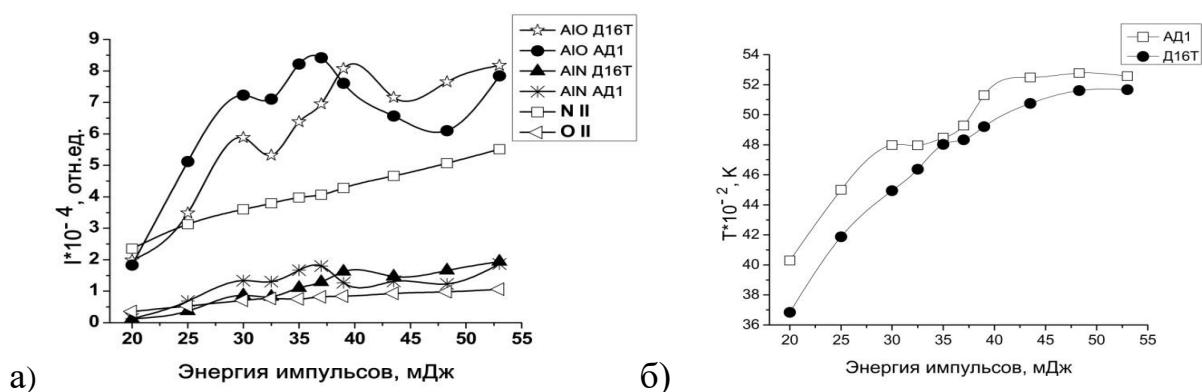


Рисунок 2. – Интенсивность полос AlN , AlO , линий $N II$ и $O II$ (а) и температуры плазмы (б) в зоне формирования AlO в зависимости от энергии

Скорость образования центров конденсации чрезвычайно резко зависит от величины переохлаждения пара. Процесс конденсации паров, образовавшихся после воздействия первого импульса, будет наступать тем быстрее, чем меньше температура приповерхностной лазерной плазмы. Определение температуры на выходе из микроканала, то есть в области, где формируются субоксиды алюминия, в зависимости от энергии оценивали по соотношению интенсивностей полос $AlO1$ (484,2 нм) и $AlO2$ (486,61 нм) (рисунок 2 б).

Очевидно, что с увеличением энергии импульсов наблюдается неравномерный рост концентрации молекулярных компонентов. Максимальное образование AlN , AlO соответствует энергии 35-55 мДж. При этом рост концентрации ионов O и N с увеличением энергии более равномерен. С увеличением энергии импульсов от 20 до 50 мДж интенсивность линии каждого газового компонента линейно возрастает в несколько раз. Дальнейшее увеличение энергии импульсов приводит к замедлению скорости роста уменьшению интенсивности полос нитрида и субоксида алюминия. Это, по-видимому, свидетельствует об изменении процесса их образования.

Описывая картину плазмообразования в воздушной среде, следует подчеркнуть, что она существенно усложняется из-за явления последействия, практически неизбежного при формировании глубоких отверстий последовательностью сдвоенных импульсов. В этих процессах происходит накопление аблированных микро- и наночастиц и кластеров в атмосфере образующихся полостей. При последующем воздействии лазерного излучения происходит низкопороговый оптический пробой воздуха, насыщенного наночастицами металла. Одновременно появляются два разнесенных в пространстве плазменных образования. Первое - обычный факел лазерной плазмы на аблируемой поверхности, второе - плазменно-пылевое облако также на оси лазерного пучка, но отстоящее от поверхности на некоторое расстояние. С одной стороны, это приводит к дополнительной экранировке, а с другой, по-видимому, более важной, к созданию высокотемпературного плазменного облака высокого давления в глубине микроканала, разлетающегося преимущественно по направлению отверстия.

Для оценки влияния указанных процессов на формирование лазерного факела в работе изучена динамика образования нанокластеров в плазме при воздействии СЛИ на алюминиевый сплав АД1 в атмосфере воздуха в зависимости от числа СЛИ (изменения глубины микроканала). Количественные результаты изменения интенсивности линий и полос молекул в зависимости от числа сдвоенных лазерных импульсов, полученные при временном интервале между импульсами 10 мкс, приведены на рисунке 3. Число на горизонтальной оси означает результирующую сумму из десяти последовательных импульсов.

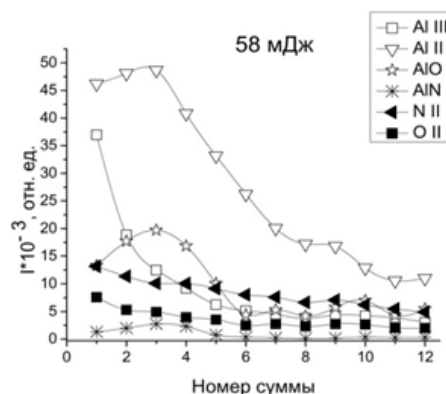


Рисунок 3. – Зависимость интенсивности линий и полос от суммы по 10 импульсов

В «последовательных» спектрах испускания плазмы наблюдаются резкие изменения интенсивности линий компонентов. Наибольшая интенсивность интересующих нас полос AlN и AlO наблюдается в интервале 15-45 импульсов. При числе импульсов от 0 до 10 образование продуктов меньше. Это можно объяснить эффективным удалением частиц из пока еще мелкого кратера за счет конвективных потоков воздуха. Аналогичные результаты получены и при других энергиях импульсов.

Следует обратить внимание, что при падении в 2–4 раза интенсивности линии алюминия Al III примерно с 10-го импульса практически одновременно растет интенсивность полос AlO и AlN. Интенсивность же ионной линии Al II во всем диапазоне снижается только на 20–30 %. Это является подтверждением более активного участия двукратно ионизованных ионов алюминия Al III в процессе термохимического образования AlO и AlN. Для дальнейшей

характеризации происходящих процессов нами дополнительно изучена динамика пробоя мишени. Количество импульсов, соответствующих пробоем отверстия,

позволяет определить среднюю линейную скорость абляции. На рисунке 4 приведена средняя толщина снимаемого слоя в расчете на импульс при изменении энергии импульсов от 15 до 51 мДж и задержке импульсов в интервале 0–15 мкс.

Характерное значение пороговой энергии потока излучения, соответствующее формированию слоя плазмы, экранирующего мишень от лазерного излучения, может быть установлено по измерению средней скорости абляции. При энергии импульсов примерно 15 мДж средние скорости абляции практически не зависят от интервала. Происходит преимущественное удаление расплавленного материала из лунки за счет увеличения давления при кипении. При увеличении энергии выше 30 мДж и временного интервала более 1 мкс средняя скорость абляции практически перестает зависеть от энергии. В этом случае преимущественное удаление материала происходит за счет испарения и ограничивается быстрым образованием плазмы. В промежуточной области энергий имеет место смешанный процесс – плавление, кипение, парообразование и испарение. В то же время при нулевом интервале, за счет более раннего образования экранирующей плазмы, число импульсов, необходимых для пробоя образца увеличивается от сотен до нескольких тысяч.

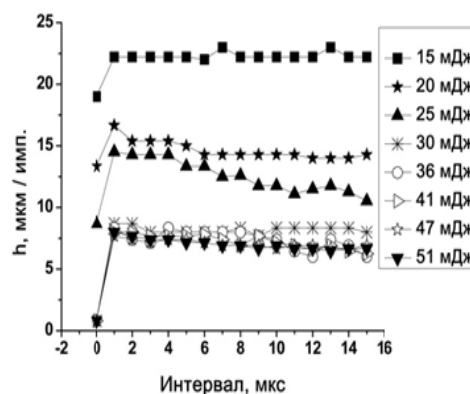


Рисунок 4. – Зависимость средней линейной скорости абляции мишени от энергии импульсов и интервала между импульсами

Остановим внимание на процессах формирования кратера в результате лазерной абляции мишени. При высоких плотностях мощности наносекундного лазерного излучения ($q \sim 10^8 - 10^{11}$ Вт/см²) формируются кратеры, вид которых зависит от многих параметров (энергия и частота повторения импульсов, наличие газовой среды перед мишенью, материал мишени и др.). При импульсно-периодическом воздействии лазерных импульсов в одну точку мишени образуются глубокие микроканалы, в которых наблюдается существенное возрастание температуры лазерной плазмы, увеличение количества сгенерированных нанокластеров. Это – большое преимущество конусообразных форм микроканалов, которые проявляют свойства микросопла (рисунок 5).

При увеличении энергии и количества последовательных импульсов в серии до

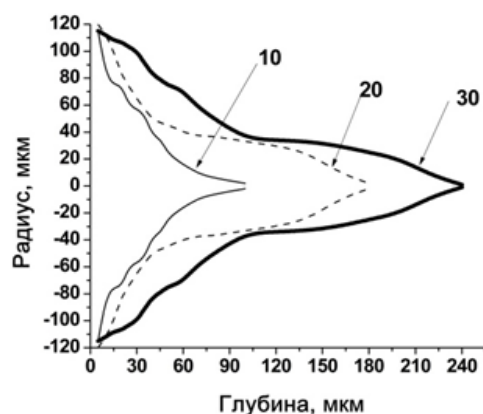


Рисунок 5. – Зависимость параметров канала от количества импульсов (энергия импульсов 38 мДж)

50-60 рост количества AlN и AlO обеспечивается за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия, кислорода и азота на выходе из импульсного микросопла, Длина его - $\approx 350-450$ мкм, диаметр - 150-200 мкм. С увеличением количества импульсов в серии и соответствующим увеличением длины сопла выход нанокластеров AlO и AlN падает.

Геометрия сопла определяет концентрацию кластеров и их распределение за срезом сопла. Размер среза сопла зависит от энергии и количества импульсов (рисунок 6).

Влияние энергии импульса на форму входного кратера микроканала практически нивелируется после 10–20 импульсов. Примерно с такого же количества импульсов наблюдается увеличение интенсивности полос нитрида и оксида алюминия, образующихся в расширяющейся плазме (рисунок 3).

В главе 4 приводятся результаты исследований процессов формирования нанокластеров в лазерном факеле в зависимости от изменения плотности мощности лазерного излучения путем расфокусировки и угла его падения на мишень из алюминиевых сплавов АД1 и Д16Т.

Найдено, что условия фокусировки оказывают значительное влияние на профиль лунки. С изменением расстояния между плоскостью фокусировки и поверхностью материала увеличивается радиус лунки и уменьшается ее глубина. Определены временные интервалы между импульсами (5–15 мкс), энергии и параметры расфокусировки излучения, обеспечивающие возможность получения необходимых для формирования молекулярных нанокластеров концентраций одно- или двукратно ионизированных ионов Al, O и N. Показано, что существенное увеличение поступления AlN и радикалов AlO в плазму происходит при последовательном воздействии на мишень серии расфокусированных на $-0,5-1$ мм сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними 10 мкс (рисунок 7).

В первую очередь виден рост интенсивности полос AlN и AlO с увеличением энергии и плотности мощности и одновременное существенное

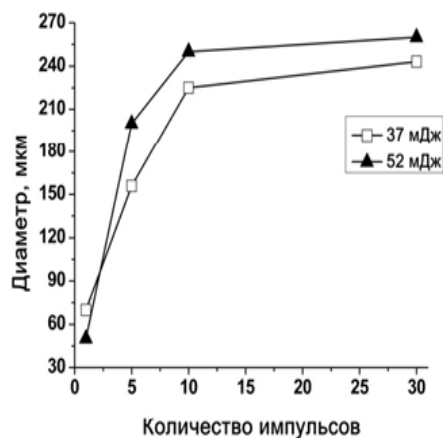


Рисунок 6. – Диаметр канала на поверхности Мишени в зависимости от энергии и количества импульсов

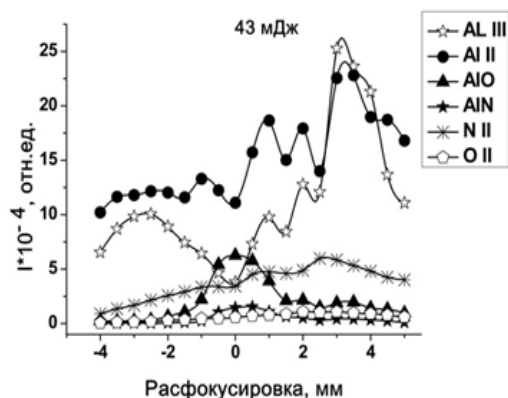


Рисунок 7. – Зависимость интенсивности линий ионов Al, N, O и полос AlN и AlO в спектрах от расфокусировки

уменьшение интенсивности линии Al III (452,92 нм). Наблюдается несколько меньшее изменение интенсивности линий O II и N II при малой расфокусировке, что также свидетельствует о непосредственном участии Al III в термохимическом процессе образования оксидов и нитридов алюминия. При расфокусировке более $\pm 1,5$ мм интенсивность линии ионов Al III увеличивается в несколько раз в сравнении с нулевой расфокусировкой, интенсивность линий ионов Al II, N II и O II также монотонно увеличивается. Одновременно с этим снижается интенсивность полос AlN и AlO практически до нуля, Эти факты подтверждают механизм образования оксидов и нитридов алюминия из ионов алюминия Al III, N II и O II.

Особый интерес представляет собой практически симметричное изменение интенсивности спектральных линий всех компонентов факела независимо от типа расфокусировки. Это указывает на наличие дополнительных механизмов возбуждения атомов и ионов при расфокусировке. Так, при $\Delta f < 0$ и межимпульсном интервале 10 мкс практически весь объем абляционной плазмы, образованный первым импульсом, расширяется внутри конуса лазерного излучения и взаимодействует со вторым импульсом. В случае положительной расфокусировки большая доля испаренного вещества в процессе разлета оказывается за пределами зоны действия лазерного луча, хотя и при $\Delta f > 2$ мм часть атомов алюминия еще эффективно ионизируется излучением с высокой плотностью потока излучения в точке фокуса.

В результате исследований выяснено, что скорость образования субоксидов и нитридов алюминия в лазерном факеле значительно зависит от количества расфокусированных последовательных сдвоенных импульсов. Для оценки и понимания скрытых процессов, происходящих при пробое мишени, нами определены средние толщины снимаемого слоя при разных значениях энергии расфокусированных импульсов (рисунок 8).

Особого внимания заслуживает практически симметричное снижение толщины снимаемого слоя в зависимости от величины расфокусировки для импульсов малых энергий. Такая симметрия указывает на преимущественный вклад теплового механизма абляции и, значит, меньшую величину плотности факела. Это означает, что при $\Delta f = 0$ большая часть поступающей энергии второго импульса идет на плавление и испарение материала, обеспечивая большую скорость сверления отверстия.

Оценивая полученные результаты видим, что положительная расфокусировка пучка более резко влияет на скорость пробивки. При расфокусировке на $1 \div 1,5$ мм средняя толщина снимаемого слоя стремится к

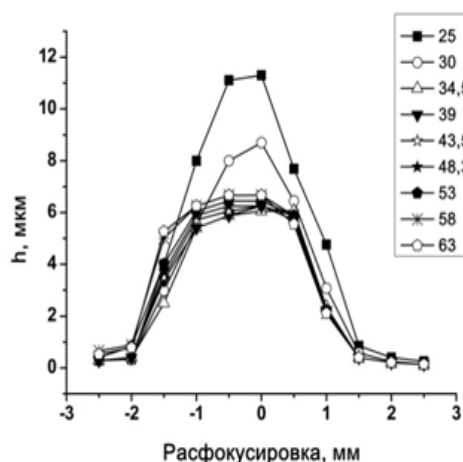


Рисунок 8. - Средние значения слоя материала, удаляемого за импульс

нулю практически независимо от энергии импульса. При отрицательной расфокусировке влияние ее величины несколько менее значимо.

Кроме того, при энергии импульсов более 34,5 мДж число импульсов для пробоя N_n практически не зависит от расфокусировки в пределах от -1 до +0,5 мм, а толщина испаряемого слоя покрытия также практически одинакова. При снижении плотности потока излучения уменьшается и доля энергии, распространяющейся вглубь образца в каждой точке лазерного пятна. Это дает возможность плавного изменения количества молекулярных нанокластеров в широком диапазоне значений энергии импульсов, что является важным достоинством данного метода управления плотностью потока q .

Для разработки технологии получения нанопорошков и напыления тонких пленок, уточнения процессов, происходящих как на поверхности, так и в лазерной плазме внутри образующегося канала, нами проведено исследование влияния угла падения пучка на поверхность при пробое мишени сериями сдвоенных лазерных импульсов. Изучена динамика процесса формирования нанокластеров AlN и AlO в лазерной плазме в глубине кратера при облучении мишени из сплава Д16Т в зависимости от энергии импульса (20÷60 мДж), временного интервала между ними (0÷20 мкс) и угла падения лазерного излучения на мишень от 90° до 30°.

В итоге установлено, что последовательное воздействие на мишень серий сдвоенных лазерных импульсов с энергией 50-60 мДж, временным интервалом между ними 10 мкс под углом $\approx 75^\circ$ приводит к максимальному увеличению образования AlO и AlN в лазерном факеле (рисунок 9). Количество молекул AlO и AlN в лазерном факеле увеличивается на 15-20 %, по сравнению с обычно используемой на практике схемой воздействия на мишень под углом 90° и в 4-7 раз выше, чем под другими меньшими углами. Это дает дополнительную возможность использования такого метода абляции для контроля и управления составом и характеристиками лазерного факела при получении нанопорошков.

Результаты проведенных исследований использовали для демонстрации возможности практического получения нанопорошков. Для этого мишень помещали в стеклянную кювету размером 40x20x30 мм, накрытую крышкой. Использованы следующие параметры СЛИ. Энергия импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс. Облучение проводили сериями из 50 сдвоенных импульсов на одну точку в течение 10 минут. Суммарное количество точек 100 с шагом 0,4 мм. Площадь облучения 4x4 мм². Для анализа получаемых продуктов, осевших на поверхность пластинок из кремния,

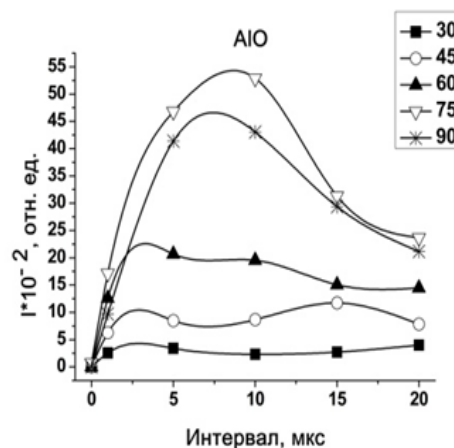


Рисунок 9. – Зависимость интенсивности полосы AlO в спектрах от интервала между импульсами и угла падения излучения для энергии 54 мДж

установленных вне зоны распространения лазерного факела (на дне и одной из сторон стеклянной кюветы), использовали сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max.

Изображение агломератов наночастиц на поверхности пластинки, синтезированных при воздействии 50 сдвоенных лазерных импульсов (СЛИ) на мишень из алюминиевого сплава АД1 приведены на рисунке 10а. Для сравнения на рисунке 10б приведены снимки, полученные при воздействии на мишень одиночными лазерными импульсами (ОЛИ) в тех же условиях.

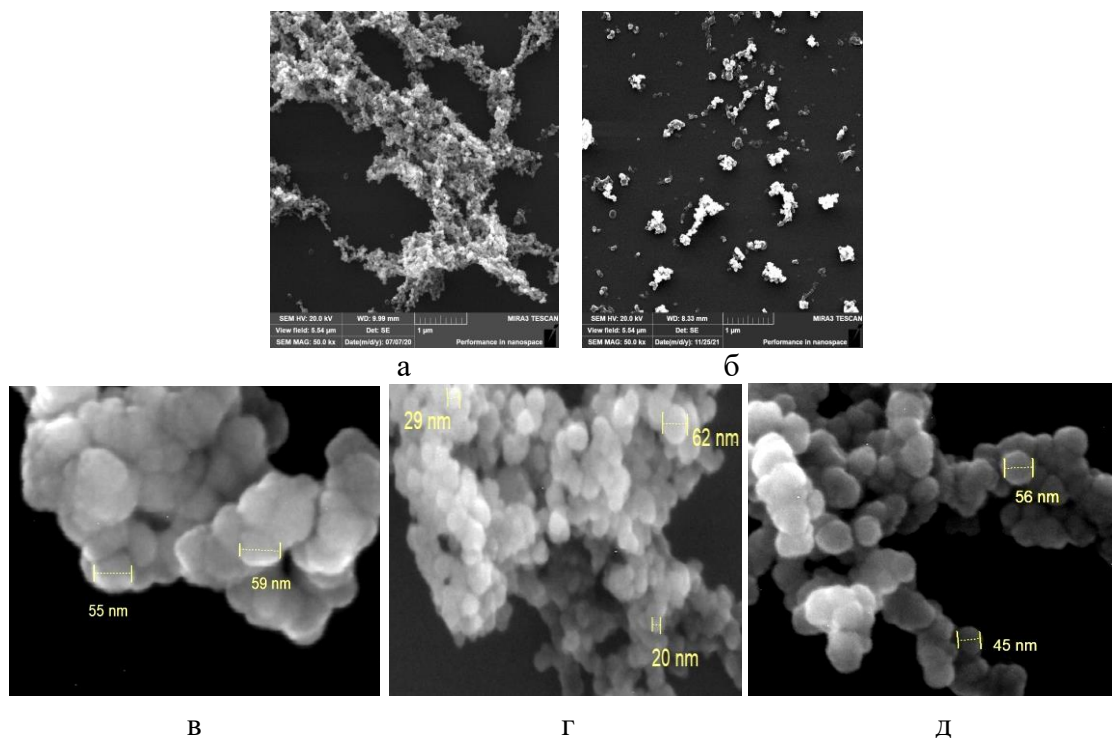


Рисунок 10. – Изображения наночастиц и агломератов: а – СЛИ; б – ОЛИ; в – Al и Al_2O_3 ; г – Al_2O_3 , AlN и Al; д – Al, Al_2O_3 и AlN

Изображения наночастиц, полученных при воздействии разного числа импульсов, приведены на рисунке 10в - 15 импульсов в серии, а на рисунке 10г - 50 импульсов. Также на рисунке 10д приведены снимки, полученные при использовании тех же параметров лазерных импульсов как при 10в и 10г, но расфокусированных на 1 мм.

Из анализа снимков совершенно очевидно, что использование высокоинтенсивных СЛИ обеспечивает более чем стократное увеличение количества получаемого нанопорошка, содержащего Al, Al_2O_3 и AlN, по сравнению с ОЛИ при одинаковых используемых условиях. Использование 10-15 высокоинтенсивных СЛИ в серии позволяет получать смешанные нанопорошки, содержащие преимущественно наночастицы Al размером 55-60 нм и небольшое количество Al_2O_3 . При использовании в серии порядка 50-60 импульсов преимущественно образуются нанопорошки, содержащие

Al_2O_3 с размером наночастиц 30-38 нм, небольшое количество AlN (18-20 нм) и наночастиц Al (60-62 нм). При использовании расфокусированного лазерного излучения на +1 мм получены смеси нанопорошков, содержащих Al , Al_2O_3 и AlN с различным размерным составом.

Таким образом, варьируя экспериментальные условия, метод позволяет целенаправленно изменять состав нанопорошков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Показаны преимущества двухимпульсного воздействия на мишени из алюминиевых сплавов при лазерном получении нанопорошков. Переход от одноимпульсного к двухимпульсному воздействию при одинаковой энергии лазерного излучения приводит к увеличению интенсивности спектральных линий ионов Al , N , O , полос AlN и AlO и результирующему увеличению выхода нанопорошка более чем на два порядка [1-6, 8, 10, 11-14, 19, 21, 27, 28, 30-40].

2. Выявлены особенности лазерного воздействия второго импульса и его роль в механизмах образования продуктов абляции. Воздействие второго импульса на продукты абляции приводит к интенсивному смешиванию потока испарившихся атомов и ионов с активизированной воздушной плазмой, получающейся в результате образования в воздухе лазерной искры. Эффективное образование субоксидов и нитридов алюминия происходит в результате снижения температуры примерно до 4500-5000 К за счет расширения и турбулентного перемешивания образовавшейся смеси [5, 10, 28, 30-34].

3. Определены параметры СЛИ (количество сдвоенных лазерных импульсов, плотность энергии), необходимые для образования факела, содержащего субмикронные частицы Al , AlO , AlN . Описан процесс формирования формы канала, обеспечивающей рост количества AlN и AlO за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия, кислорода и азота на выходе из импульсного микросопла длиной $\approx 350-450$ мкм и диаметром $\approx 150-200$ мкм [2, 6, 8, 10, 11, 20, 21, 36, 38-40].

4. Определена энергия импульсов (40–60 мДж), временные интервалы между импульсами (8-12 мкс), параметры расфокусировки излучения, обеспечивающие возможность получения необходимых соотношений количества субоксидов AlO , нанокластеров AlN и Al в лазерном факеле. Оценены возможности использования и определены условия получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов смешанных нанопорошков Al , Al_2O_3 , AlN с оксидами Cu и Mg для получения пленок и нанокерамик специального назначения [1-9, 11-13, 15, 16, 19, 20, 22-25, 31, 33, 35-43].

5. Показано, что воздействие сериями сдвоенных лазерных импульсов, с временным интервалом между ними 8–12 мкс и энергией 50–60 мДж, на мишень под углом $\approx 75^\circ$ приводит к увеличению на 15–20 % количества молекул AlO и AlN в лазерном факеле по сравнению с обычно используемой на практике схемой воздействия под углом 90° . Воздействие под меньшими углами дает результат в 4–7 раз ниже [3, 26, 29].

6. Показана зависимость компонентного состава нанопорошков от числа используемых в серии высокоинтенсивных СЛИ. Приведены практические примеры синтеза нанопорошков Al , Al_2O_3 и AlN . Использование 10–15 высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов позволяет получать смешанные нанопорошки, содержащие преимущественно наночастицы Al размером 55–60 нм и небольшое количество Al_2O_3 . При использовании количества импульсов в серии порядка 50 преимущественно образуются порошки, содержащие Al_2O_3 с размером наночастиц 30–38 нм, небольшое количество AlN с размером наночастиц 18–20 нм и наночастиц Al (60–62 нм). При использовании расфокусированного на +1 мм лазерного излучения получены смеси нанопорошков, содержащих Al , Al_2O_3 и AlN с различным размерным составом [5–13, 17, 18, 38–43].

Рекомендации по практическому использованию результатов

В ходе проведения исследований в рамках диссертационной работы был получен ряд новых научных результатов, которые могут быть рекомендованы для практического использования:

- Энергетические преимущества применения сдвоенных лазерных импульсов расширяет возможности их использования и для оксидов и нитридов других металлов, перспективных для создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов.

- Предложенные способы управления скоростью поступления нанокластеров Al , Al_2O_3 и AlN в лазерный факел путем расфокусировки, а также изменением угла падения лазерного пучка на мишень можно использовать для повышения качества нанопленок и нанокерамик, получаемых и из других соединений.

- Разработанные методики получения смешанных нанопорошков Al , Al_2O_3 , AlN с оксидами Cu и Mg могут использоваться при получении нанопленок и нанокерамик специального назначения.

Список публикаций соискателя ученой степени**Статьи в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоения ученых званий в Республике Беларусь**

1. Баззал, Х. Процессы образования нитрида алюминия в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Вестн. Бел. гос. ун-та. Сер. 1. – 2016. – № 1. – С. 26–33.

2. Study of aluminum nitride formation in plasma with an effect of double laser pulses on the D16T aluminum alloy in air / H. N. Trinh, Kh. Bazzal, A. R. Fadaeian, A. P. Zajogin // Photonics letters of Poland. - 2016. - Vol. 8, № 3. – P. 70-72.

3. Баззал, Х. Исследование процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. - 2017. - № 1. – С. 34-42.

4. Баззал, Х. Процессы образования нитрида алюминия в плазме при воздействии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминий в атмосфере воздуха / Х. Баззал, В. В. Лычковский, А. П. Зажогин // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. - 2018. - № 3. - С. 81-90.

5. Процессы образования оксидированных нанопорошков алюминия при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, N. H. Trinh, А. П. Зажогин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. – Т. 88, № 1. – С. 96-103.

(Formation of oxidized aluminum nanopowders by exposing aluminum to a series of double laser pulses in air / Kh. Bazzal, N. A. Alekseenko, E. S. Voropay, M. N. Kovalenko, N. H. Trinh, A. P. Zazhogin // J. of Applied spectroscopy. – 2021. - Vol. 88, № 1. - P. 85-91.)

6. Процессы образования нанопорошков Al_2O_3 и AlN при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, М. П. Патапович, А. П. Зажогин // Журнал прикладной спектроскопии. – 2021. - Т. 88, № 2. – С. 211-220.

(Processes of formation of Al_2O_3 and AlN nanopowders when aluminum is exposed to a series of double laser pulses in the air atmosphere / Kh. Bazzal, N. A. Alekseenko, E. S. Voropay, M. N. Kovalenko, M. P. Patapovich, A. P. Zazhogin // J. of Applied spectroscopy. – 2021. - Vol. 88, № 2. - P. 274-282.)

Статьи в других научных изданиях

7. Спектральные исследования процессов образования радикалов AlO и AlN в плазме при воздействии на оксидированный алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / А. Р. Фадаиян, Баззал Ходор, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2014. – Вып. 6. – С. 409-414.

8. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. Р. Фадаиян, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2015. – Вып. 7. – С. 70–75.

9. Спектральные исследования влияния расфокусировки на процессы образования AlO и AlN в плазме при воздействии лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, М. П. Патапович // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2019. – Вып. 11. – С. 48–56.

10. Исследование влияния формы канала на процессы образования нанокластеров AlN и AlO в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в воздушной атмосфере / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, М. П. Патапович // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2019. – Вып. 11. – С. 57-64.

11. Спектральные исследования процессов образования нанопорошков алюминия при воздействии короткими сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, N. H. Trinh, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2020. – Вып. 12. – С. 8–15.

12. Спектральные исследования процессов образования нанопорошков Al_2O_3 и AlN при воздействии на алюминий длинными сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, М. П. Патапович, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов:

межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2020. – Вып. 12. – С. 516–524.

13. Исследования процессов образования нанопорошков Al_2O_3 и Al в плазме при воздействии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминий в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, Н. А. Алексеенко, М. Н. Коваленко, N. G. Trinh, А. П. Зажогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов: межвуз. сб. науч. тр. / Тверской гос. ун-тет; под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова. – Тверь, 2021. – Вып. 13. – С. 8–17.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

14. Баззал, Х. Исследование влияния междуимпульсного интервала на эффективность процессов пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами / Х. Баззал, Х. Цинь // Физика конденсированного состояния : материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16 апреля 2015 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков [и др.]. - Гродно: ГрГУ, 2015. - С. 7-9.

15. Баззал, Х. Исследования процессов образования радикалов AlO и AlN в плазме от расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов при воздействии их на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Х. Цинь // Физика конденсированного состояния: материалы XXIII Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 16 апреля 2015 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков [и др.]. - Гродно: ГрГУ, 2015. - С. 9-11.

16. Спектральные исследования процессов образования радикалов AlO и AlN в плазме от расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов при воздействии их на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / А. Р. Фадаиян, Ходор Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния: материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28-29 апреля 2015 г. / Мин-во обр. РБ, Науч.-ис. учр. "Ин-т прикл. физ. проб. им. А. Н. Севченко" БГУ; редкол.: В. И. Попечиц [и др.]. – Минск, 2015. – С. 111–114.

17. Воропай, Е. С. Спектральные исследования процессов при напылении тонких пленок оксидов цинка и меди из латуни на поверхность стекла сдвоенными лазерными импульсами при атмосферном давлении воздуха / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, Х. Баззал // Микро- и нанотехнологии в электронике: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 1-6 июня 2015 г. / Мин-во обр. и науки РФ, РФФИ; Нанотехнол. о-во России;

Каб.-балк. гос. универ.; отв. ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2015. – С. 180–182.

18. Исследование влияния междуимпульсного интервала на процессы образования наночастиц и фракталов оксидов олова при напылении тонких пленок на поверхность стекла сдвоенными лазерными импульсами в воздухе / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, Баззал Ходор, А. П. Зажогин // Микро- и нанотехнологии в электронике: материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 1-6 июня 2015 г. / Мин-во обр. и науки РФ, РФФИ; Нанотехнол. о-во России; Каб.-балк. гос. универ.; отв. ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2015. – С. 197–199.

19. Исследования процессов образования радикалов АЮ в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // Квантовая электроника: материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9-13 ноября 2015 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 190–191.

20. Исследования процессов образования радикалов АЮ в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // V Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 3-5 февраля 2016 г. / НИЯУ МИФИ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2016. – С. 247-248.

21. Баззал, Х. Процессы образования нитрида алюминия в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха [Электронный ресурс] / Х. Баззал, Х. Цинь // Актуальные вопросы физики и техники : материалы V Респ. науч. конф. студ., магистр. и аспирант., Гомель, 21 апреля 2016 г. В 3 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: А.В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ, 2016. – Ч. 1. – С. 124-127. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

22. Баззал, Х. Исследование влияния расфокусировки на процессы пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами [Электронный ресурс] / Х. Баззал, Х. Цинь // Актуальные вопросы физики и техники : материалы V Респ. науч. конф. студ., магистр. и аспирант., Гомель, 21 апреля 2016 г. В 3 ч. / ГГУ им. Ф. Скорины; редкол.: А.В. Рогачев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ, 2016. – Ч. 1. – С. 128-130. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

23. Баззал, Х. Исследование влияния расфокусировки на эффективность процессов пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами / Х. Баззал, Х. Цинь // Физика конденсированного состояния: материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. аспирант., магистр. и студ., Гродно, 21 апреля 2016 г. / ГрГУ

им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. - Гродно : ГрГУ, 2016. - С. 16-18.

24. Баззал, Х. Исследование процессов образования нитрида алюминия в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Х. Цинь // Физика конденсированного состояния: материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 21 апреля 2016 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. - Гродно: ГрГУ, 2016. – С. 13–15.

25. Воропай, Е. С. Исследование влияния расфокусировки на процессы образования радикалов АЮ в плазме при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на алюминий в атмосфере воздуха / Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, Х. Баззал // Микро- и нанотехнологии в электронике : материалы VIII Междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 30 мая-4 июня 2016 г. / Мин-во обр. и науки РФ, РФФИ; Нанотехнол. о-во России; Каб.-балк. гос. универ.; отв. ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2016. – С. 54–57.

26. Исследование процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян, А. П. Зажогин // VI Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 1-3 февраля 2017 г. / Мин. образ. и науки РФ; РАН; Гос. Корп. по атом. энергии «Росатом»; НИЯУ МИФИ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2017. – С. 510–511.

27. Спектральные исследования процессов образования радикалов АЮ и АIN в плазме при воздействии одиночных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А. П. Фадаиян, Х. Цинь, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин // Материалы IV Междунар. науч.-практ. конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния», Минск, 11–12 мая 2017 г. / Мин-во обр. РБ, Науч.-ис. учр. "Ин-т прикл. физ. проб. им. А. Н. Севченко" БГУ; редкол.: В. И. Попечиц (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2017. – С. 7–9.

28. Баззал, Х. Исследование влияния междуимпульсного интервала на процессы пробивки металлов сдвоенными лазерными импульсами / Х. Баззал, Х. Цинь // Физика конденсированного состояния: материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 20 апреля 2017 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. - Гродно : ГрГУ, 2017.– С. 5–7.

29. Баззал, Х. Исследование процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал,

Х. Цинь // Физика конденсированного состояния: материалы XXV Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, Гродно, 20 апреля 2017 г. / ГрГУ им. Я. Купалы, физ.-техн. фак.; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2017. – С. 7-9.

30. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Фадаиян, А. П. Зажогин // Взаимодействие излучений с твердым телом (ВИТТ-2017): материалы 12-й Междунар. конф., Минск, 19-22 сентября 2017 г. / Мин-во обр. РБ [и др.]; редкол.: В. В. Углов (отв. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2017. – С. 33–35.

31. О влиянии формы канала на процессы образования AlN при воздействии на алюминий серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Фадаиян, А. П. Зажогин // "Квантовая электроника": материалы XI Междунар. науч.-технич. конф., Минск, 13-17 ноября 2017 г. / Мин. обр. РБ [и др.]; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2017. – С. 212–213.

32. Исследование влияния межимпульсного интервала на процессы образования AlN при воздействии на алюминиевую мишень сдвоенными лазерными импульсами / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, В. В. Лычковский // VIII Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 23-25 января 2019 г. / НИЯУ МИФИ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2019. – С. 549-550.

33. Спектральные исследования влияния расфокусировки на процессы образования AlO и AlN в плазме при воздействии лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в воздухе / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, В. В. Лычковский // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы V Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 16-17 мая 2019 г. / Мин-во обр. РБ, НИУ "Ин-т прикл. физ. пробл. им. А. Н. Севченко" БГУ; редкол.: В. И. Попечиц (глав. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 5-8.

34. Исследования влияния формы канала на процессы образования нанокластеров AlN в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в воздушной атмосфере / А. П. Зажогин, Е. С. Воропай, Баззал Ходор, В. В. Лычковский // Микро- и нанотехнологии в электронике: материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Нальчик, Россия, 3–8 июня 2019 г. / Мин-во обр. и науки РФ, РФФИ; Нанотехнол. о-во России; Каб.-балк. гос. универ.; отв. ред. А. М. Кармоков. – Нальчик, 2019. – С. 398-401.

35. Спектральные исследования влияния расфокусировки на процессы образования AlO и AlN в плазме при воздействии лазерных импульсов на

алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, М. П. Патапович // Квантовая электроника: материалы XII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 18-22 ноября 2019 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск, 2019. – С. 228-229.

36. Спектральные исследования процессов образования AlN в лазерном факеле при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / А. П. Зажогин, Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. Р. Фадаиян // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: сб. материалов VIII Междунар. конф., Москва, 19-22 ноября 2019 г. – М: ИМЕТ РАН, 2019. - С. 65-66.

37. Исследование влияния межимпульсного интервала на процессы образования AlO при воздействии на алюминиевую мишень сдвоенными лазерными импульсами / Х. Баззал, Е. С. Воропай, А. П. Зажогин, М. П. Патапович // IX Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 29-31 января 2020 г. / НИЯУ МИФИ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2020. – С. 489-490.

38. Спектральные исследования процессов образования нанопорошков Al₂O₃ и AlN при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, М. П. Патапович, А. П. Зажогин // Материалы и структуры современной электроники: материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 октября 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2020. – С. 273-278.

39. Спектральные исследования процессов образования оксидированных нанопорошков алюминия при воздействии на алюминий короткими сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, Н. Х. Чинь, А. П. Зажогин // Материалы и структуры современной электроники: материалы IX Междунар. науч. конф., Минск, 14–16 октября 2020 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. Б. Оджаев (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2020. – С. 279-284.

40. Процессы образования нанопорошков Al₂O₃ при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, М. П. Патапович, А. П. Зажогин // X Междунар. конф. по фотонике и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 27-29 января 2021 г. / НИЯУ МИФИ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2021. – С. 289–290.

41. Процессы образования оксидированных нанопорошков алюминия при воздействии на алюминий короткими сериями сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха / Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Е. С. Воропай, М. Н. Коваленко, Н. Х. Чинь, А. П. Зажогин // X Междунар. конф. по фотонике

и информационной оптике: сб. науч. тр., Москва, 27-29 января 2021 г. / НИЯУ МИФИ; отв. ред. В. Г. Родин. – Москва, 2021. – С. 291–292.

42. Исследования процессов образования нанопорошков Al, Al₂O₃ и AlN в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав АД1 в атмосфере воздуха / Е. С. Воропай, Х. Баззал, М. Н. Коваленко, М. П. Патапович // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21-24 сентября 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 414-418.

43. Исследования процессов образования нанопорошков Al₂O₃, AlN и Al в плазме при воздействии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминий в атмосфере воздуха / Е. С. Воропай, Х. Баззал, Н. А. Алексеенко, Н. Х. Чинь // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 14-й Междунар. конф., посвящ. 100-летию Белорус. гос. ун-та, Минск, Беларусь, 21-24 сентября 2021 г. / Белорус. гос. ун-т; редкол.: В. В. Углов (гл. ред.) [и др.]. – Минск: БГУ, 2021. – С. 419-423.

РЕЗЮМЕ**Баззал Ходор****Динамика процессов в абляционной лазерной плазме алюминиевых сплавов, формирование молекулярных нанокластеров и нанопорошков**

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектрометрия, сдвоенные лазерные импульсы, нанопорошки, Al_2O_3 , AlN .

Цель работы: показать возможность и определить условия получения ионов, субоксидов и нитридов алюминия в лазерной плазме методом абляции алюминиевых мишеней сериями сдвоенных лазерных импульсов в воздушной атмосфере для использования в технологиях получения нанопорошков Al , Al_2O_3 , AlN и напылении тонких пленок.

Методы исследования: лазерная атомно-эмиссионная многоканальная спектрометрия, лазерное абляционное воздействие.

Полученные результаты и их новизна. Установлено, что воздействие последовательности серий мощных сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга на 8–12 мкс, на поверхность алюминиевой мишени, обеспечивает увеличение в сотни раз количества ионов алюминия, кислорода и азота в лазерной плазме по сравнению с нулевым интервалом и позволяет создать условия для образования и одновременного спектрального определения нитридов и субоксидов алюминия в атмосфере воздуха.

Найдено, что при малом числе мощных сдвоенных импульсов в серии (10-15) преимущественно образуются нанокластеры Al . При увеличении количества последовательных импульсов в серии до 50-60 рост количества AlN и AlO обеспечивается за счет сверхзвукового расширения и турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия, кислорода и азота на выходе из импульсного сопла, формирующегося в результате воздействия серии сдвоенных лазерных импульсов на микроканал при пробивке мишени.

Определены параметры возбуждающих импульсов при расфокусировке и угле падения излучения на мишень, обеспечивающих возможность изменения соотношения количества и размера наночастиц Al , AlO и AlN в нанопорошках.

На примере синтеза нанопорошков показано, что использование высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов обеспечивает более чем стократное увеличение количества получаемого нанопорошка, содержащего Al , Al_2O_3 и AlN , по сравнению с моноимпульсами при одинаковых используемых условиях.

Рекомендации по использованию и область применения: Результаты могут быть использованы при получении нанопорошков и пленок оксидов и нитридов металлов методом лазерной абляции для создания на их основе новых оптоэлектронных и других электронных приборов. Область применения - лазерная спектроскопия, применение лазеров в технологических процессах.

РЭЗІЮМЭ**Баззал Ходар****Дынаміка працэсаў у абляціоннай лазернай плазме алюмініевых сплаваў, фарміраванне малекулярных нанакластераў і нанопарашкоў**

Ключавыя словы: лазерная атамна-эмісійная спектраметрыя, здвоеныя лазерныя імпульсы, нанопарашкі, Al_2O_3 , AlN.

Мэта працы: паказаць магчымасць і вызначыць умовы атрымання іёнаў, субаксідаў і нітрыдаў алюмінія ў лазернай плазме метадам абляцыі алюмініевых мішэняў серыямі здвоеных лазерных імпульсаў у паветранай атмасферы для выкарыстання ў тэхналогіях атрымання нанопарашкоў Al, Al_2O_3 , AlN і напыленні тонкіх плёнак.

Метады даследавання: лазерная атамна-эмісійная шматканальная спектраметрыя, лазернае абляціоннае ўздзеянне.

Атрыманя вынікі і іх навізна. Устаноўлена, што ўздзеянне паслядоўнасці серый моцных здвоеных лазерных імпульсаў, ссунутых адносна адзін аднаго на 8-12 мкс, на паверхню алюмініевай мішэні, забяспечвае павелічэнне ў сотні разоў колькасці іёнаў алюмінія, кіслароду і азоту ў лазернай плазме ў параўнанні з нулявым інтэрвалам і дазваляе стварыць умовы для утварэння і адначасовага спектральнага вызначэння нітрыдаў і субаксідаў алюмінія ў атмасферы паветра.

Знойдзена, што пры малым ліку моцных здвоеных імпульсаў у серыі (10-15) пераважна ўтвараюцца нанокластэры Al. Пры павелічэнні колькасці паслядоўных імпульсаў у серыі да 50-60 рост колькасці AlN і AlO забяспечваецца за кошт звышгукавага пашырэння і турбулентнага мяшання газу, які змяшчае іёны алюмінія, кіслароду і азоту на выхадзе з імпульснага сопла, які фарміруецца ў выніку ўздзеяння серыі здвоеных лазерных імпульсаў на мікраканал пры прабіўцы мішэні.

Вызначаны параметры узбуджальных імпульсаў пры расфакусоўке і вугле падзення выпраменьвання на мішэнь, якія забяспечваюць магчымасць змены суадносін колькасці і памеру наначасціц Al, AlO і AlN ў нанопарашках.

На прыкладзе сінтэзу нанопарашкоў паказана, што выкарыстанне высокаінтэнсіўных здвоеных лазерных імпульсаў забяспечвае больш чым стократнае павелічэнне колькасці атрымоўванага нанопарашка, які змяшчае Al, Al_2O_3 і AlN, у параўнанні з моноімпульсамі пры аднолькавых умовах, якія былі выкарастаны.

Рэкамендацыі па выкарыстанню і вобласць прымянення: Вынікі могуць быць выкарыстаны пры атрыманні нанопарашкоў і плёнак аксідаў і нітрыдаў металаў метадам лазернай абляцыі для стварэння на іх аснове новых оптаэлектронных і іншых электронных прыбораў. Вобласць прымянення - лазерная спектраскапія, прымяненне лазераў ў тэхналагічных працэсах.

SUMMARY

Bazzal Khodor

Dynamics of processes in ablative laser plasma of aluminum alloys, formation of molecular nanoclusters and nanopowders

Keywords: laser atomic emission spectrometry, twin laser pulses, nanopowders, Al_2O_3 , AlN.

Purpose of work: to show the possibility and determine the conditions for obtaining aluminum ions, suboxides and nitrides in laser plasma by ablation of aluminum targets with a series of twin laser pulses in an air atmosphere for use in technologies for obtaining Al, Al_2O_3 , AlN nanopowders and spraying thin films.

Research methods: laser atomic emission multichannel spectrometry, laser ablation.

The results obtained and their novelty. It has been established that the effect of a sequence of series of powerful twin laser pulses shifted relative to each other by 8-12 microseconds on the surface of an aluminum target provides an increase of hundreds of times in the amount of aluminum, oxygen and nitrogen ions in the laser plasma compared to the zero interval and allows creating conditions for the formation and simultaneous spectral determination of aluminum nitrides and suboxides in the air atmosphere.

It is found that with a small number of powerful twin pulses in the series (10-15), Al nanoclusters are predominantly formed. With an increase in the number of consecutive pulses in a series up to 50-60, the increase in the number of AlN and AlO is ensured by supersonic expansion and turbulent mixing of a gas containing aluminum, oxygen and nitrogen ions at the outlet of a pulse nozzle, formed as a result of the impact of a series of twin laser pulses on the microchannel during target penetration.

The parameters of exciting pulses during defocusing and the angle of incidence of radiation on the target are determined, providing the possibility of changing the ratio of the number and size of Al, AlO and AlN nanoparticles in nanopowders.

Using the example of the synthesis of nanopowders, it is shown that the use of high-intensity dual laser pulses provides more than a hundredfold increase in the amount of nanopowder containing Al, Al_2O_3 and AlN, compared with monopulse under the same conditions used.

Recommendations for use and scope of application: The results can be used in the production of nanopowders and films of metal oxides and nitrides by laser ablation to create new optoelectronic and other electronic devices based on them. The field of application is laser spectroscopy, the use of lasers in technological processes.