

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации  
Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Тверской государственный университет»

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ  
ИЗУЧЕНИЯ КЛАСТЕРОВ,  
НАНОСТРУКТУР  
И НАНОМАТЕРИАЛОВ**

**PHYSICAL AND CHEMICAL ASPECTS  
OF THE STUDY OF CLUSTERS,  
NANOSTRUCTURES AND  
NANOMATERIALS**

**FIZIKO-HIMIČESKIE ASPEKTY  
IZUČENIÂ KLASTEROV,  
NANOSTRUKTUR I NANOMATERIALOV**

выпуск 13

ТВЕРЬ 2021

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

Рецензирование статей осуществляется на основании Положения о рецензировании статей и материалов для опубликования в журнале «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов».

**Официальный сайт издания в сети Интернет:**

**<https://www.physchemaspects.ru>**

**Ф50** Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов [Текст]. – Тверь: Издательство Тверского государственного университета, 2021. – Вып. 13. – 956 с.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-47789 от 13.12.2011.

Издание составлено из оригинальных статей, кратких сообщений и обзоров теоретического и экспериментального характера, отражающих результаты исследований в области изучения физико-химических процессов с участием кластеров, наноструктур и наноматериалов физики, включая межфазные явления и нанотермодинамику. Журнал предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей ВУЗов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре общей физики Тверского государственного университета.

*Переводное название: Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*

*Транслитерация названия: Fiziko-himičeskie aspekty izučeniâ klasterov, nanostruktur i nanomaterialov*

УДК 620.22:544+621.3.049.77+539.216.2:537.311.322: 530.145

ББК Ж36:Г5+В379

Print ISSN 2226-4442

Online ISSN 2658-4360

© Коллектив авторов, 2021

© Тверской государственной  
университет, 2021

## 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАНОЧАСТИЦ, НАНОСИСТЕМ И НАНОМАТЕРИАЛОВ

УДК 533.9.082.5; 621.373.826; 621.793.79

Оригинальная статья

### ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОПОРОШКОВ $Al_2O_3$ И $Al$ В ПЛАЗМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ РАСФОКУСИРОВАННЫХ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АЛЮМИНИЙ В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

Х. Баззал<sup>1</sup>, Е.С. Воропай<sup>1</sup>, Н.А. Алексеенко<sup>2</sup>, М.Н. Коваленко<sup>1</sup>, Н.Н. Trinh<sup>3</sup>,  
А.П. Зажогин<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
220030, Республика Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 4  
zajogin\_an@mail.ru

<sup>2</sup>ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа»  
220005, Республика Беларусь, Минск, ул. Платонова, 41  
alekseenkon@rambler.ru

<sup>3</sup>Vinh University  
182 Le Duan Str., Vinh City, Nghe An Province, Vietnam  
ngochoangch10@gmail.com

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.008

**Аннотация:** Изучено влияние величины и типа расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование компонентного и зарядового состава лазерной плазмы при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава АД1 (спектрометр LSS-1). Показано, что при расфокусировке более +1 мм интенсивность линии ионов  $Al III$  увеличивается в несколько раз в сравнении с нулевой расфокусировкой, интенсивность линий ионов  $Al II$ ,  $N II$  также более менее монотонно увеличивается. Одновременно с этим интенсивность полос  $AlO$  практически становится равным нулю. При значении величины расфокусировки 1 мм проведены исследование процессов образования смешанных нанопорошков  $Al_2O_3$  и  $Al$  при воздействии последовательных серий сдвоенных лазерных импульсов энергией 53 мДж и меж-импульсным интервалом 10 мкс на алюминиевую мишень, помещенную в закрытую стеклянную прямоугольную кювету. Размер первичных частиц  $Al_2O_3$  оцененный с помощью электронной микроскопии высокого разрешения, преимущественно составил 30–40 нм, а  $Al$  – 45–60 нм. Частицы собраны в агломераты.

**Ключевые слова:** оксидированные нанопорошки  $Al$ ,  $Al_2O_3$ , субоксиды  $AlO$ , импульсное лазерное распыление, лазерная плазма, лазерная искровая спектрометрия, многозарядные ионы, сдвоенные лазерные импульсы.

### 1. Введение

Теплопроводящие керамические подложки лучшее на сегодняшний день решение для электроизоляции и отвода тепла от электронных компонентов. Данные подложки на основе оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) многократно превосходят эластичные листовые материалы типа КПТД и слюду по теплопроводности ( $25 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ) и электрической прочности

© Х. Баззал, Е.С. Воропай, Н.А. Алексеенко, М.Н. Коваленко, Н.Н. Trinh, А.П. Зажогин, 2021

( $25 \text{ кВ} \cdot \text{мм}^{-1}$ ), обеспечивая отличные условия эксплуатации приборов независимо от их мощности. Благодаря своим особым свойствам, таким, как значительно более низкая по сравнению с обычными дисперсными материалами температура спекания и плавления, повышенная химическая активность в процессах окисления, нанопорошки (НП) металлов нашли применение в производстве нанокерамических материалов, в качестве реагентов, компонентов и добавок при спекании [1, 2]. При изучении НП алюминия, как активатора спекания промышленного порошка АСД-4, установлено [1, 2], что с увеличением массовой доли НП алюминия снижается температура спекания (до  $450 \dots 500^\circ\text{C}$ ), степень усадки повышается до 60%. Причиной такого эффекта является диффузионный механизм спекания, при котором НП алюминия в отсутствие химического взаимодействия при нагревании проявляет повышенную диффузионную подвижность, а также дисперсное упрочнение спеченных образцов за счет увеличения массовой доли оксидов алюминия, внесенных с НП алюминия.

Введение в нанопорошки оксида алюминия небольшой добавки нанопорошков металлического алюминия обеспечило дополнительное увеличение относительной плотности (свыше 0,7) и улучшение однородности компактов. Благодаря высокой пластичности металлической компоненты этот подход исключает необходимость введения органической связки. При последующем спекании на воздухе происходит превращение металлической компоненты в оксид и дополнительное уплотнение материала. В результате формируется оксидная керамика с наноразмерной структурой, состоящая из кристаллитов, имеющих размер от 20 до 500 нм, в зависимости от типа и количества дополнительных оксидных фаз (оксиды магния, иттрия, циркония, титана) в керамике. Получаемые наноструктурные керамические материалы на основе оксида алюминия обладают комплексом более высоких тепловых и электрических характеристик, чем получаемые из микронных порошков [1-5].

При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа, контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управлением составом плазмы, направляемой на подложку [6, 7].

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом абляции сериями расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанопорошков  $Al$  и  $Al_2O_3$  для использования в технологиях получения нанокерамик для микроэлектроники. Образование кластеров оксида  $Al_2O_3$  происходит за счет

реакции слипания различных его субоксидов ( $AlO$ ,  $Al_2O$ ).

## 2. Методы исследования

Динамика процессов образования ионов  $Al$  и радикалов  $AlO$  (прекурсоров для образования  $Al_2O_3$ ) исследовалась методом атомно-эмиссионной многоканальной спектromетрии на приборе LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ») при воздействии серий последовательных сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав типа АД1 от энергии (20–60 мДж) при временном интервале между сдвоенными импульсами равном 10 мкс в атмосфере воздуха [6, 7]. Размер точки фокусировки  $\approx 50$  мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 104 мм. Расфокусировка проводилась смещением мишени по отношению к фокусу. Методически это достигается механическим перемещением образца вдоль оптической оси спектрометра LSS-1 относительно фокуса лазерного луча на расстояние  $\Delta f$  – параметр расфокусировки. В зависимости от положения образца относительно фокуса лазерного луча выделяют три типа расфокусировки: нулевая ( $\Delta f = 0$ ), положительная ( $\Delta f > 0$ ) и отрицательная ( $\Delta f < 0$ ). Увеличение параметра расфокусировки  $\Delta f$  приводит к росту площади лазерного пятна на поверхности образца, что снижает плотность потока излучения и потому увеличивает площадь абляции.

Зависимость плотности потока излучения  $q$  от параметра  $\Delta f$  при энергии СЛИ 50 мДж приведена в Таблице 1.

Таблица 1. Плотность потока излучения  $q$  ( $10^8$  Вт·см<sup>-2</sup>) от параметра  $\Delta f$ .

$\Delta f$ , мм	0	1	2	3	4	5
$q$	1277	115	29	13	7	4,6

Пороговая плотность начала испарения алюминия, исходя из термодинамических параметров примерно равна  $3,5 \cdot 10^8$  Вт·см<sup>-2</sup> [8].

Динамика образования одного из продуктов взаимодействия атомов алюминия с кислородом радикала  $AlO$  и нанокмплесков  $AlN$  изучена нами по эмиссионным спектрам этих молекул. Наиболее интенсивными электронно-колебательными полосами в эмиссионных спектрах  $AlO$  являются полосы с длинами волн 484,21 и 464,82 нм, а  $AlN$  (507,8 нм), а линий ионов:  $Al II$  (466,3 нм),  $Al III$  (452,92 нм),  $N II$  (399,5 нм).

## 3. Результаты и обсуждение

Нами изучена динамика образования ионов  $Al$ ,  $N$ , молекул  $AlN$  и  $AlO$  в процессе образования кратера на мишени в зависимости от энергии импульса (15–70 мДж) и изменения плотности мощности воздействующего

излучения при расфокусировке.

Образец – пластинки сплава АД1 толщиной 1 мм. Интервал между импульсами 10 мкс, количество сдвоенных импульсов 40. В качестве примера на рис. 1 приведены зависимости интенсивности линий ионов  $Al$ ,  $N$ , полос  $AlO$  и  $AlN$  в зависимости от параметров расфокусировки, при энергии импульсов 53 мДж.

При анализе данных в первую очередь заметна хорошая корреляция между возрастанием интенсивности полос  $AlO$  и существенным уменьшением интенсивности линии  $Al III$  (452,92 нм) и несколько меньшим изменением интенсивности линии  $N II$  при малой расфокусировке. Этот факт свидетельствует о непосредственном участии  $Al III$  в термохимическом процессе образования оксидов и нитридов алюминия. Общим является рост интенсивности полос  $AlO$  с увеличением энергии и плотности мощности. При расфокусировке более +1 мм интенсивность линии ионов  $Al III$  увеличивается в несколько раз в сравнении с нулевой расфокусировкой, интенсивность линий ионов  $Al II$ ,  $N II$  также более менее монотонно увеличивается. Одновременно с этим интенсивность полос  $AlO$  практически становится равным нулю, что еще раз в какой-то мере подтверждает механизм образования оксидов и нитридов алюминия из ионов алюминия  $Al III$  и воздуха.

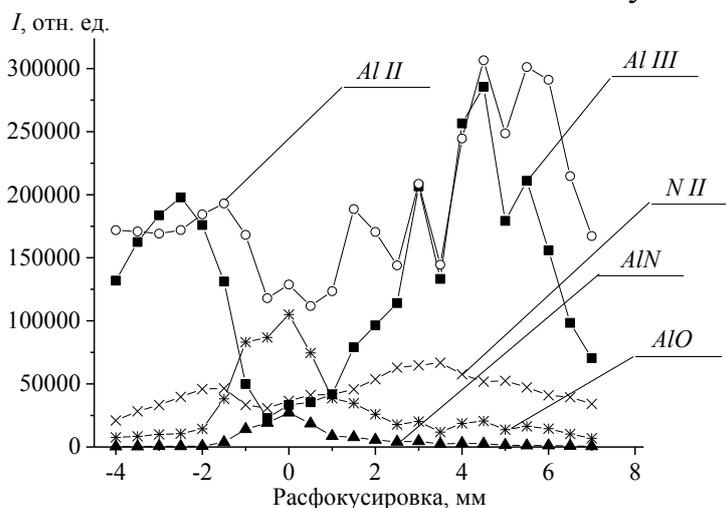


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий ионов  $Al$ ,  $N$ , и полос радикала  $AlO$  и молекул  $AlN$  в спектрах от параметров расфокусировки.

При расфокусировке в отрицательную сторону интенсивность линий  $Al III$  увеличивается несколько меньше, чем при положительной расфокусировке. Интенсивность линий ионов  $N II$  при отрицательной расфокусировке порядка 4 мм практически падает до нуля. Указанные факты могут быть связаны с пространственным разнесением областей формирования ионов  $Al III$ ,  $O II$  и  $N II$ . Все указанное, по-видимому, связано с различием как форм микроканала образующихся при различной

фокусировке, так и изменения условий взаимодействия второго импульса с продуктами конденсации остающимися в канале после воздействия первого импульса.

Известно, что наиболее важную роль в образовании нанокластеров в лазерной плазме играют процессы ионизации и рекомбинации ионов, что определяется плотностью потока лазерного излучения, потенциалом ионизации атомов, составляющих лазерную мишень, диаметром пятна фокусировки. Как отмечено выше, в образовании оксидов и нитридов алюминия существенную роль играет присутствие ионов алюминия.

Наблюдаемая нелинейная зависимость интенсивности полосы  $AIO$  от плотности мощности (величины расфокусировки) может быть объяснена следующим образом. При импульсно-периодическом высокоинтенсивном лазерном воздействии в одну точку мишени, в результате процесса лазерной абляции, происходит вынос массы вещества мишени и образуется канал. При этом в процессе формирования канала при большой плотности мощности (точная фокусировка), физическая картина сопутствующих процессов резко усложняется по сравнению с ситуацией, когда лазерное излучение падает на гладкую поверхность мишени. Концентрация лазерного излучения в канале и возможное увеличение локального поля на неровностях дна ведут к возрастанию поглощения энергии импульса, и, соответственно, к повышению температуры плазмы внутри канала и росту эффективности образования ионов. С другой стороны, после воздействия первого импульса внутри канала может нарабатываться взвесь – «облако», содержащее нано- и микрочастицы мишени (кластеры). Взаимодействие лазерного излучения второго импульса с таким облаком в режиме плазмообразования будет приводить к развитию процесса самовоздействия частичной экранировке и проблемам доставки энергии излучения на дно канала и, как следствие, изменению формы канала. Ввиду удаленности от дна, энергия, запасенная и рассеянная плазмой пробоя, особенно при малой плотности мощности (большой расфокусировке) не дает существенного вклада в увеличение глубины канала и практически целиком передается боковым стенкам, вызывая стабилизацию линейной скорости абляции в широком диапазоне воздействующей плотности энергии. В результате диаметр канала существенно увеличивается под действием расширяющегося и излучающего плазменного облака, а также из-за воздействия на боковые стенки рассеянного плазмой излучения.

Снимки лунок полученных при воздействии серий из 50 импульсов, интервал между импульсами 10 мкс и энергией 53 мДж на поверхность мишени из АД1 приведены на рис. 2. Величина расфокусировки в мм приведена над каждым отдельным снимком.

Как видно из сравнения снимков для величин расфокусировки  $\pm 3$  мм

и  $\pm 2$  мм наблюдается существенная разница вида поверхности в кратерах. При  $\pm 3$  мм в кратере формируется мелкая структура в мелком кратере, чего не наблюдается для значения  $\pm 2$  мм. При большей расфокусировке в кратерах наблюдаются схожие структуры, глубина кратеров небольшая. Если сравнить минимальную плотность мощности в лазерном импульсе, необходимую для испарения пленки, с расчетными для  $\Delta f = 5$  мм то они практически равны. Это хорошо объясняет существенное увеличение области образования молекулярных кластеров при воздействии расфокусированного лазерного пучка на поверхность. Исходя из полученных данных, для оценки возможности практического получения смешанных нанопорошков  $Al_2O_3$  и  $Al$  были использованы энергия импульсов 53 мДж, интервал между импульсами 10 мкс, расфокусировка 1 мм. Облучение проводили сериями из 50 сдвоенных импульсов на одну точку в течении 10 минут мишени, помещенную стеклянную кювету размером размером  $40 \times 20 \times 30$  мм, накрытой крышкой.

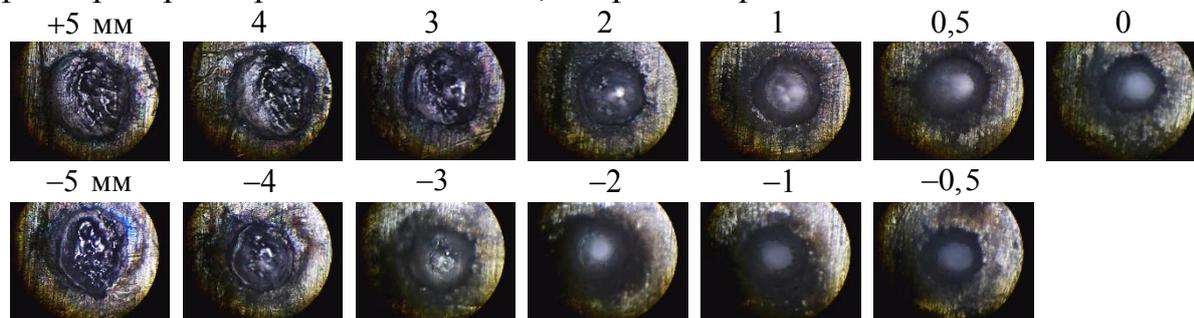


Рис. 2. Снимки лунок, полученных при воздействии серий из 50 импульсов и энергией 53 мДж.

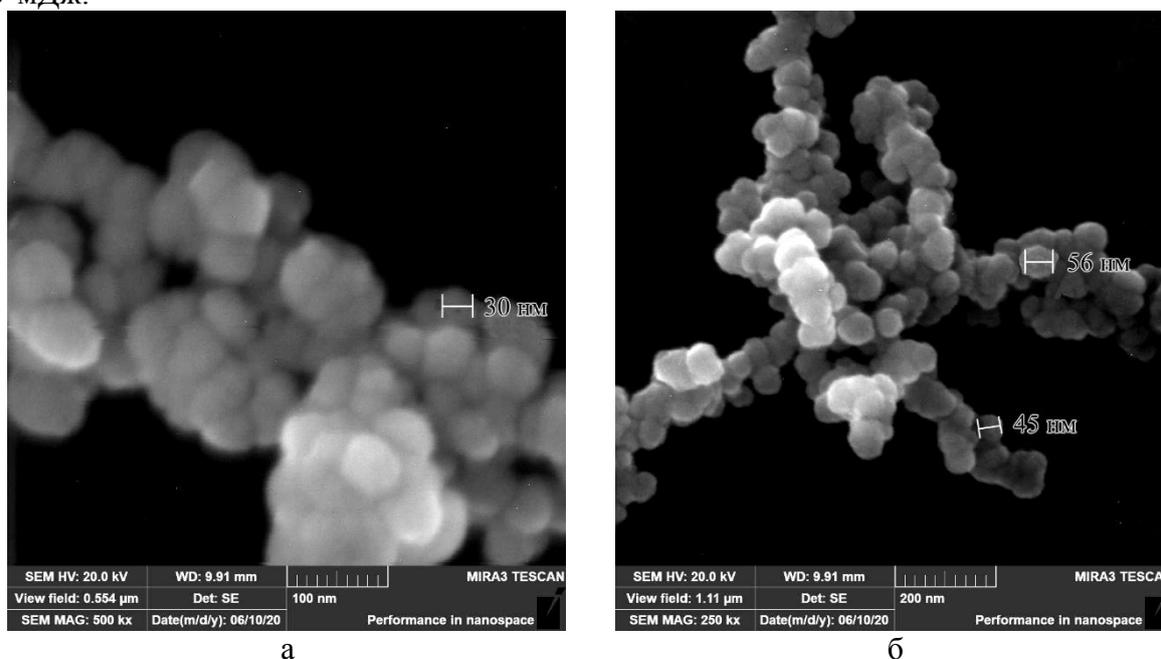


Рис. 3. Изображения наночастиц и агломератов: а –  $Al_2O_3$ ; б –  $Al$ .

Анализ получаемых продуктов, осевших на поверхность пластинок из кремния, установленных вне зоны распространения лазерного факела (на дне и одной из сторон стеклянной кюветы), использовался сканирующий электронный микроскоп высокого разрешения MIRA3 с рентгеноспектральным микроанализатором EDX X-Max. Изображения наночастиц и агломератов наночастиц, синтезированных при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава АД1, приведены на рис. 3 а и 3 б.

Размер первичных частиц  $Al_2O_3$  преимущественно составляет 30–40 нм,  $Al$  – 45–60 нм. Частицы собраны в агломераты. Частицы имеют кристаллическую структуру и сферическую форму. Правильная сферическая форма наночастиц свидетельствует о том, что процесс образования наночастиц проходил при высоких температурах, а агломеризация их обусловлена в первую очередь термодинамической нестабильностью наночастиц металла. Известно [9-11], что условие термодинамической устойчивости наночастиц при флуктуациях их объема связано с размерной зависимостью поверхностного натяжения.

Следует также отметить, что в процессе эволюции газодисперсной системы на выходе из микросопла начальное взаимодействие кластер-частица с прямолинейной траекторией (кинетический режим) на поздней стадии переходит в кластер-кластерное с броуновской траекторией движения, а на промежуточных этапах роста взаимодействие частиц носит смешанный характер, причем из-за флуктуации плотности соотношения этих механизмов в разных точках пространства могут быть неодинаковыми. Картина процесса в еще большей степени усложняется в результате процессов на поверхности ассоциируемых частиц, особенно если они несут заряд. В частности, перераспределение заряда между частицами автоматически влияет на характер коагуляции и размеры фрактальных структур [12, 13].

#### **4. Заключение**

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой вблизи поверхности многокомпонентной мишени, при воздействии на нее серий сдвоенных импульсов на поверхность показали возможность контроля и управления ионным и компонентным составом плазмы. Из приведенных результатов видно, что, подбирая величину расфокусировки, можно варьировать количеством алюминия в смешанном составе нанопорошков  $Al_2O_3$  и  $Al$  для разработки методов изготовления нанокерамик для различных применений. Нанопорошки  $Al$ , покрытые слоем оксида алюминия, преимущественно имеют размер 45–60 нм, нанопорошки  $Al_2O_3$

соответственно имеют размер примерно 30 нм.

### Библиографический список:

1. **Матренин, С.В.** Активирование спекания оксидной керамики добавками нанодispersных порошков / С.В. Матренин, А.П. Ильин, Л.О. Толбанова, Е.В. Золотарева // Известия Томского политехнического университета. – 2010 – Т. 317. – № 3. – С. 24-28.
2. **Ильин, А.П.** Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов: учебное пособие / А.П. Ильин, А.В. Мостовщиков, А.В. Коршунов, Л.О. Рот. – 2-е изд., испр. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – 212 с.
3. **Гусев, А.И.** Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – 2-е изд., испр. – М.: Физматлит, 2007. – 414 с.
4. **Баззал, Х.** 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. – 2019. – Вып. 11. – С. 48-56. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.048.
5. **Баззал, Х.** 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 / Баззал Х., Е.С. Воропай, А.П. Зажогин, М.П. Патапович // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 57-64. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.057.
6. **Корепанов, М.А.** Математическое моделирование турбулентных течений с гомогенной конденсацией в сверхзвуковых соплах / М.А. Корепанов, С.А. Груздь // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18. – № 3. – С. 370-380.
7. **Корепанов, М.А.** Математическое моделирование гомогенной конденсации оксида алюминия в среде аргона / М.А. Корепанов, С.А. Груздь, А.А. Чукавина // Химическая физика и мезоскопия. – 2019. – Т. 21, № 2. – С. 218-226. DOI: 10.15350/17270529.2019.2.23.
8. **Григорьянц, А.Г.** Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
9. **Sdobnyakov, N.Yu.** On the mechanical stability conditions for nanoparticles in vacuum and under an external pressure / N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – V. 1352. – № 1. – Art. № 012045. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1352/1/012045.
10. **Samsonov, V.M.** A Thermodynamic approach to mechanical stability of nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov // Central European Journal of Physics. – 2003. – V. 1. – I. 2. – P. 344-354. DOI: 10.2478/BF02476301.
11. **Samsonov, V.M.** On thermodynamic stability conditions for nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.N. Bazulev // Surface Science. – 2003. – V. 532-535. – P. 526-530. DOI: 10.1016/S0039-6028(03)00090-6.
12. **Сдобняков, Н.Ю.** Морфологические характеристики и фрактальный анализ металлических пленок на диэлектрических поверхностях: монография / Н.Ю. Сдобняков, А.С. Антонов, Д.В. Иванов. – Тверь: Тверской государственный университет, 2019. – 198 с.
13. **Михайлов, Е.Ф.** Образование фрактальных структур в газовой фазе / Е.Ф. Михайлов, С.С. Власенко. // Успехи физических наук. – 1995. – Т. 165. – Вып. 3. – С. 263-283. DOI: 10.3367/UFNr.0165.199503b.0263.

### References:

1. Matrenin S.V., Ilyin A. P., Tolbanova L.O., Zolotareva E.V. Aktivirovanie spekaniya oksidnoj keramiki dobavkami nanodispersnykh poroshkov [Activation of sintering of oxide ceramics by adding nanodispersed powders], *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [*Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*], 2010, vol. 317, no. 3, pp. 24-28. (In Russian).
2. Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Korshunov A.V., Root L.O. *Osobennosti fiziko-khimicheskikh svoystv nanoporoshkov i nanomaterialov: uchebnoe posobie* [Features of physico-chemical properties of nanopowders and nanomaterials: textbook], 2nd ed. Tomsk: TPU Publishing House, 2017, 212 p. (In Russian).
3. Gusev A.I. *Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii* [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnology]. – М.: Fizmatlit Publ., 2007. – 414 p. (In Russian).
4. Bazzal K., Voropay E.S., Zajogin A.P., Patapovich M.P. Spektral'nye issledovaniya vliyaniya rasfokusirovki

- na protsessy obrazovaniya  $AlO$  i  $AlN$  v plazme pri vozdeystvii lazernykh impul'sov na alyuminievyy splav D16T v atmosfere vozdukh [Spectral studies of the defocusing effect on the  $AlO$  and  $AlN$  formation processes when D16T aluminum alloy is subjected to double laser pulses in air], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 48-56. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.048. (In Russian).
5. Bazzal K., Voropay E.S., Zajogin A.P., Patapovich M.P. Issledovanie vliyaniya formy kanala na protsessy obrazovaniya nanoklasterov  $AlO$  i  $AlN$  v plazme pri vozdeystvii serij sdvoennykh lazernykh impul'sov na alyuminievuyu mishen' v vozdushnoj atmosfere [Investigation of the channel-form effect on the formation processes of  $AlO$  and  $AlN$  nanoclusters in plasma when aluminum target is subjected to series of double laser pulses in air], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 57-64. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.057. (In Russian).
6. Korepanov M.A., Gruz'd' S.A. Matematicheskoe modelirovanie turbulentnykh techenij s gomogennoj kondensatsiej v sverkhzvukovykh soplakh [Mathematical modeling of turbulent flow with homogeneous condensation in the supersonic nozzle]. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2016, vol. 18, no. 3, pp. 370-380. (In Russian).
7. Korepanov M.A., Gruz'd' S.A., Chukavina A.A. Matematicheskoe modelirovanie gomogennoj kondensatsii oksida alyuminiya v srede argona [Mathematical modeling of homogenous condensation of alumina in argon environment], *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya [Chemical Physics and Mesoscopy]*, 2019, vol. 21, no. 2, pp. 218-226. DOI: 10.15350/17270529.2019.2.23 (In Russian).
8. Grigor'yants A.G. *Osnovy lazernoj obrabotki materialov* [Fundamentals of laser processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 304 p. (In Russian).
9. Sdobnyakov N.Yu., Samsonov V.M., Bazulev A.N. On the mechanical stability conditions for nanoparticles in vacuum and under an external pressure, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1352, no. 1, art. no. 012045, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1352/1/012045.
10. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu. A thermodynamic approach to mechanical stability of nanosized particles, *Central European Journal of Physics*, 2003, vol. 1, issue 2, pp. 344-354. DOI: 10.2478/BF02476301.
11. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu., Bazulev A.N. On thermodynamic stability conditions for nanosized particles, *Surface Science*, 2003, vol. 532-535, pp. 526-530. DOI: 10.1016/S0039-6028(03)00090-6.
12. Sdobnyakov N.Yu., Antonov A.S., Ivanov D.V. *Morfologicheskie kharakteristiki i fraktal'nyj analiz metallicheskikh plenok na dielektricheskikh poverkhnostyakh: monografiya* [Morphological characteristics and fractal analysis of metal films on dielectric substrates: monography]. Tver: Tver State University Publ., 2019, 168 p. (In Russian).
13. Mikhailov E.F., Vlasenko S.S. The generation of fractal structures in gaseous phase, *Physics-USpekhi*, 1995, vol. 38, issue3, pp. 253-271 DOI: 10.1070/PU1995v038n03ABEH000074.

*Original paper*

**RESEARCH OF  $Al_2O_3$  AND  $Al$  NANOPOWDER FORMATION PROCESSES IN PLASMA  
UNDER THE INFLUENCE OF DEFOCUSED DUAL LASER PULSES ON ALUMINUM IN  
THE AIR ATMOSPHERE**

Kh. Bazzal<sup>1</sup>, E.S. Voropay<sup>1</sup>, N.A. Alekseenko<sup>2</sup>, M.N. Kovalenko<sup>1</sup>, N.H. Trinh<sup>3</sup>, A.P. Zazhugin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Minsk, Belarus

<sup>2</sup>Powder Metallurgy Institute named after academician O. V. Roman, Minsk, Belarus

<sup>3</sup>Vinh University, Vinh, Vietnam

DOI: 10.26456/pcascnn/2021.13.008

**Abstract:** The influence of the magnitude and type of defocusing of twin laser pulses on the purposeful formation of the component and charge composition of laser plasma under the influence of twin laser pulses on a target made of aluminum alloy AD1 (LSS-1 spectrometer) has been studied. It is shown that when defocusing is more than 1 mm, the intensity of the ion line Al III increases several times in comparison with zero defocusing, the intensity of the ion lines Al II, N II also increases more or less monotonously. At the same time, the intensity of the bands  $AlO$  practically becomes zero. At the 1 mm defocusing value, the processes of formation of mixed nanopowders were studied and, under the influence of successive series of double laser pulses with the energy of 53 mJ and the inter-pulse interval of the iss on an aluminum target placed in a closed rectangular glass cuvette, the size of primary  $Al_2O_3$  particles estimated using high-resolution electron microscopy was mainly 30–40 nm, and  $Al$ –

45 – 60 nm. The particles are collected into agglomerates.

*Keywords: oxidized nanopowders Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, AlO suboxides, pulsed laser sputtering, laser plasma, laser spark spectrometry.*

*Баззал Ходор – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета Белорусского государственного университета*

*Воропай Евгений Семенович – д.ф.-м.н., профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии, физический факультет Белорусского государственного университета*

*Алексеенко Наталья Анатольевна – заведующая научно-исследовательской лабораторией электронно-зондового анализа ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа»*

*Коваленко Максим Николаевич – заведующий научно-исследовательской лабораторией «Спектроскопические системы» физического факультета Белорусского государственного университета*

*Ngoc H. Trinh – Ph. D., заведующий кафедрой прикладной физики, Vinh University, Vinh, Vietnam*

*Зажогин Анатолий Павлович – д.ф.-м.н., профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии, физический факультет Белорусского государственного университета*

*Khoder Bazzal – postgraduate student, Department of Laser Physics and Spectroscopy, Faculty of Physics, Belarusian State University*

*Evgeniy S. Voropay – Dr. Sc., Full Professor, Department of Laser Physics and Spectroscopy, Faculty of Physics, Belarusian State University*

*Natalia A. Alekseenko – Head of the Research Laboratory of Electronic Probe Analysis, Powder Metallurgy Institute named after academician O.V. Roman*

*Maxim N. Kovalenko – Head of the Research Laboratory «Spectroscopic systems», Faculty of Physics, Belarusian State University*

*Ngoc H. Trinh – Ph. D., Head of the Applied Physics Department, Vinh University*

*Anatoli P. Zajogin – Dr. Sc., Full Professor, Department of Laser Physics and Spectroscopy, Faculty of Physics, Belarusian State University*

Поступила в редакцию/received: 21.09.2021; после рецензирования/ revised: 12.10.2021; принята/accepted 19.10.2021.