

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

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

*МЕЖВУЗОВСКИЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ*

**выпуск 5**

**ТВЕРЬ 2013**

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

ББК Ж36:Г5+В379

Ф50

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики  
Тверского государственного технического университета

*А.Н. Болотов*

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики пьезо-  
и сегнетоэлектриков Тверского государственного университета

*Н.Н. Большакова*

**Редакционная коллегия:**

Самсонов Владимир Михайлович – заведующий кафедрой теоретической физики  
ТвГУ, профессор, д.ф.-м.н. (ответственный редактор);

Созаев Виктор Адыгеевич – заведующий кафедрой физики факультета электронной  
техники Северо-Кавказского горно-металлургического института, профессор, д.ф.-м.н.;

Гафнер Юрий Яковлевич – заведующий кафедрой общей и экспериментальной физики  
Хакасского государственного университета, профессор, д.ф.-м.н.;

Сдобняков Николай Юрьевич – доцент, к.ф.-м.н. (зам. ответственного редактора,  
ответственный секретарь);

Базулев Анатолий Николаевич – доцент, к.ф.-м.н.;

Комаров Павел Вячеславович – доцент, к.ф.-м.н.;

Скопич Виктор Леонидович – доцент, к.ф.-м.н.;

Соколов Денис Николаевич – технический редактор.

**Ф50** Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и  
наноматериалов [Текст]: межвуз. сб. науч. тр. / под общей редакцией  
В.М. Самсонова, Н.Ю. Сдобнякова. – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. –  
440 с.

ISBN 978-5-7609-0877-3

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных  
технологий и массовых коммуникаций, свидетельство о регистрации СМИ  
ПИ № ФС 7747789 от 13.12.2011

Сборник составлен из оригинальных статей 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. Сборник  
предназначен для научных и инженерно-технических работников, преподавателей  
вузов, студентов и аспирантов. Издание подготовлено на кафедре теоретической  
физики Тверского государственного университета.

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

ББК Ж36:Г5+В379

ISBN 978-5-7609-0877-3

ISSN 2226-4442

© Коллектив авторов, 2013

© Тверской государственный  
университет, 2013

УДК 533.9.082.5; 621.373.826; 621.793.79

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ РАДИКАЛОВ  
AlN и AlO В ПЛАЗМЕ ОТ РАСФОКУСИРОВКИ СДВОЕННЫХ  
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ  
ИХ НА ОКСИДИРОВАННЫЙ АЛЮМИНИЙ**

С.В. Проценко, Х. А. Р. Альдигауи, А.Р. Фадаиян, Е.С. Воропай, А.П. Зажогин  
Белорусский государственный университет,  
Республика Беларусь, 220030, Минск, пр. Независимости, 4  
zajogin\_an@mail.ru

**Аннотация:** Изучено влияние расфокусировки излучения лазерных импульсов на целенаправленное формирование компонентного и зарядового состава приповерхностной лазерной плазмы методом лазерной искровой спектрометрии (спектрометр LSS-1). Показана возможность увеличения доли радикалов AlO и AlN в плазме при последовательном воздействии серии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень.

**Ключевые слова:** спектральный анализ, радикалы AlO и AlN, сдвоенные лазерные импульсы, лазерная абляция, процессы в плазме.

Лазерная абляция твердых тел наносекундными импульсами умеренной интенсивности используется во многих научных и практических приложениях. Импульсное лазерное напыление широко используется для формирования тонкопленочных структур и покрытий из самых различных материалов [1]. Физические процессы, связанные с образованием приповерхностной лазерной плазмы, разлетом ее и осаждением на подложке настолько многофакторны, что не удастся получить достаточно простых закономерностей, описывающих эти процессы [1]. Так в частности методу импульсного лазерного напыления присущи и некоторые недостатки, одним из которых является образование микрокапель (0,1–1 мкм) при абляции мишеней [1]. Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного воздействия.

В большинстве исследований двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектрометрии (ЛАЭС) используется коллинеарная, или коаксиальная, конфигурация совмещения, когда первый и второй лазерные импульсы фокусируются в одном и том же положении на поверхности образца. Такая конфигурация наиболее распространена, поскольку она наиболее пригодна для ориентации лазерных импульсов при проведении анализа на месте и в оперативном режиме [2]. Первый импульс обеспечивает лазерную искровую плазму (ЛИП), которая фактически эквивалентна искре при моноимпульсной ЛАЭС, со сравнимым

абляционным факелом, составом, температурой, сравнимой плотностью электронов и скоростью затухания. Второй импульс, который обычно следует после некоторого времени задержки  $t_d$  (вплоть до 100 мкс), вызывает абляцию дополнительного материала и порождает двухимпульсную ЛИП с совершенно иными физическими свойствами. При этом воздействие последующего импульса, следующего через небольшой интервал времени, приводит к низкопороговому оптическому пробое воздуха, насыщенного микрочастицами металла, и появлению одновременно двух разнесенных в пространстве плазменных образований. Одним из них является обычный факел лазерной плазмы на аблируемой поверхности и затем на дне формируемого отверстия, а другим – плазменно-пылевое облако, также возникающее на оси лазерного пучка, но отстоящее от поверхности на определенное расстояние.

Цель работы состояла в том, чтобы показать возможность и определить условия для получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанокластеров соединений алюминия, типа  $AlN$  и  $AlO$ , для использования в технологиях напыления тонких пленок. Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. Источником возбуждения плазмы в спектрометре является двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM).

Динамика изменения образования радикалов  $AlN$  и  $AlO$  в плазме от расфокусировки исследована методом многоканальной атомно-эмиссионной спектроскопии при воздействии 25 сдвоенных лазерных импульсов на образцы алюминиевого сплава толщиной 1 мм от энергии их 52 и 60 мДж и изменения плотности мощности путем расфокусировки воздействующего излучения. Фокусное расстояние объектива 104 мм. Интервал между импульсами 10 мкс. Динамика образования одного из продуктов взаимодействия атомов алюминия с азотом воздуха радикала  $AlN$  изучена нами по эмиссионным спектрам этой молекулы. Наиболее интенсивными электронно-колебательными полосами в эмиссионных спектрах являются полосы с длинами волн 508,05 нм, 510,345 нм, 512,481 нм.

На рис. 1 а, б, в приведены примеры зависимости интенсивности полосы  $AlN$  (508,05 нм) в спектрах от расфокусировки. Обозначения образцов: 1 – чистый алюминий, 2 – алюминий, оксидированный в серной кислоте, 3 – алюминий, оксидированный в щавелевой кислоте.

Динамика образования радикала  $AlO$  изучена нами по эмиссионным спектрам этой молекулы. Наиболее интенсивными электронно-колебательными полосами в эмиссионных спектрах являются полосы с

длинами волн 484,21 и 464,82 нм.

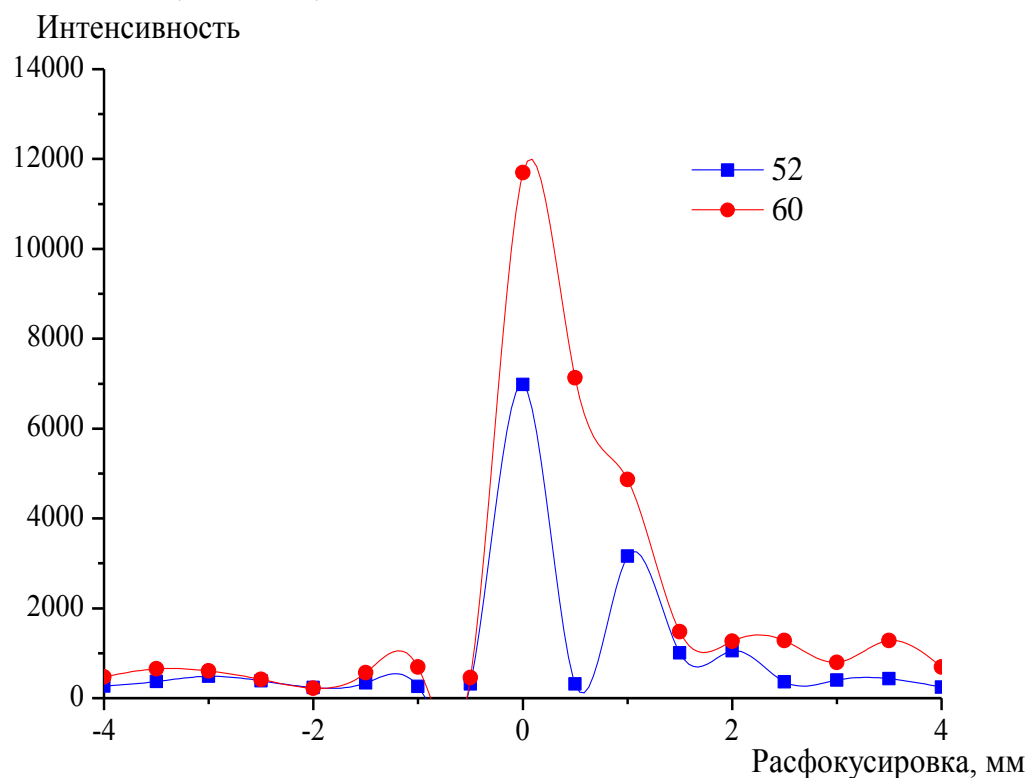


Рис. 1 а. Зависимость интенсивности полосы  $AlN$  (508,05 нм) в спектрах от расфокусировки. Образец – чистый алюминий.

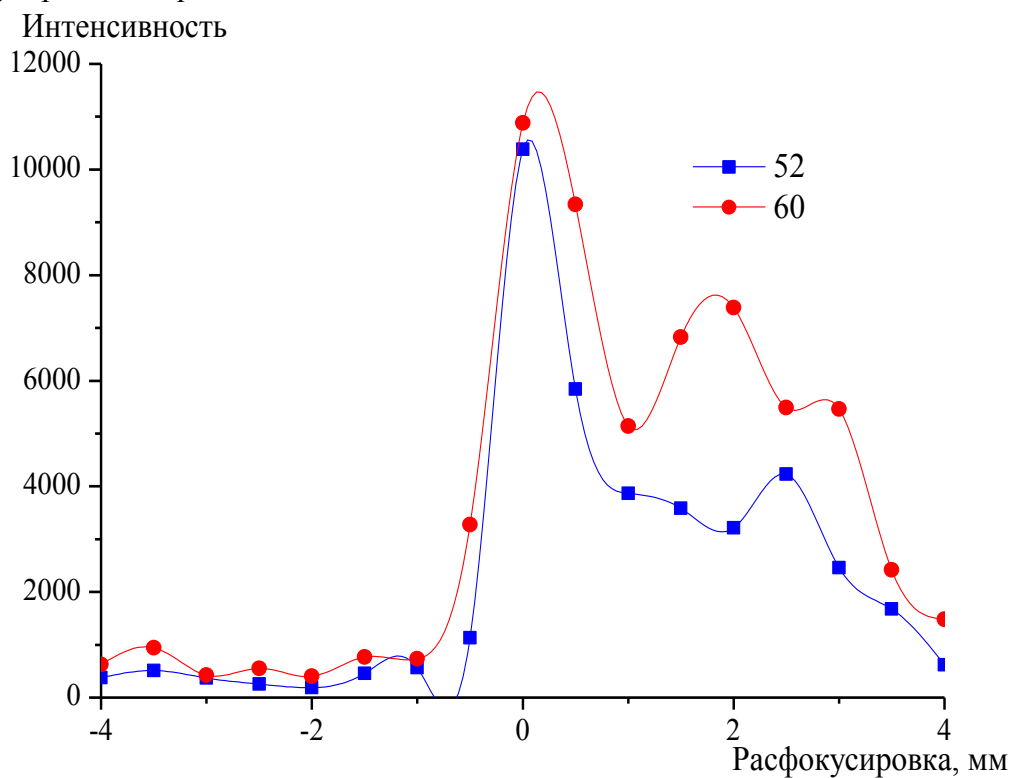


Рис. 1 б. Зависимость интенсивности полосы  $AlN$  (508,05 нм) в спектрах от расфокусировки. Образец – алюминий, оксидированный в серной кислоте.

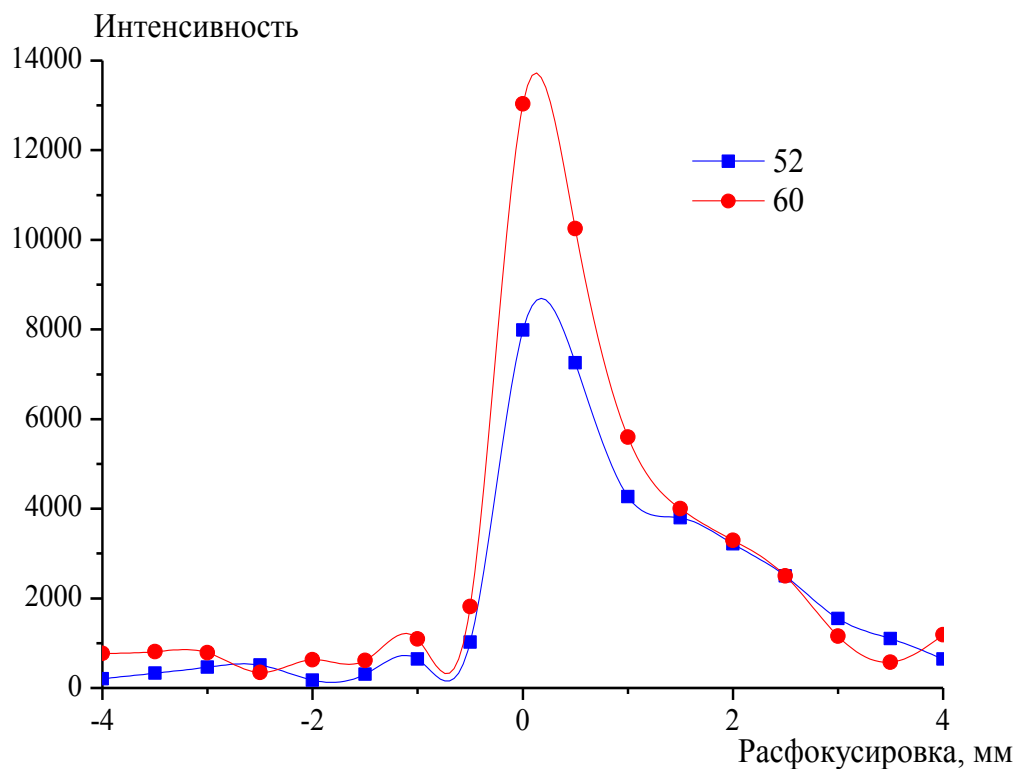


Рис. 1 в. Зависимость интенсивности полосы  $AlN$  (508,05 нм) в спектрах от расфокусировки. Образец – алюминий, оксидированный в щавелевой кислоте.

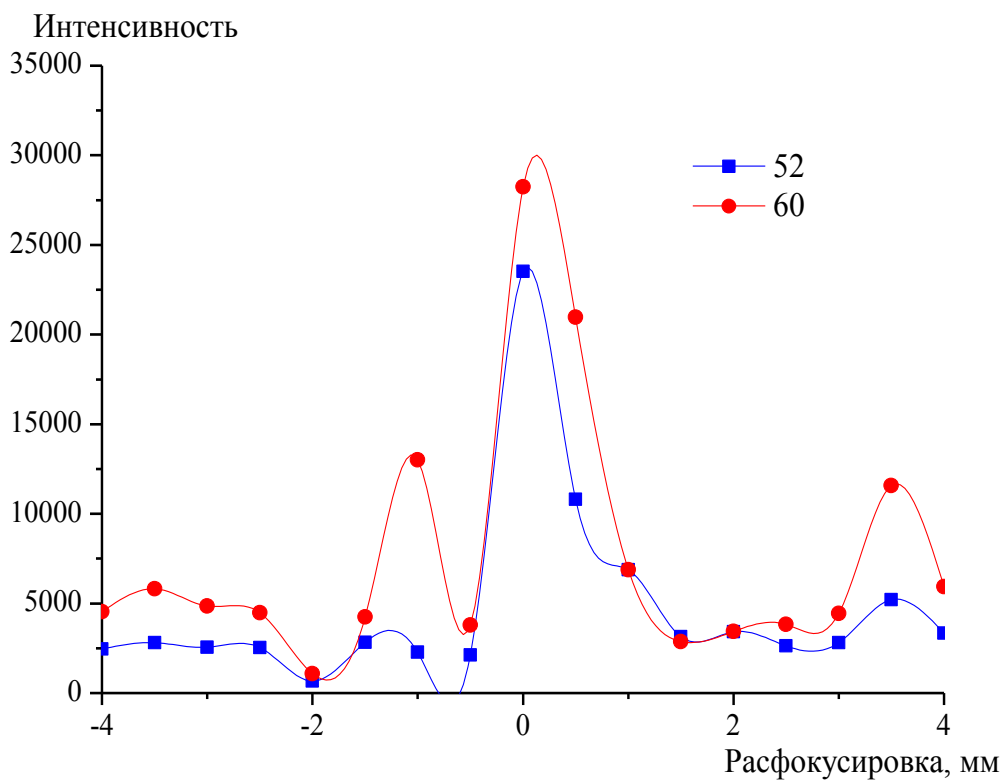


Рис. 2 а. Зависимость интенсивность полос  $AlO$  (484,22 нм) в спектрах от расфокусировки. Образец: чистый алюминий.

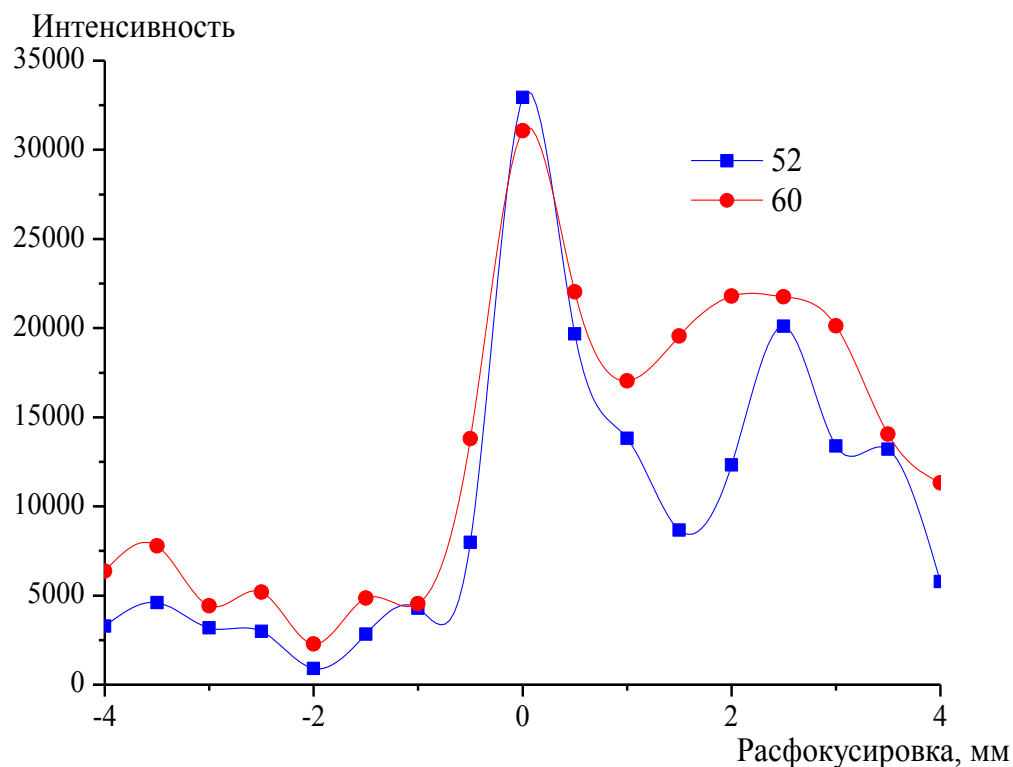


Рис. 2 б. Зависимость интенсивность полос AIO (484,22 нм) в спектрах от расфокусировки. Образец – алюминий, оксидированный в серной кислоте.

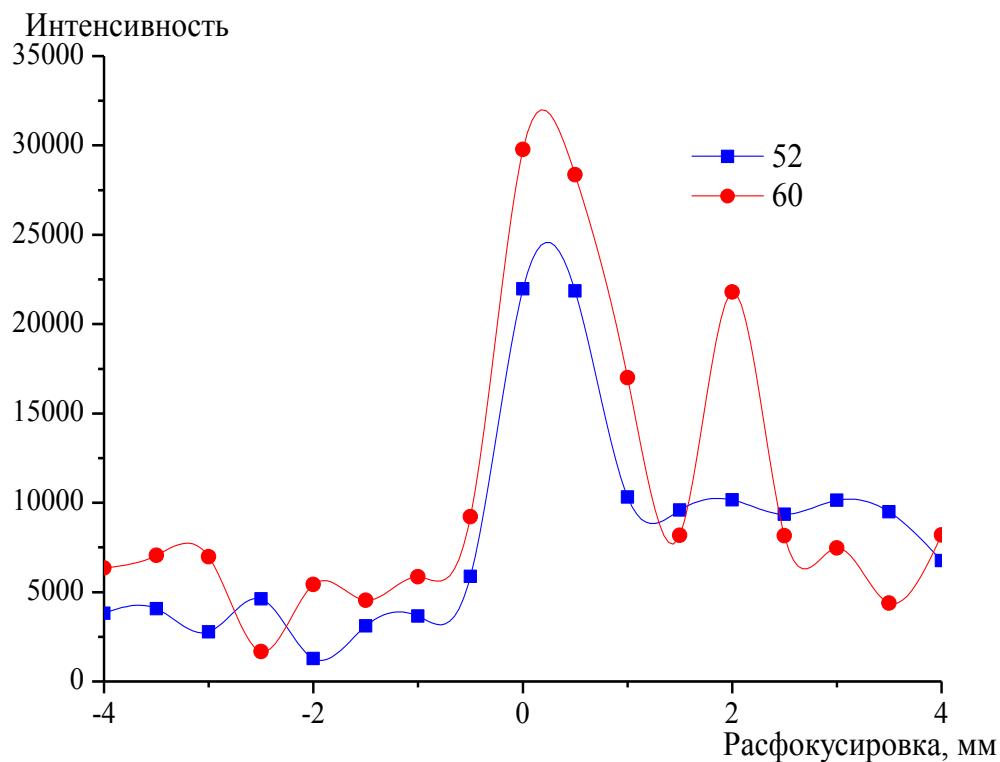


Рис. 2 в. Зависимость интенсивность полос AIO (484,22 нм) в спектрах от расфокусировки. Образец – алюминий, оксидированный в щавелевой кислоте.

На рис. 2 приведена зависимость интенсивности полос  $AlO$  (484,22 нм) в спектрах от расфокусировки. Обозначения образцов: 1 – чистый алюминий; 2 – алюминий, оксидированный в серной кислоте; 3 – алюминий, оксидированный в щавелевой кислоте.

Из полученных данных видно, что процесс образования радикалов  $AlN$  и  $AlO$  для чистого алюминия особенно заметен при фокусировке. Предварительная оксидировка поверхности алюминия расширяет возможность получения более или менее постоянного потока радикалов  $AlN$  и  $AlO$  путем расфокусировки. Особенно это заметно для поверхности оксидированной в серной кислоте. Заметные различия между скоростью нарастания потока радикалов при воздействии на оксидированные в различных кислотах поверхности алюминия можно объяснить тем, что покрытия, получаемые в сернокислотном электролите, достаточно толсты и пористы, в то время как получаемые в щавелевокислом электролите более тонкие и плотные [3].

Из приведенных результатов видно, что последовательное воздействие на мишень сериями сдвоенных лазерных импульсов с интервалом между ними 10 мкс и положительной расфокусировке излучения до 2 мм приводит к существенному увеличению поступления радикалов  $AlN$  и  $AlO$  в плазму при использовании оксидированного алюминия, что может быть использовано в практических работах.

### Библиографический список:

1. Жерихин, А.Н. Лазерное напыление тонких пленок. Итоги науки и техники. Серия: Проблемы лазерной физики / А.Н. Жерихин. – М. ВИНТИ, 1990. – 107 с.
2. Сухов, Л.Т. Лазерный спектральный анализ / Л.Т. Сухов. – Новосибирск: Наука, 1990. – 143 с.
3. Инженерная гальванотехника в приборостроении / под ред. А.М. Гинберга. – М.: Машиностроение, 1977. – С. 261-270.