

**Н.Х. Чинь, А.Р. Фадаиян, Лэ Тхи Ким Ань**

**Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ АЮ  
ПРИ МНОГОКРАТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ  
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ПОВЕРХНОСТЬ АЛЮМИНИЯ**

Лазерная абляция твердых тел наносекундными импульсами умеренной интенсивности используется во многих научных и практических приложениях [1]. Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного воздействия. При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное проведение высокочувствительного спектрального анализа [2], контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управлением составом плазмы, направляемой на подложку.

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 алюминия и (или) соединений алюминия, типа  $AlO$  для использования в технологиях напыления тонких пленок.

В большинстве исследований двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии (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 [3]. 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.

Так как быстро нагревающийся твердотельный, жидкий или газообразный образец около фокального объема расширяется со скоростью в несколько раз превышающей скорость звука, он выталкивает вперед окружающую атмосферу. До того, как плазма остынет, и диффузия окружающей атмосферы сможет диффундировать в объем, находящийся под воздействием ударной волны, этот почти мгновенный нагрев и расширение предположительно оставляют за собой область с весьма повышенной температурой, несколько повышенным давлением и сильно сниженной плотностью атмосферного окружения.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1. В качестве источника абляции и возбуждения приповерхностной плазмы спектрометр включает в себя двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (до 80 мДж), так и временного сдвига между сдвоенными импульсами (0–100 мкс) излучения.

Следует отметить, что в связи с тем, что все процессы проходят в воздушной атмосфере естественно ожидать, что на каких то стадиях процесса возможно образование молекулярных комплексов алюминия с кислородом, азотом и т. д.

Динамика образования одного из продуктов взаимодействия атомов алюминия с кислородом 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 [6, 7].

Динамика образования АЮ исследована при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень. На рисунке 1 приведена в качестве примера зависимость интенсивность полос (484,22 нм, 486,64 нм) в спектрах АЮ от интервала между импульсами при энергии импульсов 55 мДж и воздействии на предварительно оксидированную поверхность алюминия (сумма 3 импульсов).

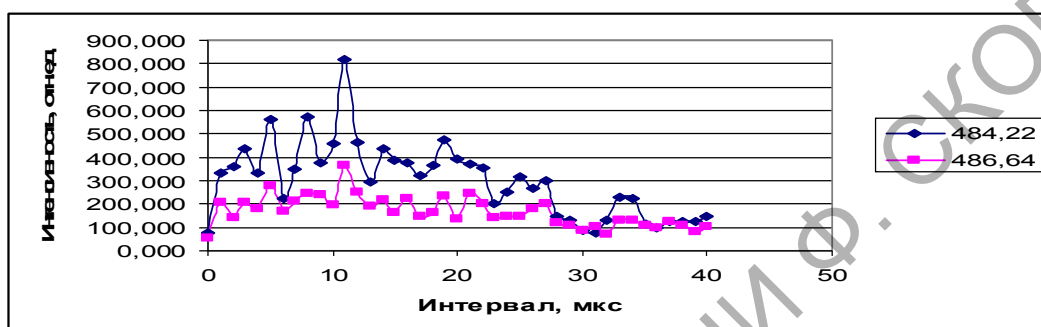


Рисунок 1 – Зависимость интенсивность полос (484,22 нм, 486,64 нм) в спектрах АЮ от интервала между импульсами

Как видно из рисунка наибольшая интенсивность полос наблюдается при интервале между импульсами порядка 10–12 мкс. С использованием указанного интервала нами проведено исследование процесса образования радикалов АЮ от энергии импульсов в зависимости от номера воздействующего на мишень импульса. Данные проведенных исследований приведены на рисунке 2.

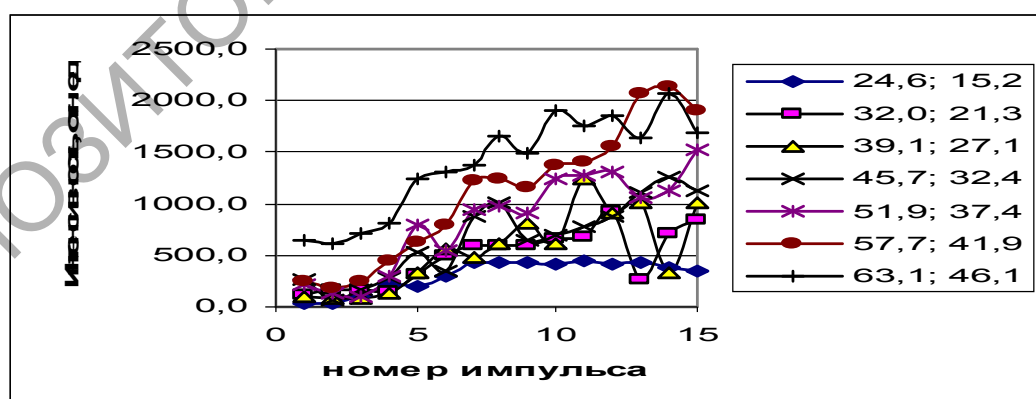


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности полосы 484,21 нм от номера импульса (глубины) при различных энергиях импульсов (в рамке энергия первого и второго импульса в мДж)

Как видно из данных процесс образования радикалов АЮ существенно увеличивается с увеличением энергии импульсов и особенно это заметно с увеличением глубины кратера. При малой энергии импульсов накачки порядка 11–12 Дж начиная с 7 импульса интенсивность полос перестает сильно изменяться. В то же время при энергии накачки 16 Дж (энергия импульсов 57,7 и 41,9 мДж) при 13–14 импульсах интенсивность полос существенно увеличивается и сравнивается по эффективности образования с более высокой энергией импульсов.

Наличие резкого временного порога скорости образования радикалов АЮ указывает на то, что причину наблюдаемых явлений необходимо искать в особенностях плазмообразования внутри образующегося достаточно глубокого канала. Картина плазмообразования в воздушной среде существенно усложняется из-за явления последействия, практически неизбежного при формировании глубоких отверстий сдвоенными импульсами, что вызывается накоплением аблированных микрочастиц и кластеров в атмосфере образующихся полостей. При этом воздействие последующего импульса, следующего через небольшой интервал времени, приводит к низкороговому 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. В этом случае появление плазменно-пылевой области, отстоящей на определенное расстояние от поверхности, приводит с одной стороны к дополнительной экранировке, а с другой, по видимому более важной, к созданию высокотемпературного плазменного облака высокого давления, разлетающегося преимущественно по направлению отверстия. После окончания действия лазерного импульса плазменная область продолжает расширяться за счет запасенной в ней энергии и давления. Расширение прекращается после достижения внутри нее давления, равного атмосферному. Образуется резко ограниченная и относительно долгоживущая область горячего газа вблизи облученной поверхности. Время формирования  $t$  и максимальный радиус  $r$  горячей области определенны в [4] дают значения  $t \approx 2$  мкс и  $r \approx 0,6$  мм. Указанные значения неплохо коррелируют с наблюдаемым в нашем случае резким изменением скорости пробоя при времени задержки между импульсами в диапазоне 1–4 мкс [5] и началом резкого подъема интенсивности полос АЮ (см. рисунок 1).

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования

характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой вблизи поверхности алюминиевой мишени, при воздействии на нее серии сдвоенных последовательных импульсов на поверхность показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы. Из приведенных результатов видно, что последовательное воздействие на мишень серии сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними порядка 4–12 мкс приводит к существенному увеличению поступления радикалов AlO в плазму.

### Литература

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, 1990. – С. 182.
3. Гончаров, В.К. /В.К. Гончаров, К.В. Козадаев // Инж.-физ. журнал. – 2010. – Т. 8. – № 1. – С. 80.
4. С.М. Климентов, С.В. Гарнов, В.И. Конов, Т.В. Кононенко и др. // Труды ИОФ им. А.М. Прохорова РАН. – 2004. – Т. 60. – С. 13
5. Фадаиян, А.Р. / А.Р. Фадаиян, А.П. Зажогин // Вестник БГУ. Серия 1. – 2009. – № 2. – С. 14.
6. Hermann, J. / J. Hermann, C. Dutuquet // J. Phys. D: Appl. Phys. – 1999. – Vol. 32. – P. 2707–2713.
7. Rohwetter Ph., Mejean I.Ju.G., Stehnaszczyk K., Salmon E., Kasparian J., Wolf I.P., Woste. L. // J. Anal. At. Spectrom. – 2004. – Vol. 19. – P. 437–444.