

УДК 533.9.082.5; 621.373.826; 621.793.79

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НИТРИДА
АЛЮМИНИЯ В ПЛАЗМЕ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СДВОЕННЫХ
ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА АЛЮМИНИЕВЫЙ СПЛАВ Д16Т
В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА**

Х. Баззал, Фадаян А.Р., Е.С. Воропай, А.П. Зажогин

Белорусский государственный университет

220030, Минск, пр. Независимости, 4

zajogin_an@mail.ru

Аннотация: Проведены исследования влияния расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на формирование компонентного и зарядового состава приповерхностной лазерной плазмы методом лазерной искровой спектрометрии (ЛИС). Показана возможность как увеличения доли ионов алюминия различной зарядности в приповерхностной лазерной плазме, так и кластеров AlN при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на мишень.

Ключевые слова: радикалы AlN , импульсное лазерное напыление, приповерхностная лазерная плазма, лазерная искровая спектрометрия, многозарядные ионы, сдвоенные лазерные импульсы.

Уникальные свойства нитридов металлов третьей группы делают их очень перспективными для создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов. Ширина запрещенной зоны этих полупроводниковых материалов в два-пять раз больше, чем у традиционных полупроводниковых материалов (кремния и арсенида галлия). Кроме того, у них выше напряжение пробоя и теплопроводность. Уникальный комплекс физико-химических свойств этих материалов позволяет существенно улучшить технические характеристики современных приборов: повысить эффективность светодиодов и лазеров и расширить спектр их излучения в фиолетово-голубую и ближнюю УФ область спектра, многократно повысить допустимую мощность полевых транзисторов и интегральных схем (ИС) на их основе при сохранении быстродействия. Помимо перспективных функциональных характеристик приборы на основе этих материалов могут стабильно работать в более широком диапазоне температур и уровня радиации, чем кремниевые и арсенид галлиевые приборы.

В настоящее время одним из материалов, перспективных и применяемых в микроэлектронике и оптоэлектронике в качестве диэлектрических теплоотводящих подложек, является нитрид алюминия (AlN) и керамические материалы на его основе. Известные технологии получения AlN энергозатратны, так как требуют длительного нагрева Al_2O_3 в смеси с графитом в потоке азота при 1700 °С. При производстве керамических подложек в исходную смесь вводят добавки, так как AlN не

образует жидкой фазы и практически не спекается. Все известные добавки ухудшают электрофизические и теплофизические характеристики AlN . В ряде областей техники не требуются материалы с высокими теплофизическими характеристиками, как у монокристаллов нитрида алюминия, и поэтому полифазные нитридсодержащие керамические материалы могут быть эффективно использованы. Экспериментально показано [1], что синтез нитрида алюминия также происходит и при тепловом взрыве нанопорошка алюминия в воздухе, что требует меньших энергетических затрат: энергия расходуется только на инициирование процесса горения. В то же время механизм формирования AlN при горении нанопорошка алюминия в воздухе и морфология продуктов изучены недостаточно, чтобы понять природу протекающих процессов и управлять ими для получения керамических порошков с определенным фазовым составом и морфологией кристаллических фаз. Таким образом, возникает необходимость разработки основ новой промышленной технологии получения керамических нитридсодержащих порошков и керамических материалов на их основе с повышенным выходом нитрида алюминия при горении нанопорошка алюминия в воздухе, и поиска способов управления процессом синтеза и кристаллизацией микроструктур.

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, 3], 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 AlN для использования в технологиях получения нанокристаллов и напыления тонких пленок.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель СП «ЛОТИС ТИИ»). В качестве источника возбуждения плазмы в спектрометре используется двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между импульсами (модель LS2131 DM). Лазер может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов ≈ 15 нс.

Временной сдвиг между сдвоенными импульсами может изменяться от 0 до 100 мкс с шагом 1 мкс. Лазерное излучение фокусировалось на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер сфокусированного пятна примерно 50 мкм.

Динамика образования одного из продуктов взаимодействия атомов алюминия с азотом радикала AlN изучена нами по эмиссионным спектрам этой молекулы при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха. Наиболее интенсивными электронно-колебательными полосами в эмиссионных спектрах являются полосы с длинами волн 508,05 и 512,3 нм.

При проведении экспериментальных исследований установлено, что наибольшая интенсивность полос наблюдается для интервала между импульсами 6–12 мкс. С использованием интервала 8 мкс нами проведено исследование процесса образования нанокластеров AlN от энергии импульсов в зависимости от расфокусировки их. Данные проведенных исследований приведены на рис. 1.

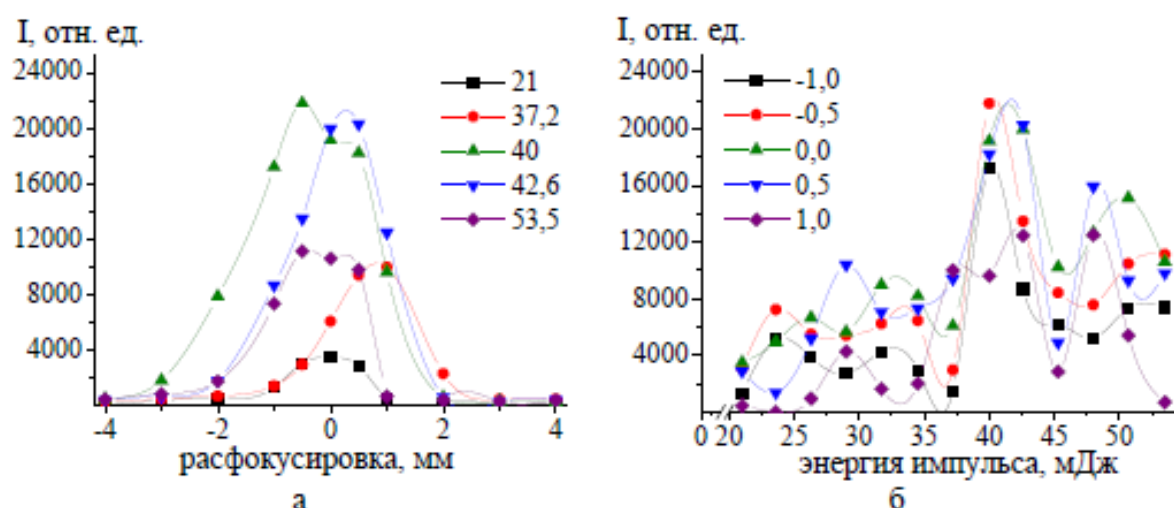


Рис. 1. Зависимость интенсивность полос AlN (512,3 нм), в спектрах от расфокусировки и энергии импульсов. Сплошные линии сплайн-аппроксимации данных.

Как видно из полученных данных процесс образования нанокластеров AlN с увеличением энергии до 40 мДж увеличивается, а затем несколько уменьшается, в то же время зависимость от расфокусировки (плотности мощности) неоднозначна.

На рис. 2 приведены зависимость интенсивность линий Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм) в спектрах от расфокусировки и энергии импульсов.

При сопоставлении рисунков обращает внимание хорошая корреляция между возрастанием интенсивности полос радикалов и существенным уменьшением интенсивности линии $Al\ III$ (452,92 нм).

С использованием указанных выше интервала и энергии нами проведено исследование процесса образования AlN в зависимости от номера воздействующего на мишень импульса. Результаты проведенных исследований приведены на рис. 3.

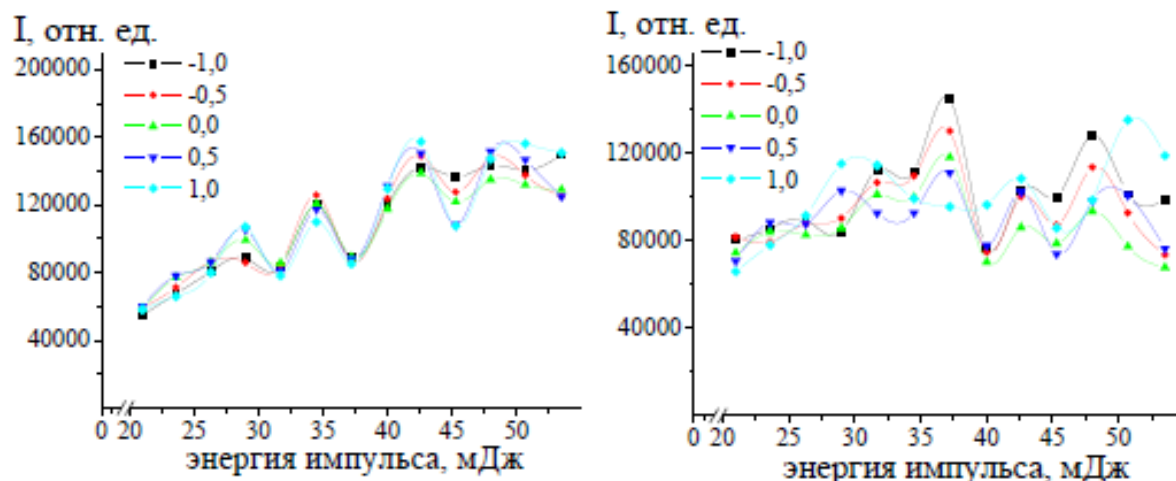


Рис. 2. Зависимость интенсивность линий $Al\ II$ (466,3 нм – левый рисунок) и $Al\ III$ (452,92 нм – правый рисунок) в спектрах от расфокусировки и энергии импульсов (в рамке величина расфокусировки в мм). Сплошные линии сплайн-аппроксимации данных.

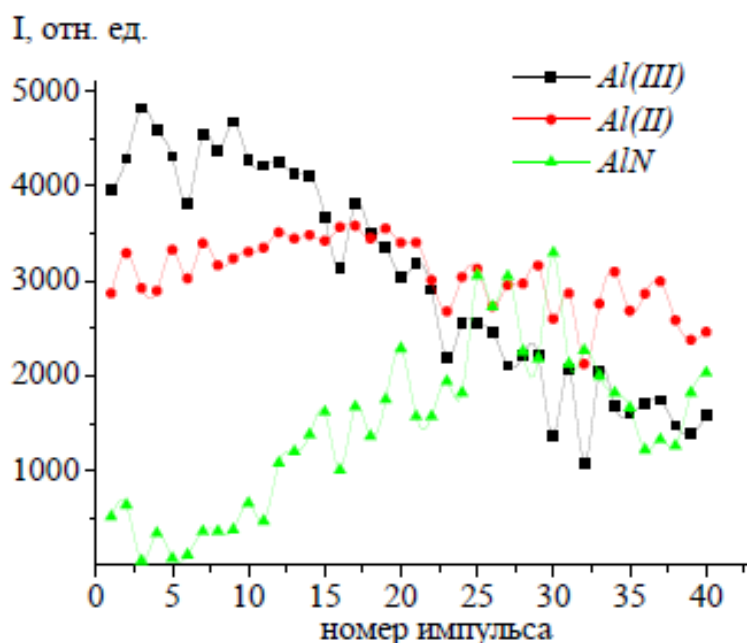


Рис.3. Зависимость интенсивности полосы AlN от номера импульса. Сплошные линии сплайн-аппроксимации данных.

Как видно из данных процесс образования нанокластеров AlN существенно увеличивается с увеличением глубины кратера. Наличие на поверхности оксидов алюминия ускоряет начало процесса образования как радикалов AlO , так и AlN . Наличие резкого временного порога скорости образования нанокластеров AlN указывает на то, что причину наблюдаемых явлений необходимо искать в особенностях изменения температурного и химического состава плазмы 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 пробую 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. Последний эффект и обуславливает увеличение скорости пробивки по сравнению с одиночными или редко повторяющимися импульсами. Так, к примеру, в работах [4] скорость пробивки менее 1 мкм/импульс при сравнимых плотностях мощности одиночного импульса в режиме редко повторяющихся импульсов, что примерно на порядок меньше (≈ 10 мкм/импульс) для высокой частоты повторения (10–200 кГц).

Подтверждением указанного механизма может служить и тот факт, что при увеличении задержки между импульсами скорость пробивки отверстия уменьшается [5]. Результаты этих экспериментов позволяют полуколичественно определить среднее время существования и средний размер наночастиц металла и его соединений с кислородом, азотом и т.д., образующихся в воздушной среде в канале.

Полученный результат может быть объяснён тем, что наибольшее влияние в данном случае оказывает плотность энергии в месте воздействия излучения на поверхность, а также форма кратера (при расфокусировке

вглубь пластины). Следует отметить, что с расфокусировкой лазерного излучения интенсивности ионных линий алюминия уменьшаются значительно медленнее, чем интенсивности линий оксида алюминия, что говорит о большей зависимости образования молекулярных соединений в плазме от плотности мощности и геометрии кратера.

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой вблизи поверхности алюминия, при воздействии на нее последовательных расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на поверхность оксидированного алюминия показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы и возможность получения необходимых концентраций и поступления радикалов AlO и AlN в плазму.

Библиографический список:

1. Ильин, А.П. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии / А.П. Ильин, А.А. Громов. – Томск: Изд-во Томского ун-та, 2002. – 154 с.
2. Сухов, Л.Т. Лазерный спектральный анализ (физические принципы) / Л.Т. Сухов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990. – 142 с.
3. Thomann, A. Surface nitriding of titanium and aluminium by laser-induced plasma / A.L. Thomann, E. Sicard, C. Boulmer-Leborgne, C. Vivien, J. Hermann et al. // Surface and Coatings Technology. – 1997. – V. 97. – I. 1-3. – P. 448-452.
4. Гарнов, С.В. Особенности плазменной экранировки при абляционном формировании глубоких каналов высокоинтенсивным лазерным излучением / С.В. Гарнов, С.М. Климентов, В.И. Конов, Т.В. Кононенко, Ф. Даусингер // Квантовая электроника. – 1998. – Т. 25. – № 1. – С.45-48.
5. Фадаян, А.Р. Эффекты низкорогового пробоя металлов одиночными и сдвоенными лазерными импульсами / Фадаян А.Р. (Иран), А.П. Зажогин // Вестник БГУ. Серия 1. – 2009. – № 2. – С. 14-18.