

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

Х. БАЗЗАЛ¹, А. Р. ФАДАИЯН², А. П. ЗАЖОГИН¹

¹Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Республика Беларусь

²Частное научно-производственное унитарное предприятие «Лазер Системс инжиниринг групп», пр. Независимости, 67, 220007, г. Минск, Республика Беларусь

Для установления условий оптимального влияния расфокусировки сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование компонентного и зарядового составов приповерхностной лазерной плазмы проведены ее исследования методом лазерной искровой спектроскопии. Рассмотрены процессы образования нитрида алюминия при воздействии расфокусированных сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевый сплав Д16Т в атмосфере воздуха. Показана возможность увеличения как доли ионов алюминия различной зарядности в приповерхностной лазерной плазме в режимах абляции поверхности алюминиевых сплавов расфокусированными сдвоенными лазерными импульсами, так и нанокластеров нитрида алюминия при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на мишень. Определены условия влияния параметров лазера и процессов на поверхности и в плазме на формирование определенного ионного и молекулярного состава плазмы при воздействии сдвоенных лазерных импульсов.

Ключевые слова: нитрид алюминия; импульсное лазерное напыление; приповерхностная лазерная плазма; лазерная искровая спектроскопия; многозарядные ионы; сдвоенные лазерные импульсы.

THE FORMATION PROCESSES OF ALUMINUM NITRIDE IN THE PLASMA WHEN THE ALUMINUM ALLOY D16T IS SUBJECTED TO THE EFFECT OF DOUBLE LASER PULSES IN THE AIR

H. BAZZAL^a, A. R. FADAEIAN^b, A. P. ZAJOGIN^a

^aBelarusian State University, Nezavisimosti avenue, 4, 220030, Minsk, Republic of Belarus

^b«Laser Systems Engineering Group» Co., Nezavisimosti avenue, 67, 220007, Minsk, Republic of Belarus

To establish conditions for the optimum defocusing effect of double laser pulses on the purposeful formation of the component and charge composition in the surface laser plasma, it has been studied by the laser spark spectrometry method. The formation processes of aluminum nitride when the aluminum alloy D16T was irradiated by double laser pulses in the air have been studied. The possibility to increase the portion of aluminum ions with different charges in the surface laser plasma in the ablation mode when the surface of aluminum alloys was subjected to defocused laser pulses, and also of aluminum nitride nanoclusters when a target was

Образец цитирования:

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

For citation:

Bazzal H., Fadaeian A. R., Zajogin A. P. The formation processes of aluminum nitride in the plasma when the aluminum alloy D16T is subjected to the effect of double laser pulses in the air. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2016. No. 1. P. 26–33 (in Russ.).

Авторы:

Ходор Баззал – магистрант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.
Ахмад Реза Фадаиян – научный сотрудник.
Анатолий Павлович Зажогин – доктор физико-математических наук, профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Authors:

Khoder Bazzal, master's degree student at the department of laser physics and spectroscopy, school of physics.
bazzal_khoder_88@hotmail.com
Ahmad Reza Fadaeian, researcher.
pcwco@rambler.ru
Anatolij Zajogin, doctor habilitatus of physics and mathematics; professor at the department of laser physics and spectroscopy, school of physics.
zajogin_an@mail.ru

subjected to the effect of a series of double pulses has been demonstrated. The influence of laser parameters and of the processes proceeding at the surface and within the plasma on the formation of a particular ionic or molecular composition of the plasma when using double laser pulses has been estimated.

Key words: aluminum nitride; pulsed laser deposition; surface laser plasma; laser spark spectrometry; multiply charged ions; double laser pulses.

Нитриды металлов третьей группы обладают уникальными свойствами, обуславливающими перспективу создания на их основе электронных, оптоэлектронных и акустоэлектронных приборов. Ширина запрещенной зоны этих полупроводниковых материалов в два – пять раз больше, чем у традиционных – 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 их излучение 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 базе нитридов металлов могут стабильно работать в более широком диапазоне температур и уровня радиации, чем кремниевые и арсенид-галлиевые [1].

В настоящее время одними из перспективных материалов, применяемых в микроэлектронике и оптоэлектронике в качестве диэлектрических теплоотводящих подложек, являются нитрид алюминия (AlN) и керамика на его основе. Нитриды металлов обладают необычным сочетанием свойств: AlN имеет большую теплопроводность, сравнимую с теплопроводностью меди и серебра (до $260 \text{ Вт/м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$) при высоких значениях электрического сопротивления (до $10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$); кубический нитрид бора (BN) является сверхтвердым материалом и т. д.

За последние 10–15 лет существенно изменились взгляды на роль азота при горении металлов в воздухе и в разных типах пламени. Азот, как окислитель, может конкурировать с кислородом в области температур, при которых происходит горение металлов. При взаимодействии с фтором и кислородом молекулярный азот выступает восстановителем, а в реакциях с другими веществами – окислителем. Молекула азота имеет высокую химическую устойчивость:

- энергия диссоциации почти в 2 раза больше, чем у молекулы кислорода;
- энергия ионизации сравнима с энергией ионизации атома аргона (15,80 и 15,76 эВ соответственно);
- силовая константа связи почти в 2 раза больше, чем у кислорода, кроме того, молекула азота диамагнитна.

Возбуждение молекулы, ослабляющее связь, требует большой энергии, поэтому до сих пор во многих технологиях азот используется в качестве инертного газа. Наиболее разработанные и изученные методы активации молекулы азота – нагревание, ионизирующее излучение, действие катализаторов, электроразряд, а также их сочетание. При тепловой активации молекулярного азота – нагревании до $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ – степень диссоциации достигает 0,1 %. Другие методы активации являются неэффективными – КПД процесса не превышает 1–2 %. Все это обуславливает поиск специальных условий реакции N_2 или активированного азотного комплекса с металлами и представляет большой практический интерес [2].

Известные технологии получения AlN энергозатратны, так как требуют длительного нагрева Al_2O_3 в смеси с графитом в потоке азота высокого давления при температуре $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Для производства керамических подложек в исходную смесь вводят добавки, поскольку 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 керамики могут быть эффективно использованы.

Экспериментально показано [4], что синтез нитрида алюминия происходит также 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 производства 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.

В настоящее время для получения AlN в виде порошков или в составе тонких пленок и покрытий начинают применять методы лазерного воздействия на Al в атмосфере активированного азота под давлением [5–7].

Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределений состава лазерного факела возможны на основе воздействия на первичную плазму дополнительного лазерного излучения. При использовании схем и методов двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму возможно одновременное осуществление высокочувствительного спектрального анализа [8, 9], контроля концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управления составом плазмы, направляемой на подложку.

Цель работы – показать возможность и определить условия получения методом абляции сериями сдвоенных лазерных импульсов алюминиевых мишеней в воздушной атмосфере нанокластеров AlN для использования их в технологиях синтеза нанокристаллов и напыления тонких пленок.

Методика эксперимента

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель – СП «ЛЮТИС ТИИ»). Источником возбуждения плазмы в спектрометре является 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 фокусировали на образец с помощью ахроматического конденсора с фокусным расстоянием 104 мм. Размер сфокусированного пятна ~ 50 мкм.

Динамика изменения атомного и ионного состава приповерхностной плазмы и образования нанокластеров AlN в глубине кратера исследована методом многоканальной атомно-эмиссионной спектроскопии при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на пластинку алюминиевого сплава Д16Т толщиной 1 мм от их энергии (15–60 мДж), временного интервала между ними (1–20 мкс) и плотности мощности путем расфокусировки воздействующего излучения.

Процесс образования одного из продуктов взаимодействия атомов алюминия с азотом AlN изучен 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.

Результаты эксперимента и их обсуждение

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

Из полученных данных видно, что процесс образования нанокластеров AlN растет с увеличением энергии до 40 мДж, а затем несколько уменьшается. В то же время зависимость от расфокусировки (плотности мощности) неоднозначна.

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

При сопоставлении результатов очевидна 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 представлены на рис. 3.

Данные, представленные на рис. 3, свидетельствуют, что скорость процесса образования нанокластеров AlN существенно увеличивается с ростом глубины кратера. Наличие на поверхности пластинки оксидов алюминия ускоряет начало процесса образования как радикалов AlO, так и AlN. Резкий временной порог 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.

Известно, что реакционная способность кислорода при стандартных условиях высока и связана с особенностями электронной структуры молекулы O_2 [10]. Молекула кислорода является бирадикалом, т. е. парамагнитна, порядок связи равен 2. Радикалы обладают высокой реакционной способностью, их химическое взаимодействие протекает при низкой энергии активации. Кислород по этой причине имеет преимущество в реакционной способности перед молекулой азота, к тому же энергия разрыва связей в молекуле O_2 составляет 493 кДж/моль, что в 2 раза меньше энергии диссоциации молекулы N_2 (940 кДж/моль), порядок связи в которой равен 3. Даже при 3000 °С степень диссоциации молекул азота достигает всего 0,1 %.

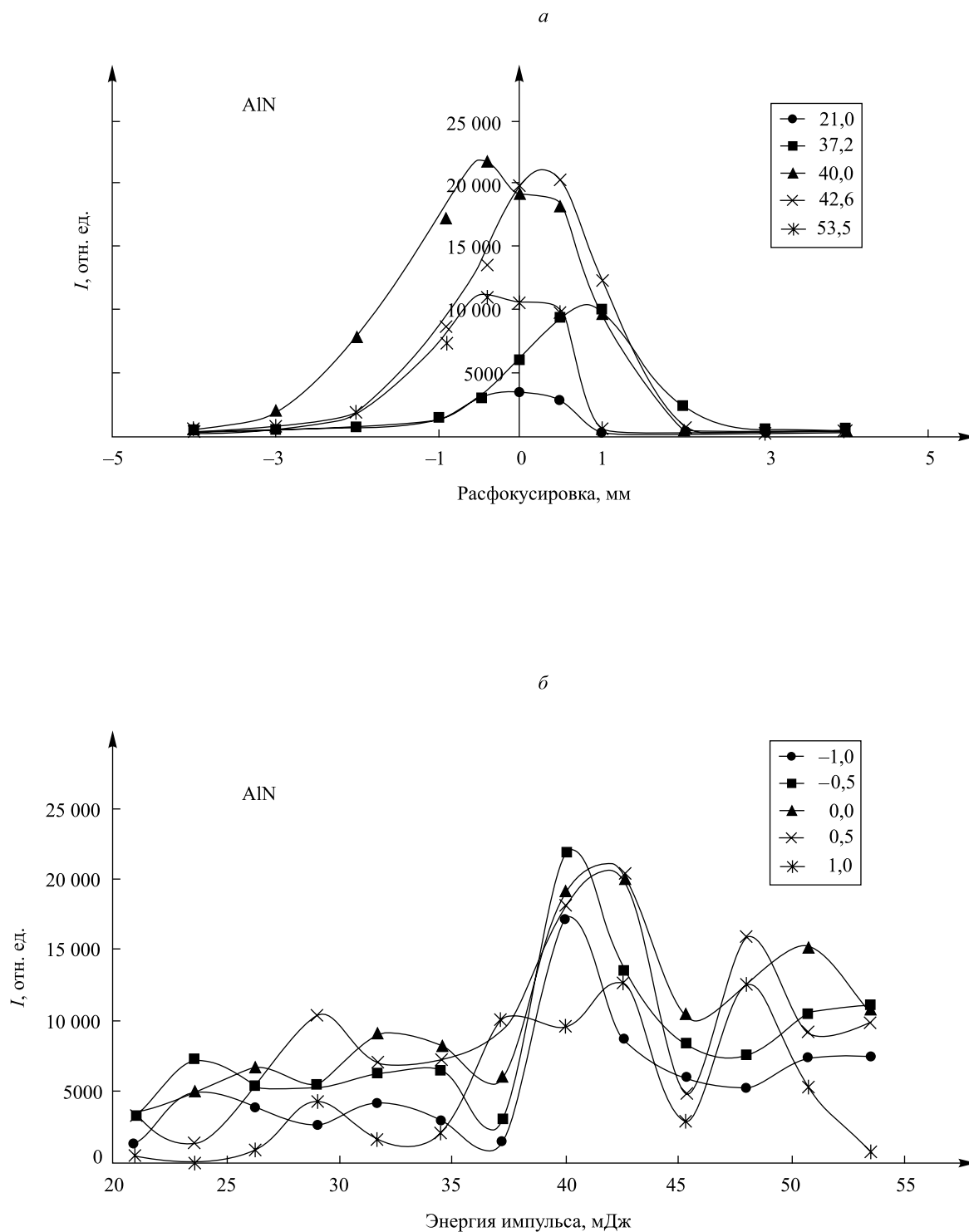


Рис. 1. Зависимость интенсивности (I) полос АИН (512,3 нм) в спектрах от расфокусировки и энергии импульсов (в рамке: a – энергия, мДж; $б$ – величина расфокусировки, мм)

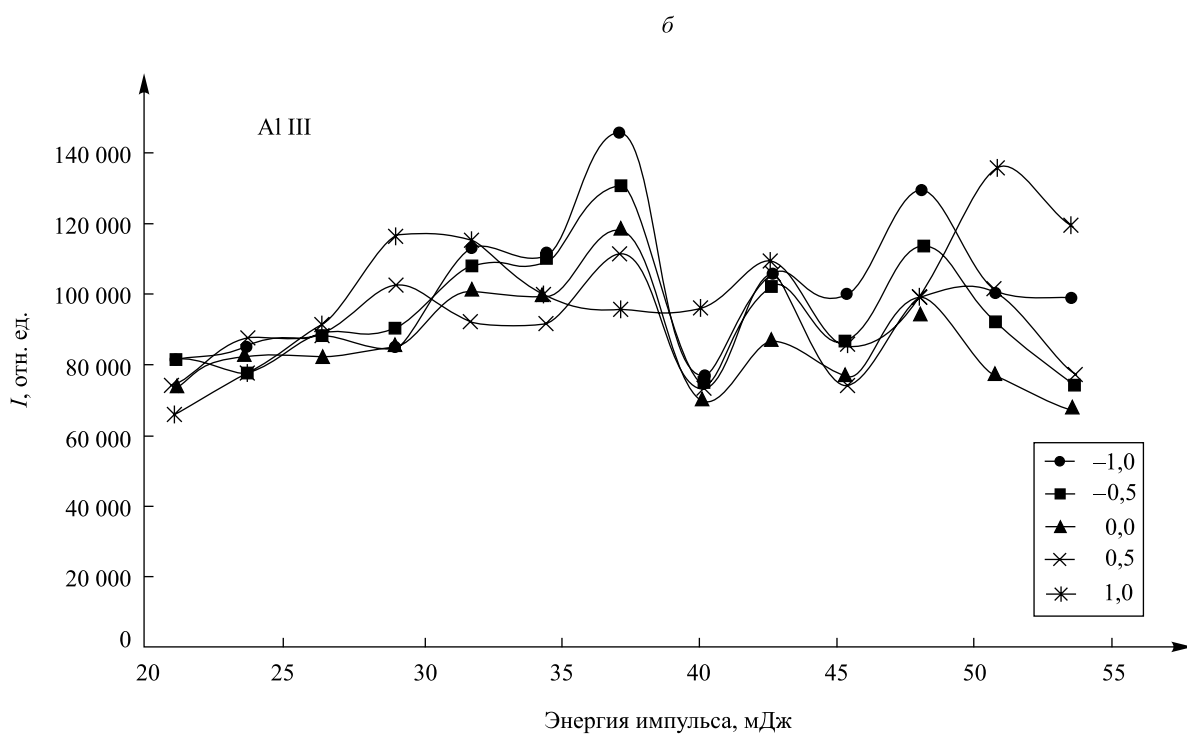
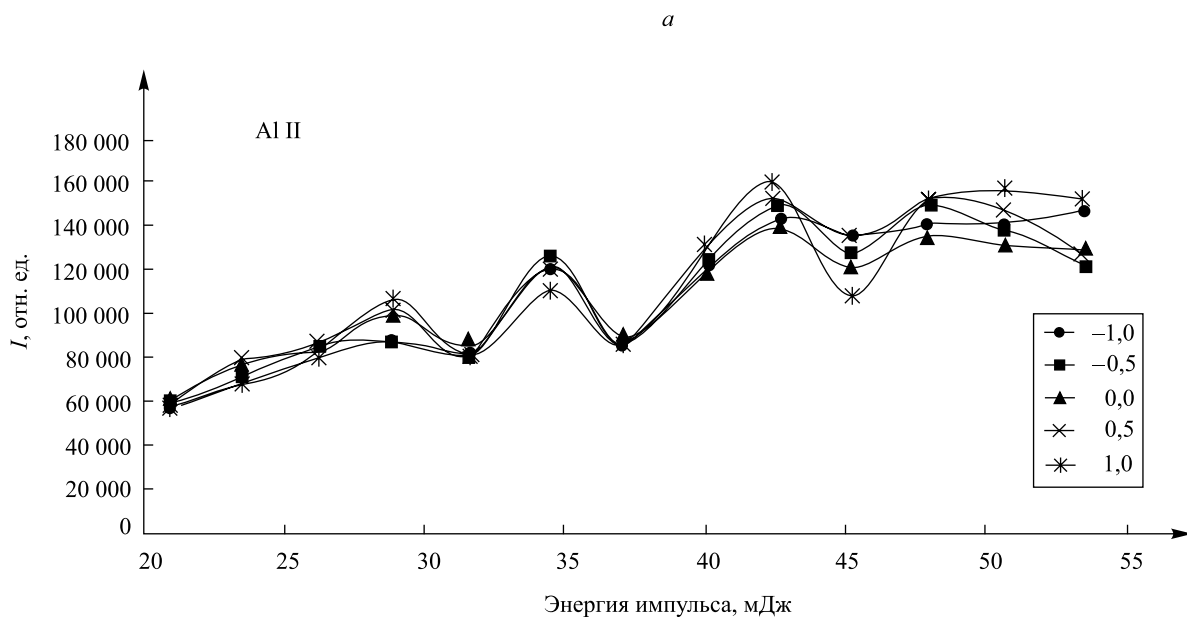


Рис. 2. Зависимость интенсивности (I) линий Al II (466,3 нм) (*a*) и Al III (452,92 нм) (*б*) в спектрах от энергии импульсов и расфокусировки (в рамке – величина расфокусировки, мм)

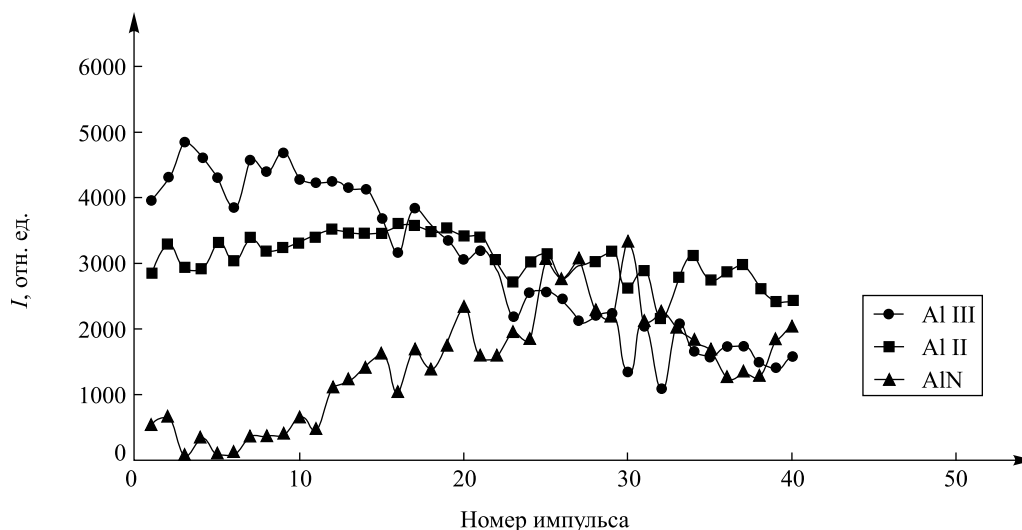


Рис. 3. Зависимость интенсивности (I) полосы AlN от номера импульса

Однако в данном случае следует отметить, что молекула кислорода при действии электромагнитного излучения и высоких температур может переходить из парамагнитного триплетного состояния $O_2(X^3\Sigma_g^-)$ в синглетное состояние $O_2(a^1\Delta_g)$, т. е. формирование нитридов происходит при фотохимической дезактивации кислорода его переводом в синглетное (неактивное) состояние, характеризующееся увеличением энтропии активации [11]. Таким образом, собственное излучение горящего образца, сопровождающее процесс горения, снижает активность кислорода, а активированный азот взаимодействует при высокой температуре в соответствии с его реакционной способностью. Это подтверждается изменением концентрации ионов азота в плазме при расфокусировке (рис. 4).

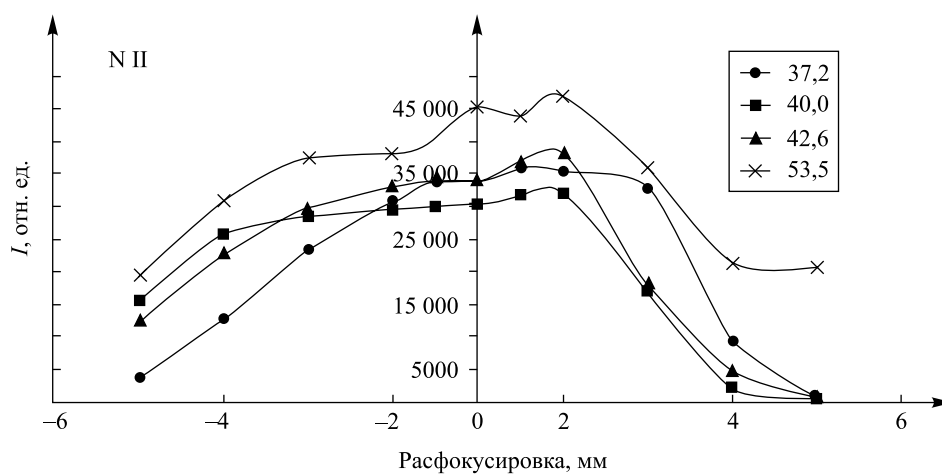


Рис. 4. Зависимость интенсивности (I) ионной линии азота N II (399,5 нм) в спектрах от расфокусировки и энергии импульсов (в рамке — энергия импульсов, мДж)

Картина плазмообразования в воздушной среде существенно усложняется из-за явления последействия, практически неизбежного при формировании глубоких отверстий двоянными импульсами, что вызывается накоплением аблированных микрочастиц и кластеров в атмосфере образующихся полостей. При этом воздействие 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 на определенном расстоянии 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 в направлении отверстия. Последний эффект и обуславливает увеличение скорости пробивки по сравнению с одиночными или редко повторяющимися импульсами. Так, к примеру, в работе [12] скорость пробивки составляет менее 1 мкм/имп. при сравнимых плотностях мощности одиночного импульса в режиме редко повторяющихся импульсов, что примерно на порядок меньше (≈ 10 мкм/имп.) для высокой частоты повторения (10–200 кГц).

Подтверждением предложенного механизма может служить и тот факт, что при увеличении задержки между импульсами скорость пробивки отверстия уменьшается [9]. Изложенные в указанной работе результаты 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 объяснен тем, что наибольшее влияние в данном случае оказывает плотность энергии в месте воздействия излучения на поверхность, а также форма кратера (при расфокусировке в глубь пластины). Следует отметить, что с расфокусировкой лазерного излучения интенсивности ионных линий алюминия уменьшаются значительно медленнее, чем интенсивности линий оксида и нитрида алюминия, что говорит о большей зависимости образования молекулярных соединений в плазме от плотности мощности и геометрии кратера.

Для качественного понимания процессов проведем оценку параметров газовой среды в аблируемом канале, приняв к рассмотрению несколько фаз процесса, включающих разлет аблированных и сконденсировавшихся частиц после первого импульса, взаимодействие второго импульса с указанными продуктами, разлет плазменного факела за время лазерного воздействия, дальнейшее расширение плазменной области за счет разницы давлений внутри и снаружи нее и, наконец, последующее остывание нагретого газа вблизи аблированной поверхности. Для типичных в эксперименте значений интенсивности лазерных импульсов $q \approx (1-5) \cdot 10^9$ Вт/см² скорость разлета и температура плазмы во второй фазе достигают значений $3 \cdot 10^6$ см/с и $3 \cdot 10^5$ К [12–14]. Учитывая скорость и продолжительность импульса облучения, получаем, что к концу данной фазы протяженность плазменного факела при одномерном расширении составила бы 0,45 мм, что сравнимо с длиной канала. В результате этого за время действия второго лазерного импульса плазма достигает поверхности образца. После окончания его действия плазменная область продолжает расширяться за счет запасенной в ней энергии и давления. Расширение прекращается после достижения внутри ее давления, равного атмосферному. Образуется резко ограниченная и относительно долгоживущая область горячего газа вблизи облученной поверхности.

Время формирования t и максимальный радиус r горячей области, определенные в [13], дают значения $t \approx 2$ мкс и $r \approx 0,6$ мм. Указанные значения хорошо коррелируют с наблюдаемым в нашем случае резким изменением скорости пробоя при времени задержки между импульсами, равном ~ 4 мкс [9], и началом резкого подъема интенсивности полос AlN (см. рис. 3).

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой вблизи поверхности многокомпонентной мишени при воздействии на нее двух последовательных импульсов, показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы. Определены временные интервалы между импульсами (5–15 мкс), энергия и параметры расфокусировки излучения, обеспечивающие возможность получения необходимых концентраций однократно или двукратно ионизированных атомов алюминия для формирования нанокластеров оксидов и нитридов алюминия. Показано, что последовательное воздействие на мишень серии сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними 10 мкс приводит к существенному увеличению поступления нанокластеров AlN в плазму.

Положительные результаты проведенных экспериментов следует рассматривать как основу для дальнейшей работы по усовершенствованию процесса безвакуумного лазерного напыления и оптимизации технологических параметров. Возможно также существенное расширение круга осаждаемых покрытий, включая, например, такие, как смешанные высокотемпературные соединения «нитрид алюминия – нитрид титана», получение которых предполагает химическое взаимодействие испаряемых частиц мишени с окружающим газом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК (REFERENCES)

1. Неволин В. К., Царик К. А. Формирование и исследование наногетероструктур AlGaIn/GaN с применением атомно-силовой микроскопии // Изв. вузов. Электроника. 2009. № 6. С. 44–49 [Nevolin V. K., Tsarik K. A. The formation of the nanoheterostructures of AlGaIn/GaN and their investigation with the use of atomic-emission microscopy. *Izvest. vysshih uchebnyh zaved. Jelektronika*. 2009. No. 6. P. 44–49 (in Russ.)].
2. Ильин А. П., Рот Л. О. К вопросу о механизме высокотемпературного химического связывания азота воздуха // Вестн. науки Сибири. Сер. 3, Химия. 2011. № 1 (1). С. 91–96 [Iljin A. P., Root L. O. On the problem of the high-temperature chemical bonding mechanism of nitrogen in the air. *Vestnik nauki Sibiri. Ser. 3, Himija*. 2011. No. 1 (1). P. 91–96 (in Russ.)].

3. Громов А. А., Хабас Т. А., Ильин А. П. Горение нанопорошков металлов / под ред. А. А. Громова. Томск, 2008.
4. Ильин А. П., Громов А. А. Горение алюминия и бора в сверхтонком состоянии. Томск, 2002.
5. Tharea R. K., Sharma A. K. Formation of AlN in laser ablated plasma of Al in nitrogen ambient // *Phys. Status Solidi*. 2005. Vol. 2, № 2. P. 2079–2082 [Tharea R. K., Sharma A. K. Formation of AlN in laser ablated plasma of Al in nitrogen ambient. *Phys. Status Solidi*. 2005. Vol. 2, No. 2. P. 2079–2082 (in Engl.)].
6. Perez J. A., Vera I. P., Riascos H., Caicedo J. C. Optical emission spectroscopy of Aluminum Nitride thin films deposited by Pulsed Laser Deposition // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. Vol. 511. P. 1–6 [Perez J. A., Vera I. P., Riascos H., Caicedo J. C. Optical emission spectroscopy of Aluminum Nitride thin films deposited by Pulsed Laser Deposition. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. Vol. 511. P. 1–6 (in Engl.)].
7. Chen Jin-hai, Wang Pei-man, Guo Zhao, Li Fu-ming. Emission and mass spectral analyses of laser ablated AlN plumes // *Acta Phys. Sinica*. 1999. Vol. 8, № 3. P. 223–228 [Chen Jin-hai, Wang Pei-man, Guo Zhao, Li Fu-ming. Emission and mass spectral analyses of laser ablated AlN plumes. *Acta Phys. Sinica*. 1999. Vol. 8, No. 3. P. 223–228 (in Engl.)].
8. Сухов Л. Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск, 1990.
9. Фадаиян А. Р., Зажогин А. П. Эффекты низкопорогового пробоя металлов одиночными и сдвоенными лазерными импульсами // *Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика*. 2009. № 2. С. 14–18 [Fadaijan A. R., Zajogin A. P. The effects of the low-threshold breakdown of metals by single and double laser pulses. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2009. No. 2. P. 14–18 (in Russ.)].
10. Физическая энциклопедия : в 5 т. / под ред. А. М. Прохорова. М., 1988. Т. 1. С. 32.
11. Герцберг Г. Электронные спектры и строение многоатомных молекул / под ред. В. Н. Татевского. М., 1969.
12. Гарнов С. М., Климентов В. И., Конов Т. В., Кононенко С. В., Даусингер Ф. Особенности плазменной экранировки при абляционном формировании глубоких каналов высокоинтенсивным лазерным излучением // *Квантовая электроника*. 1998. Т. 25, № 1. С. 45–48 [Garnov S. M., Klimentov V. I., Konov T. V., Kononenko S. V., Dausinger F. The features of the plasma shielding on ablative forming of deep channels by high-intensity laser radiation. *Kvantovaya jelektronika = Quantum electronics*. 1998. Vol. 25, No. 1. P. 45–48 (in Russ.)].
13. Климентов С. М., Гарнов С. В., Конов В. И., Кононенко Т. В., Пивоваров П. А., Царькова О. Г., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. Роль низкопорогового пробоя воздуха в абляции материалов короткими лазерными импульсами // *Тр. Ин-та общ. физики им. А. М. Прохорова РАН*. 2004. Т. 60. С. 13–29 [Klimentov S. M., Garnov S. V., Konov V. I., Kononenko T. V., Pivovarov P. A., Car'kova O. G., Brajtling D., Dausinger F. Rol' nizkoporogovogo proboja vozduha v abljacii materialov korotkimi lazernymi impul'sami. *Proc. of the A. M. Prokhorov Inst. of Opt. Phys., Russ. Acad. of Sci.* 2004. Vol. 60. P. 13–29 (in Russ.)].
14. Буфетов И. А., Кравцов С. Б., Федоров В. Б. Термодинамические параметры наносекундной плазмы на твердой мишени в поле излучения гармоник мощного неодимового лазера с резким передним фронтом // *Квантовая электроника*. 1996. Т. 23, № 5. С. 535–540 [Bufetov I. A., Kravtsov S. B., Fedorov V. B. Termodinamicheskie parametry nanosekundnoj plazmy na tverdoj misheni v pole izluchenija garmonik moshhnogo neodimovogo lazera s rezkim perednim frontom. *Kvantovaya jelektronika = Quantum electronics*. 1996. Vol. 23, No. 5. P. 535–540 (in Russ.)].

Статья поступила в редколлегию 17.09.2015.

Received by editorial board 17.09.2015.