

УДК 533.9.082.5;621.373.826;621.793.79

ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В ПЛАЗМЕ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ПАДЕНИЯ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА МИШЕНЬ ИЗ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА Д16Т В АТМОСФЕРЕ ВОЗДУХА

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

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

²⁾Частное научно-производственное унитарное предприятие «Лазер Системс инжиниринг групп»,
пр. Независимости, 67, 220013, г. Минск, Республика Беларусь

С помощью метода лазерной искровой спектроскопии изучено влияние угла падения сдвоенных лазерных импульсов на целенаправленное формирование компонентного и зарядового составов приповерхностной лазерной плазмы. Исследованы процессы образования нитрида алюминия при воздействии сфокусированных сдвоенных лазерных импульсов под различными углами на поверхность мишени из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха. Показана возможность увеличения как доли ионов алюминия различной зарядности в приповерхностной лазерной плазме в режимах абляции, так и нанокластеров AlN и AlO при последовательном воздействии серии сдвоенных импульсов на мишень под углом падения $\approx 75^\circ$. Определены условия влияния параметров лазера и характера процессов на поверхности мишени и в плазме на формирование ионного и молекулярного составов плазмы при воздействии сдвоенных лазерных импульсов.

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

INVESTIGATION INTO THE FORMATION PROCESSES OF ALUMINIUM NITRIDE IN THE PLASMA DEPENDING ON THE INCIDENCE ANGLE OF DOUBLE LASER PULSES ONTO THE TARGET OF D16T ALUMINIUM ALLOY IN THE AIR

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

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

^b«Laser Systems and Engineering Group» Co., Nezavisimosti avenue, 67, 220013, Minsk, Republic of Belarus

Corresponding author: zajogin_an@mail.ru

The influence of the incidence angle of double laser pulses on the desired formation of a component and charge composition of the surface laser plasma using the laser spark spectroscopy method has been studied. The formation processes of aluminium nitride under the effect of focused double laser pulses incident at different angles on the surface

Образец цитирования:

Баззал Х., Фадаиян А. Р., Зажогин А. П. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава Д16Т в атмосфере воздуха // Журн. Белорус. гос. ун-та. Физика. 2017. № 1. С. 34–42.

For citation:

Bazzal Kh., Fadaeian A. R., Zajogin A. P. Investigation into the formation processes of aluminium nitride in the plasma depending on the incidence angle of double laser pulses onto the target of D16T aluminium alloy in the air. *J. Belarus. State Univ. Phys.* 2017. No. 1. P. 34–42 (in Russ.).

Авторы:

Ходор Баззал – аспирант кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета. Научный руководитель – А. П. Зажогин.

Ахмад Реза Фадаиян – научный сотрудник.

Анатолий Павлович Зажогин – доктор физико-математических наук; профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета.

Authors:

Khoder Bazzal, postgraduate student at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

bazzal_khoder_88@hotmail.com

Ahmad Reza Fadaeian, researcher.

pcwco@rambler.ru

Anatolij Zajogin, doctor of science (physics and mathematics); professor at the department of laser physics and spectroscopy, faculty of physics.

zajogin_an@mail.ru

of the target of D16T aluminium alloy in the air have been analyzed. It has been demonstrated that there is a possibility to increase both the numbers of aluminium ions with different charges in the surface laser plasma in the ablation mode and of AlN and AlO nanoclusters when a series of double pulses sequentially heat the target at the incidence angle about 75° . The conditions associated with the effects exerted by the laser parameters and by the processes on the target surface and within the plasma on the formation of the desired ionic and molecular compositions of the plasma due to double laser pulses have been considered.

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

Введение

Одними из перспективных материалов, применяемых в микро- и оптоэлектронике в качестве диэлектрической теплоотводящей подложки, являются нитрид алюминия (AlN) и керамические материалы на его основе. AlN имеет большую теплопроводность, сравнимую с теплопроводностью меди и серебра (до $260 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), при высоких значениях электрического сопротивления (до $10^{14} \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Ширина запрещенной зоны у AlN равна примерно $6,2 \text{ эВ}$ [1].

За последнее десятилетие существенно изменились взгляды на роль азота при горении металлов в воздухе и различных видах пламени. Во многих технологиях азот используется в качестве инертного газа, поскольку возбуждение молекулы азота, ослабляющее связь, требует большой энергии. Вместе с тем в работах [2–4] показано, что азот, как окислитель, может конкурировать с кислородом в области температур, при которых происходит горение металлов.

В ряде областей техники не требуются материалы с высокими теплофизическими характеристиками, как у монокристаллов нитрида алюминия, и поэтому могут быть эффективно использованы полифазные нитридосодержащие виды керамики. При производстве керамических подложек в исходную смесь вводят добавки, поскольку AlN не образует жидкой фазы и практически не спекается. Однако все известные добавки ухудшают электрофизические и теплофизические характеристики AlN.

Известные технологии получения AlN энергозатратны, так как необходим длительный нагрев Al_2O_3 в смеси с графитом в потоке азота высокого давления при $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ [3]. Экспериментально показано [4], что синтез нитрида алюминия происходит также при тепловом взрыве нанопорошка алюминия в воздухе, что требует меньших энергетических затрат: энергия расходуется только на инициирование процесса горения. Следует отметить, что механизм формирования AlN при горении нанопорошка алюминия в воздухе и морфология продуктов изучены недостаточно для понимания природы протекающих процессов и управления ими при получении керамических порошков с определенным фазовым составом и морфологией кристаллических фаз.

В настоящее время для получения AlN в виде порошков или в составе тонких пленок и покрытий начинают применяться методы лазерного воздействия на Al в атмосфере активированного азота под давлением [5–7]. Наиболее изучены такие методы активации молекулы азота, как нагревание, ионизирующее излучение, действие катализаторов и электроразряда, а также их сочетания. При тепловой активации молекулярного азота (нагревание до $3000 \text{ }^\circ\text{C}$) степень его диссоциации достигает только $0,1 \%$. Малоэффективны и другие методы активации (КПД процесса не превышает $1\text{--}2 \%$). Все это обуславливает поиск специальных условий взаимодействия N_2 , или активированного азотного комплекса, с металлами и представляет большой практический интерес [2].

Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределений состава лазерного факела возможны на основе дополнительного лазерного воздействия на первичную плазму. В случае использования двухимпульсного лазерного воздействия при различных углах падения на мишень и плазму вместе с проведением высокочувствительного спектрального анализа возможны контроль концентрации возбужденных и заряженных частиц плазмы и управление составом плазмы, направляемой на подложку [8; 9].

Цель настоящей работы – определение роли дополнительного лазерного импульса и изменения угла падения лазерного излучения на поверхность многокомпонентной алюминиевой мишени в воздушной атмосфере в процессе формирования нанокластеров AlN и AlO в лазерной плазме для использования их в технологии получения нанокристаллов и напыления тонких пленок.

Методика эксперимента

Для проведения исследований использовали лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1 (изготовитель – СП «ЛОТИС ТИИ», г. Минск, Беларусь). 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, равным 104 мм. Размер сфокусированного пятна составляет примерно 50 мкм.

Динамика изменения атомного и ионного составов приповерхностной плазмы и образования нанокластеров AlN в глубине кратера исследована при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на пластинку алюминиевого сплава Д16Т толщиной, равной 1 мм, в зависимости от энергии импульса (20–60 мДж), временного интервала между ними (0–20 мкс) и угла падения лазерного излучения на мишень ($90-30^\circ$) при атмосферном давлении. Основные компоненты сплава Д16Т: Al – 91...95 %; Cu – 3,8...4,9 %; Mg – 1,2...1,8 % [10].

Процесс образования AlN изучали по эмиссионным спектрам этой молекулы при воздействии серии одиночных и сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в атмосфере воздуха. Наиболее интенсивной электронно-колебательной полосой в эмиссионных спектрах является полоса с длиной волны, равной 508,05 нм [7; 11].

Результаты эксперимента и их обсуждение

Нами установлено, что наибольшая интенсивность I полос наблюдается при межимпульсном интервале, равном 6–12 мкс. Для интервала 10 мкс изучен процесс образования нанокластеров AlN в зависимости от энергии импульсов. Результаты проведенных исследований представлены на рис. 1.

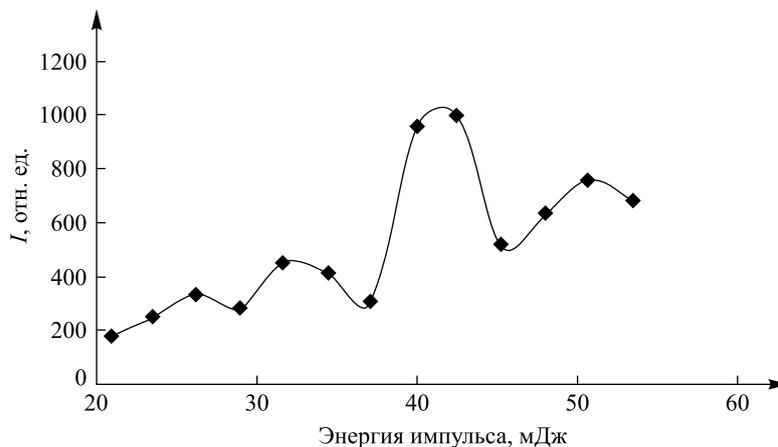


Рис. 1. Зависимость интенсивности полосы AlN в спектрах от энергии импульсов
Fig. 1. The spectral intensity of the band for AlN as a function of the pulse energy

Полученные данные свидетельствуют о том, что процесс образования нанокластеров AlN с возрастанием энергии до 45 мДж увеличивается, достигая максимума при 40–42 мДж, а затем несколько уменьшается. Очевидно, что приведенная плотность энергии оказывает наибольшее влияние в месте воздействия излучения на поверхность.

Для понимания происходящих процессов оценим параметры газовой среды в аблируемом канале, приняв к рассмотрению несколько фаз процесса. Эти фазы включают в себя 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 остывание нагретого газа вблизи аблированной поверхности. При дальнейшем увеличении плотности энергии (после 40 мДж) время образования плотной плазмы, экранирующей процесс взаимодействия излучения с мишенью, быстро сокращается, что приводит к некоторому уменьшению количества продуктов абляции, а значит, и интенсивности полос в спектре при увеличении энергии.

Полученные закономерности использовались при исследовании влияния угла падения излучения и интервала между импульсами на интенсивность полос AlN, AlO и линий ионов N II, Al II и Al III (основные прекурсоры для образования AlN и AlO).

На рис. 2 и 3 приведены зависимости изменения интенсивности полос AlN, AlO и линий ионов N II, Al II и Al III от величины угла падения лазерного излучения на мишень и интервала между импульсами для энергий импульсов излучения 40 и 54 мДж, соответствующих максимумам интенсивности полосы AlN (см. рис. 1).

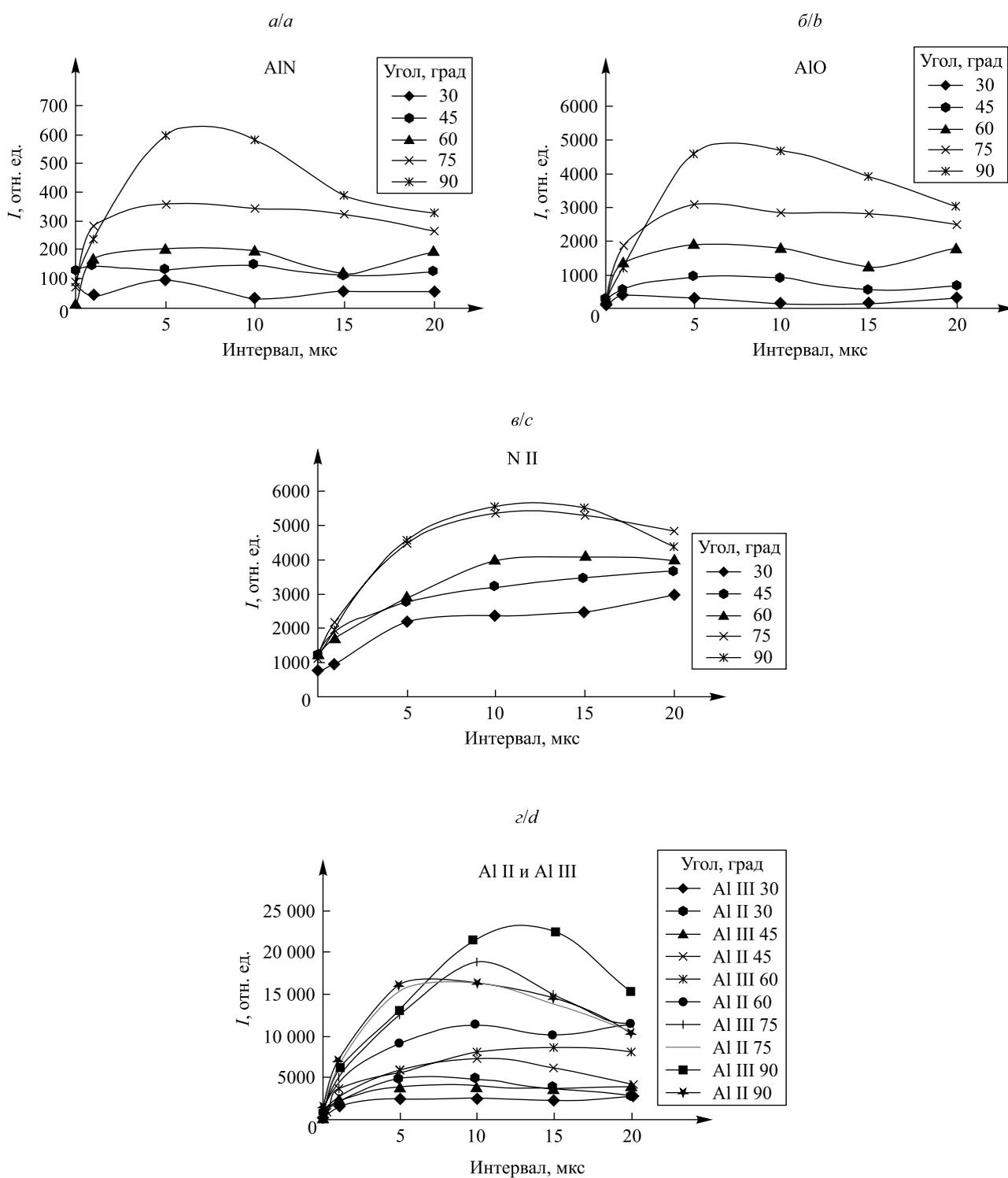


Рис. 2. Зависимость интенсивности полос AlN (508,05 нм) (а); AlO (484,2 нм) (б); линий ионов N II (399,5 нм) (в); Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм) (г) в спектрах от интервала между импульсами и угла падения излучения (энергия импульсов 40 мДж)
Fig. 2. The spectral intensity of the bands for AlN (508.05 nm) (a), AlO (484.2 nm) (b), and of the lines for the ions N II (399.5 nm) (c), Al II (466.3 nm) and Al III (452.92 nm) (d) as a function of the interpulse time and radiation incidence angle at the pulse energy 40 mJ

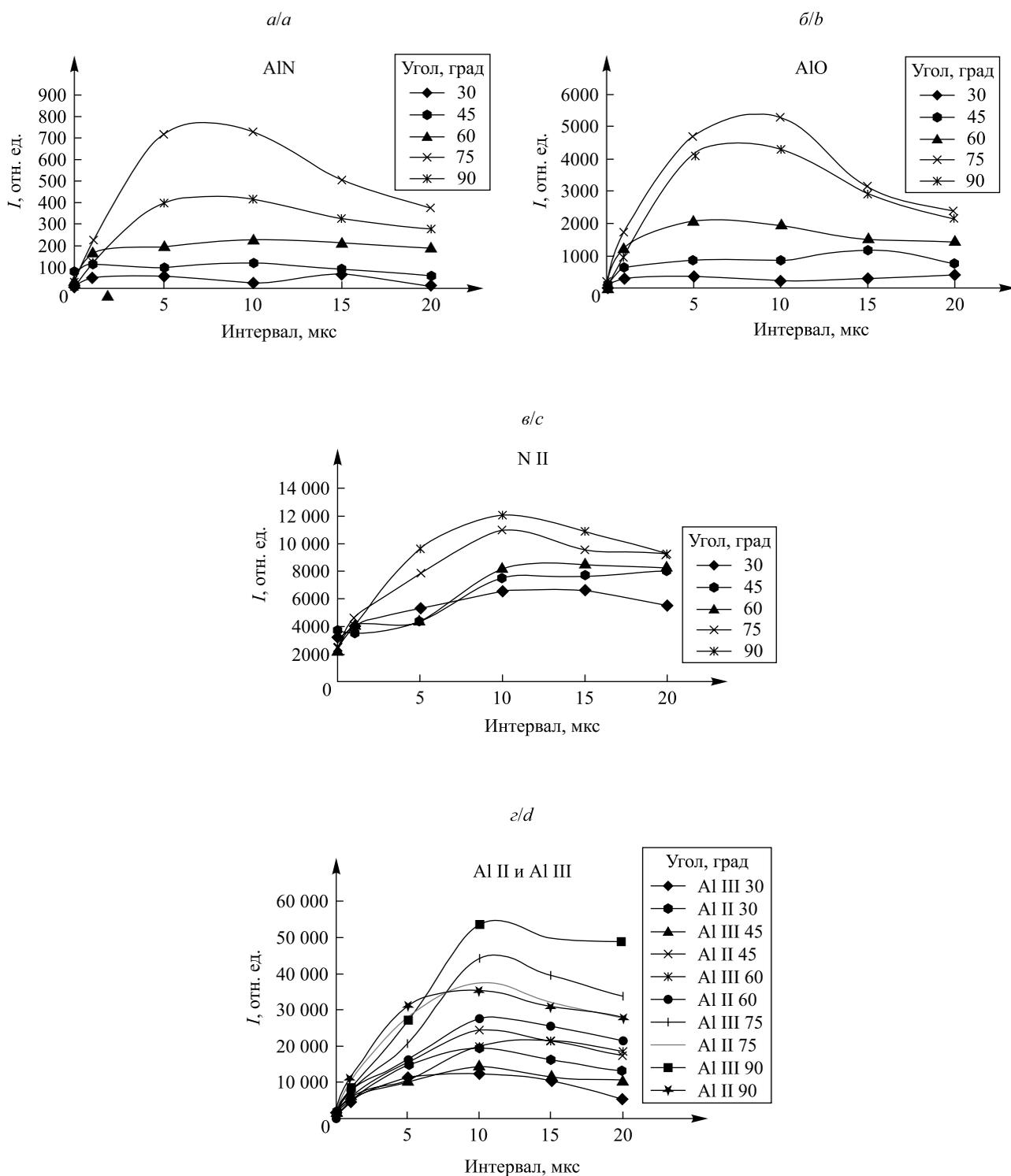


Рис. 3. Зависимость интенсивности полос AIN (508,05 нм) (а); AIO (484,2 нм) (б); линий ионов N II (399,5 нм) (в); Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм) (г) в спектрах от интервала между импульсами и угла падения излучения (энергия импульсов 54 мДж)

Fig. 3. The spectral intensity of the bands for AIN (508.05 nm) (a), AIO (484.2 nm) (b), and of the lines for the ions N II (399.5 nm) (c), Al II (466.3 nm) and Al III (452.92 nm) (d) as a function of the interpulse time and radiation incidence angle at the pulse energy 54 mJ

Оценивая интенсивности полос AlN и AlO, следует отметить, что при энергии импульсов 54 мДж и интервале между ними 5–15 мкс интенсивность этих полос максимальна, когда угол падающих импульсов составляет 75°. При энергии импульсов 40 мДж интенсивность этих полос больше при угле падающих импульсов 90°.

Проведенные исследования и анализ литературных источников [12–17] позволяют представить следующую картину эволюции плазмы. При воздействии одиночного лазерного импульса после испарения материала мишени передним фронтом импульса и образования плазмы при достаточно высоких интенсивностях излучения условия экранировки в плазме выполняются (посредством обратного тормозного поглощения излучения в первоначальном парогазовом облаке) и абляция поверхности прекращается. Вместе с тем быстрое испарение материала мишени приводит к резкому возрастанию давления, что инициирует ударную волну в окружающей атмосфере, на фронте которой происходит поглощение оставшейся части импульса лазерного излучения. В случае одиночного импульса большой плотности (10^9 – 10^{11} Вт/см²) существенная часть его может экранироваться фронтом ударной волны и не проникать в область плазменного ядра. Все это позволяет при лазерной абляции твердого тела в атмосфере выделить три основные области: поверхность мишени, эрозионную плазму, содержащую значительную часть испаренного материала, и плазменную оболочку (фронт ударной волны) [17; 18].

Распределение температуры показывает, что в период воздействия лазерного излучения наиболее горячая область плазмы находится непосредственно у поверхности и имеет относительно невысокую температуру – около 3 эВ [19]. Как было установлено, именно в этой области происходит выделение энергии лазерного излучения. Нагретая область с высокой плотностью, определяемой вылетающим с поверхности паром, приводит к формированию у поверхности зоны высокого давления, превышающего 1000 атм, значительно замедляющего процесс испарения и обуславливающего небольшое число Маха на дозвуковой стадии испарения. Разлет облака идет преимущественно в перпендикулярном направлении от поверхности. После окончания воздействия ($t = 15$ нс) картина в плазме становится существенно иной. Область с максимальными температурой и давлением смещается от поверхности, и разлет плазмы происходит не только в сторону внешних границ, но и к поверхности мишени.

В случае когда на поверхность мишени воздействуют два импульса с некоторым временным интервалом между ними, ситуация еще более усложняется. После первого импульса плазма расширяется, рекомбинирует и электронная плотность резко уменьшается со временем. Второй лазерный импульс проходит через относительно разреженную плазму, поэтому он способен проникать в нее, эффективнее возбуждать продукты абляции (фракталы и кластеры, остающиеся после охлаждения плазмы [20; 21]) и взаимодействовать с поверхностью. Это приводит к увеличению как количества испаренного материала, так и степени его возбуждения и ионизации. Об этом, в частности, свидетельствует тот факт, что при углах падения излучения 90 и 75° интенсивность ионных линий Al III значительно больше, чем Al II. При меньших углах и межимпульсных интервалах интенсивности этих линий меняются на обратный порядок.

Плазма, создаваемая лазерным пучком, сфокусированным на мишень, неоднородна – ее параметры (плотность, температура) изменяются в пространстве. Взаимодействие лазерного излучения с такой неоднородной плазмой характеризуется рядом специфических особенностей. Основным процессом, определяющим коэффициент поглощения света в плазме, является обратнотормозной эффект [22].

Максимальный коэффициент поглощения света в плазме за счет обратнотормозного эффекта достигается в тех областях неоднородностей плазмы, в которых плотность близка к критической [22]. Реальная плазма практически всегда сильно неоднородна – в ней электронная плотность N_e является функцией координаты; для одномерного случая $N_e = N_e(z)$, где z – координата. Падающая на плазму извне световая волна может проникнуть вглубь только до слоя с критической плотностью. Главный вклад в интегральное поглощение дает слой, непосредственно прилегающий к слою с критической плотностью. Его толщина имеет порядок $L_c = \alpha_c^{-1}$, где α – коэффициент поглощения; s – слой.

Еще одним механизмом поглощения энергии световой волны, проявляющимся при наклонном падении света на неоднородную плазму, является так называемый механизм резонансного поглощения [23], которое происходит благодаря линейной трансформации поперечных электромагнитных волн в продольные плазменные. При наклонном падении всегда имеется продольная (вдоль градиента концентрации) компонента электрического поля световой волны. На определенной глубине, где концентрация плазмы близка к критической для падающего электромагнитного поля, происходит резонансное преобразование энергии лазерного излучения в энергию сильно затухающих собственных плазменных колебаний.

Угол падения, при котором резонансное поглощение максимально, можно определить из следующего соотношения [23]:

$$\sin \theta_{\text{опт}} \approx 0,8 \left(\frac{c}{\omega z_c} \right)^{1/3} \approx 0,8 \left(\frac{\lambda}{2\pi z_c} \right)^{1/3},$$

где c – скорость света; ω – круговая частота; λ – длина волны лазерного излучения; z_c – глубина плазмы до слоя критической плотности. Используя значение $\lambda = 1,06$ мкм, можно упростить это выражение:

$$\sin \theta_{\text{опт}} \approx 0,44 z_c^{-1/3}.$$

На основании экспериментальных результатов, приведенных на рис. 3, оценим значения толщины слоя z_c , соответствующего наблюдаемым максимумам интенсивности полос AlO и AlN для угла 75° . Угол θ , равный 15° , является дополнительным к углу 75° , приведенному на рис. 3. Тогда соответствующее значение z_c составит 4,85 мкм. Согласно [23] здесь доля падающего светового потока, поглощаемая плазмой за счет резонансного механизма, может достигать 50 %.

Следует отметить, что в этом случае в отличие от обратнотормозного механизма нет ограничений на максимальную температуру, достижимую в результате лазерного нагрева плазмы [22; 23]. Резонансное поглощение является основным механизмом нагрева горячей плазмы, в которой обратнотормозное поглощение уже несущественно до температуры в миллионы градусов.

Перенос энергии в глубь плазменного факела может приводить к увеличению абляционной плотности по сравнению с критической. Перенос энергии со скоростью, превышающей скорость переноса гидродинамических возмущений, может осуществляться быстрыми электронами, которые образуются при резонансном поглощении лазерного излучения и собственным излучением плазмы.

В нашем случае измеряемая величина – интенсивность спектральной линии – связана с плотностью пара исследуемого элемента, поэтому желательно создать условия, в какой-то мере стабилизирующие параметры пара.

Одним из возможных методов влияния на темп остывания и скорость изменения плотности пара является создание среды, в которой происходило бы расширение испарившегося вещества. За счет взаимодействия пара с молекулами газа уменьшится скорость расширения пара, т. е. роль адиабатического охлаждения ослабнет. Кроме того, произойдет термализация кинетической энергии частиц вещества мишени, на которую приходится большая часть (до 70 %) поглощенной энергии лазерного излучения [22; 23]. Этот процесс можно рассматривать как источник нагрева расширяющегося вещества, действие которого увеличивает время жизни горячих паров. С другой стороны, при расширении пара в среде какого-либо газа возникают механизмы охлаждения пара за счет столкновения второго рода атомов пара с молекулами среды. Следовательно, скорости остывания пара и изменения его плотности за счет расширения и конденсации в значительной мере определяются величиной давления и составом среды, в которой происходит испарение конденсированного вещества лазерным излучением. Размер частиц конденсата зависит от состава и давления газа, окружающего мишень.

Заключение

Таким образом, выполненные спектроскопические исследования характеристик приповерхностной лазерной плазмы, образуемой вблизи поверхности многокомпонентной мишени при воздействии двух последовательных импульсов на ее поверхность, показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы. Определены временные интервалы между импульсами (5–15 мкс), а также энергии и параметры расфокусировки излучения, обеспечивающие возможность получения необходимых концентраций одно- или двукратно ионизированных атомов алюминия для формирования нанокластеров AlN. Показано, что последовательное воздействие на мишень серии сдвоенных лазерных импульсов с временным интервалом между ними 5–15 мкс под определенными углом и энергией приводит к существенному увеличению поступления в плазму радикалов как AlO, так и AlN.

Показана возможность контроля и управления характеристиками плазмы при получении необходимых концентраций радикалов AlO и AlN в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на поверхность алюминиевых сплавов в процессе получения нанокластеров и пленок.

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

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

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.
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.
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. Stat. Sol. 2005. Vol. 2, № 7. P. 2079–2082.
6. Optical emission spectroscopy of Aluminum Nitride thin films deposited by Pulsed Laser Deposition / J. A. Perez [et al.] // J. Phys.: Conf. Ser. 2014. Vol. 511. P. 1–6.
7. Emission and mass spectral analyses of laser ablated AlN plumes / Jin-hai Chen [et al.] // Chin. Phys. B. 1999. Vol. 8, № 3. P. 223–228.
8. Сухов Л. Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск, 1990.
9. Фадаян А. Р., Зажогин А. П. Эффекты низкогопорогового пробоя металлов одиночными и двоянными лазерными импульсами // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2009. № 2. С. 12–14.
10. Материалы в приборостроении и автоматике / под ред. Ю. М. Пятина. М., 1969.
11. Simmons J. D., McDonald J. K. The Emission Spectrum of AlN // J. Mol. Spectrosc. 1972. Vol. 41, № 3. P. 584–594.
12. Изменение ионизационного состояния приповерхностной лазерно-индуцированной плазмы алюминия в двухимпульсных режимах абляции / В. С. Бураков [и др.] // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 12. С. 1065–1071.
13. Импульсное лазерное напыление твердого углеродного покрытия при атмосферном давлении / Т. В. Кононенко [и др.] // Квантовая электроника. 2003. Т. 33, № 3. С. 189–196.
14. Зажогин А. П., Фадаян А. Р. Динамика процессов абляции и развития приповерхностной лазерной плазмы сплавов алюминия двоянными лазерными импульсами // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. 2008. № 3. С. 15–18.
15. Исследование процессов формирования наночастиц и фракталов при лазерном напылении многоэлементных тонких пленок на поверхность Al₂O₃ двоянными лазерными импульсами / Е. С. Воропай [и др.] // НАНО-2009 : материалы III Всерос. конф. по наноматериалам (Екатеринбург, 20–24 апр. 2009 г.). Екатеринбург, 2009. С. 245–248.
16. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? / Annemie Bogaerts [et al.] // Spectrochimica Acta. Part B. 2003. Vol. 58. P. 1867–1893.
17. Регистрация аномального самообращения эмиссионных линий в лазерной плазме, генерируемой на поверхности твердых мишеней в нормальной атмосфере / О. А. Букин [и др.] // Квантовая электроника. 1997. Т. 24, № 8. С. 725–726.
18. Биберман Л. М., Мицаканян А. Х., Якубов И. Т. Ионизационная релаксация за сильными ударными волнами в газах // УФН. 1970. Т. 102, вып. 3. С. 430–462.
19. Мажужин В. И., Носов В. В. Поверхностное испарение алюминиевой мишени в вакууме при воздействии лазерного УФ-излучения в условиях образования плазмы // Квантовая электроника. 2005. Т. 35, № 5. С. 454–466.
20. Особенности формирования плазменного факела при гибридной лазерно-дуговой сварке / Г. А. Туричин [и др.] // Теплофизика высоких температур. 2006. Т. 44, № 5. С. 655–663.
21. Гафнер С. Л., Гафнер Ю. Я. Анализ процессов конденсации наночастиц Ni из газовой фазы // ЖЭТФ. 2008. Т. 134, вып. 4. С. 831–844.
22. Коротеев Н. И., Шумай И. Л. Физика мощного лазерного излучения. М., 1991.
23. Дюдерштадт Дж., Мозес Г. Инерциальный термоядерный синтез. М., 1984.

REFERENCES

1. Nevolin V. K., Tsarik K. A. Formirovanie i issledovanie nanogeterostruktur AlGaIn/GaN s primeneniem atomno-silovoi mikroskopii [The formation and study of AlGaIn/GaN nanoheterostructures with the use of atomic force microscopy]. *Izv. vuzov. Elektronika*. 2009. No. 6. P. 44–49 (in Russ.).
2. Il'in A. P., Root L. O. K voprosu o mekhanizme vysokotemperaturnogo khimicheskogo svyazyvaniya azota vozdukha [On the mechanism of high-temperature chemical bonding of nitrogen from the ambient air]. *Vestnik nauki Sibiri. Ser. 3, Khimiya*. 2011. No. 1 (1). P. 91–96 (in Russ.).
3. Gromov A. A., Khabas T. A., Ilyin A. P. Gorenienie nanoporoshkov metallov [Burning of metal nanopowders]. Ed. by A. A. Gromov. Tomsk, 2008 (in Russ.).
4. Il'in A. P., Gromov A. A. Gorenienie alyuminiya i bora v sverkhthonkom sostoyanii [Burning of aluminum and boron in hyperfine state]. Tomsk, 2002 (in Russ.).
5. Tharea R. K., Sharma A. K. Formation of AlN in laser ablated plasma of Al in nitrogen ambient. *Phys. Stat. Sol.* 2005. Vol. 2, No. 7. P. 2079–2082.
6. Perez J. A., Vera I. P., Riascos H., et al. Optical emission spectroscopy of Aluminum Nitride thin films deposited by Pulsed Laser Deposition. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. Vol. 511. P. 1–6.
7. Chen Jin-hai, Wang Pei-man, Guo Zhao, et al. Emission and mass spectral analyses of laser ablated AlN plumes. *Chin. Phys. B*. 1999. Vol. 8, No. 3. P. 223–228.
8. Sukhov L. T. Lazernyi spektral'nyi analiz [Laser spectral analysis]. Novosibirsk, 1990 (in Russ.).
9. Fadaiyan A. R., Zazhugin A. P. The effects of low-threshold breakdown of metals by single and double laser pulses. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2009. No. 2. P. 12–14 (in Russ.).
10. Materialy v priborostroenii i avtomatike [Materials in instrument-making industry and automatics]. Ed. by Yu. M. Pyatina. Mosc., 1969 (in Russ.).
11. Simmons J. D., McDonald J. K. The Emission Spectrum of AlN. *J. Mol. Spectrosc.* 1972. Vol. 41, No. 3. P. 584–594.

12. Burakov V. S., Bohanov A. F., Nedel'ko M. I., et al. Izmenenie ionizacionnogo sostojanija pripoverhnostnoj lazerno-inducirovannoj plazmy aljuminija v dvuhimpul'snyh rezhimah abljacii [Change in the ionisation state of a near-surface laser-produced aluminium plasma in double-pulse ablation modes]. *Kvant. electron.* 2003. Vol. 33, No. 12. P. 1065–1071 (in Russ.).
13. Kononenko T. V., Konov V. I., Lubnin E. N., et al. Impul'snoe lazernoe napylenie tverdogo uglernogo pokrytija pri atmosfernom davlenii [Pulsed laser deposition of solid carbonic coatings under atmospheric pressure]. *Kvant. electron.* 2003. Vol. 33, No. 3. P. 189–196 (in Russ.).
14. Zajogin A. P., Fadaeian A. R. Dynamics of ablation processes and evolution of the surface plasma of aluminum alloys generated by double laser pulses. *Vestnik BGU. Ser. 1, Fiz. Mat. Inform.* 2008. No. 3. P. 15–18 (in Russ.).
15. Voropaj E. S., Fadaijan A. R., Ermalickaja K. F., et al. Issledovanie processov formirovanija nanochastich i fraktalov pri lazernom napylenii mnogojelementnyh tonkih plenok na poverhnost' Al_2O_3 sdvoennymi lazernymi impul'sami. *NANO-2009 : materialy III Vseross. konf. po nanomaterialam* (Yekaterinburg, 20–24 April 2009). Yekaterinburg, 2009. P. 245–248 (in Russ.).
16. Annemie Bogaerts, Zhaoyang Chen, Renaat Gijbels, et al. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? *Spectrochimica Acta. Part B.* 2003. Vol. 58. P. 1867–1893.
17. Bukin O. A., Sviridenkov Je. A., Sushilov N. V., et al. Detection of anomalous self-reversal of emission lines of a laser plasma formed on the surface of a solid target in a normal atmosphere. *Kvant. electron.* 1997. Vol. 24, No. 8. P. 725–726 (in Russ.).
18. Biberman L. M., Miacakanjai A. X., Jakubov I. T. Ionizacionnaja relaksacija za sil'nymi udarnymi volnami v gazah [Surface evaporation of aluminum target in vacuum under the effect of UV laser radiation in the plasma formation conditions]. *Usp. fiz. nauk.* 1970. Vol. 102, issue 3. P. 430–462 (in Russ.).
19. Mazhukin V. I., Nosov V. V. Plasma-mediated surface evaporation of an aluminium target in vacuum under UV laser irradiation. *Kvant. electron.* 2005. Vol. 35, No. 5. P. 454–466 (in Russ.).
20. Turichin G. A., Grigor'ev A. M., Zemljakov E. V., et al. Osobennosti formirovanija plazmennogo fakela pri gibridnoj lazernodugovoj svarke [Special features of formation of plasma torch under conditions of hybrid laser-arc welding]. *Teplofiz. vysok. temperatur.* 2006. Vol. 44, No. 5. P. 655–663 (in Russ.).
21. Gafner S. L., Gafner Yu. Ya. Analiz processov kondensacii nanochastich Ni iz gazovoj fazy [Analysis of gas-phase condensation of nickel nanoparticles]. *JETP.* 2008. Vol. 134, issue 4. P. 831–844 (in Russ.).
22. Koroteev N. I., Shumai I. L. Fizika moshchnogo lazernogo izlucheniya [Physics of high-power laser radiation]. Mosc., 1991 (in Russ.).
23. Dyudershtadt Dzh., Mozes G. Inertsial'nyi termoyadernyi sintez [Inertial thermonuclear fusion]. Mosc., 1984 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.06.2016.
Received by editorial board 22.06.2016.