

8. Seyidov, M.-H.Yu Пирозэлектрические свойства и дефекты структуры слоистого кристалла $TlInS_2$, легированного лантаном / M.-H.Yu Seyidov, A.П. Одринский, R. A. Suleymanov, E. Asar, T.Г Мамедов, В.Б.Алиева // ФТТ. – 2014.– Т. 56, №10. – С. 1964–1969.
9. Одринский, А.П. Фотоэлектрическая активность структурных дефектов монокристалла сегнетоэлектрика-полупроводника $TlInS_2:La$ / А.П.Одринский, Т.Г. Мамедов, М.Н.Ю. Seyidov, В.Б. Алиева // ФТТ. – 2014. – Т. 56, №8. – С. 1554–1558.
10. Одринский, А.П. Эффект модификации вклада термоэмиссии локализованных зарядов в релаксацию фотоотклика монокристалла $TlGaSe_2$. / ФТТ. – 2020. – Т. 62, №4. – С. 596–602.
11. Одринский, А.П. Параметрический резонанс и фотогальванические токи в слоистом кристалле $TlGaSe_2$ / А.П. Одринский, М.-Н.Ю. Seyidov, Т.Г. Мамедов, В.Б. Алиева // ФТТ. – 2017. – Т. 59, № 3. – С. 447–452.
12. Grivickas, V. Carrier dynamics in highly excited $TlInS_2$: evidence of 2D electron–hole charge separation at parallel layers. /V. Grivickas, P. Scajev, V. Bikbajevs, O.V. Korolik and, A.V. Mazanik. // Phys. Chem. Chem. Phys. – 2019. – V. 21. – P. 2102–2114.

ДИНАМИКА ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ ВОЗДЕЙСТВИЕМ НА АЛЮМИНИЕВУЮ ПОВЕРХНОСТЬ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

М. П. Патапович¹, А. П. Зажогин², В. А. Акулич¹, М. А. Малец¹

¹⁾ Учреждение Образования «Белорусская государственная академия связи»,
ул. Ф.Скорины, 8/2, 220076 Минск, Беларусь, e-mail: mpetpat@mail.ru

²⁾ Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь

Импульсное лазерное напыление может быть использовано для формирования тонкопленочных структур и покрытий из самых различных металлов. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Установлено, что увеличение числа импульсов в серии обеспечивает рост концентрации оксида алюминия (AlO) за счет сверхзвукового расширения турбулентного перемешивания газа, содержащего ионы алюминия. Выявлено, что воздействие последовательности серий сдвоенных лазерных импульсов, сдвинутых относительно друг друга, на поверхность алюминиевой мишени, обеспечивает увеличение количества ионов алюминия в лазерной плазме. Определены оптимальные параметры возбуждающих импульсов при эффективной расфокусировке и угле падения излучения на мишень. Разработанные методики повышения выхода нанокластеров при предварительном оксидировании поверхности алюминия можно использовать при получении высокоактивных нанопорошков.

Ключевые слова: атомно-эмиссионная спектрометрия; сдвоенные лазерные импульсы; оксид алюминия; лазерная абляция; наноконструкции; тонкие пленки.

DYNAMICS OF ALUMINUM OXIDE FORMATION BY EXPOSURE ON ALUMINUM SURFACE LASER PULSES

M. P. Patapovich¹, A. P. Zazhogin², V. A. Akulich¹, M. A. Malets¹

¹⁾ Belarusian State Academy of Communications, st. F. Skarina, 8/2,
220076 Minsk, Belarus, e-mail: mpetpat@mail.ru

²⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus
Corresponding author: M. P. Patapovich (mpetpat@mail.ru)

Pulsed laser deposition can be used to form thin-film structures and coatings from a wide variety of metals. The experiments were performed using laser double-pulse atomic emission spectrometer LSS-1. It has been found, that an increase in the number of pulses in a series results in growth of concentration of aluminum oxide (AlO) forming due to supersonic expansion and turbulent mixing of the gas containing aluminum. It was found, that the effect of a series of double laser pulses on the surface of a metal target leads to the increased numbers of aluminum in the laser plasma. The optimum parameters of the exciting pulses are determined for effective defocusing and the angle of incidence of the radiation on the target. The developed techniques for increasing the yield of nanoclusters during preliminary oxidation of the aluminum surface can be used to obtain highly active nanopowders.

Key words: atomic-emission spectrometry; double laser pulses; aluminum oxide; laser ablation; nanocomplexes; thin films.

ВВЕДЕНИЕ

Нанопорошковые технологии являются одними из самых распространенных направлений в нанотехнологиях. Получаемые таким способом материалы находят применение в электронике, медицине, биологии, химическом катализе и других областях науки и техники, а также используются для конструирования объемных изделий. Развитие методов синтеза наночастиц с требуемыми свойствами (нужным размером, формой, химическим составом и структурой) является очень важной практической задачей [1].

Импульсное лазерное напыление широко используется для формирования тонкопленочных структур и покрытий из самых различных материалов. Однако, физические процессы, связанные с образованием приповерхностной лазерной плазмы настолько многофакторные, что получить простые закономерности, описывающие данные процессы, не всегда удается. Анализ и целенаправленное изменение компонентного, зарядового и энергетического распределения состава лазерного факела возможно на основе дополнительного лазерного воздействия [2–5].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использование метода лазерной абляции со сдвоенными лазерными импульсами позволяет целенаправленно влиять на компонентный и зарядовый состав потока лазерной плазмы. Ряд вопросов, возникающих при создании оптимальных условий для проведения исследований поверхности металлов, можно эффективно решить с помощью лазерного многоканального атомно-эмиссионного спектрометра LSS-1. Спектрометр включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемым временным интервалом между импульсами. Лазер обладает широкими возможностями как для регулировки энергии импульсов (от 10 до 80 мДж), так и временного интервала между импульсами (от 0 до 100 мкс) и может работать с частотой повторения импульсов до 10 Гц на длине волны 1064 нм. Длительность импульсов составляет 15 нс. Размер сфокусированного пятна равен примерно 50 мкм.

Прибор позволяет определять более семидесяти химических элементов, проводить математическую обработку результатов анализа и, кроме того, получать микрофотографию поверхности образца [1].

Для выбора оптимальных условий проведения эксперимента были зарегистрированы спектры при различных энергиях импульсов и временных междуимпульсных интервалах и проведены оценки влияния данных параметров на интенсивность линий химических элементов [6].

Была изучена динамика изменения атомного и ионного состава приповерхностной плазмы и образования нанокластеров оксида алюминия в приповерхностной лазерной плазме в зависимости от изменения временного интервала между ними. Двухимпульсное лазерное излучение фокусировали на пластинку толщиной 1 мм алюминиевого сплава Д16Т с помощью ахроматического конденсора. Образование продуктов взаимодействия атомов алюминия с кислородом (AlO) изучено по наиболее интенсивной электронно-колебательной полосе радикала AlO (484,21 нм). На рис. 1 приведена зависимость интенсивности линий оксида алюминия от интервала времени между первым и вторым импульсом (а), а также зависимость интенсивности линии данного компонента от энергии лазерных импульсов (б). Число последовательных сдвоенных импульсов в серии составило 40, а размер пятна повреждения равнялся примерно 120 мкм.

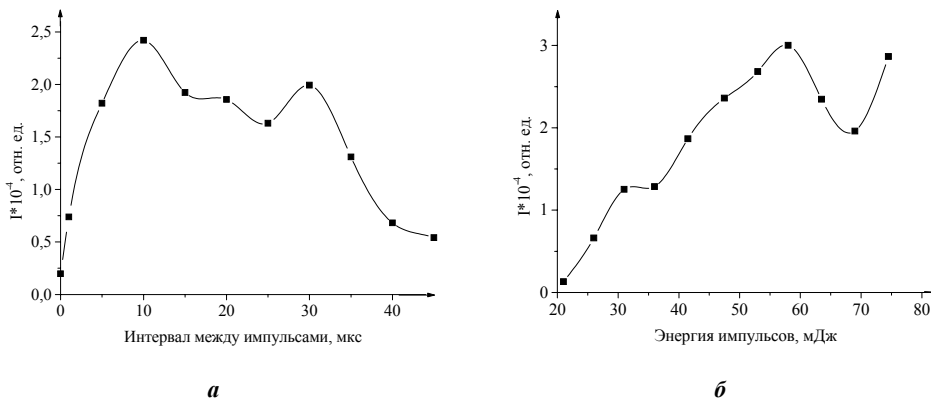


Рисунок 1. – Зависимость интенсивности линии оксида алюминия от интервала между импульсами (а) и энергии импульсов (б)

Кроме того, была оценена динамика пробоя по поступлению компонентов мишени в плазму при воздействии серий из 120 сдвоенных лазерных импульсов на точку и параметры, относящиеся к лазерной абляции образцов Д16Т последовательно сдвоенных лазерных импульсов при образовании кластеров оксида алюминия. Временной интервал между сдвоенными импульсами составил 10 мкс, энергия импульсов находилась в интервале 30–80 мДж. Размер точки фокусировки равнялся 50 мкм при фокусном расстоянии ахроматического объектива 104 мм. Дополнительно было изучено образование ионов алюминия по линиям Al II (466,3 нм) и Al III (452,92 нм).

На рис. 2 в качестве примера приведена зависимость интенсивности линии исследуемой компоненты плазмы от числа сдвоенных лазерных импульсов при средней энергии импульсов порядка 49 мДж и задержкой между сдвоенными импульсами 10 мкс.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Из приведенных данных видно, что наиболее существенное образование комплексов AlO наблюдается при воздействии на образец второго импульса при задержке порядка 1–40 мкс. При большей задержке интенсивность линий в плазме падает, скорость об-

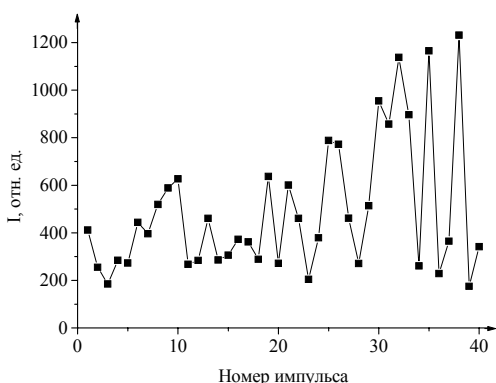


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности линии оксида алюминия в последовательных послых спектрах

нулевом и малом временном интервале между импульсами скорость образования продуктов очень мала; при большом времени задержки эффект воздействия второго импульса ослабляется.

Максимальное образование молекул AlO соответствует энергии 45–65 мДж. Дальнейшее увеличение энергии импульсов приводит к замедлению скорости роста, интенсивность полосы оксида алюминия даже несколько уменьшается, что, может свидетельствовать об изменении процесса их образования.

Кроме того, скорость образования оксида алюминия значительно зависит от номера импульса. Можно отметить корреляционную связь между интенсивностью линии Al III и полосы AlO. При падении интенсивности линии алюминия Al III в 2–4 раза примерно с 10 импульса, одновременно практически во столько же раз увеличилась интенсивность полосы AlO.

Имеют место резкие изменения интенсивности линий компонентов в спектрах испускания плазмы. При этом наибольшая интенсивность линий оксида алюминия и ионов алюминия наблюдается в интервале 15–45 импульсов. При меньшем числе импульсов (менее 10) образование продуктов уменьшается. Наличие конденсированной фазы в плазменном факеле оказывает значительное влияние на кинетические процессы, протекающие в плазме, и, следовательно, на характеристики самой плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследования, проведенные с помощью метода лазерной атомно-эмиссионной многоканальной спектрометрии, показали возможность контроля и управления характеристиками плазмы, а также возможность получить необходимые концентрации молекул оксида алюминия в расширяющейся плазме. На примере синтеза тонкопленочных оксидных покрытий оценены возможности использования высокоинтенсивных сдвоенных лазерных импульсов для технологии лазерного напыления тонких пленок на стекло непосредственно в воздухе. Следовательно, показанные возможности и преимущества использования сдвоенных лазерных импульсов при получении наноконплексов и пленок оксида алюминия можно использовать и

разования продуктов уменьшается примерно в 5 раз. Так как время жизни возбужденных состояний молекулы оксида ал по отношению к излучению составляет около 100 нс, то присутствие излучения в течении нескольких микросекунд можно связать с образованием электронно-возбужденных молекул AlO.

При увеличении интервала между сдвоенными лазерными аблирующими импульсами низкопороговый пробой на частицах возникает все реже и восстанавливается высокая «оптическая прочность» чистого воздуха. Это связано с удалением или оседанием частиц [2, 6]. При

для других соединений, в частности, нитридов металлов, перспективных для создания на их основе электронных и оптоэлектронных приборов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Атомно-эмиссионный многоканальный спектральный анализ: научное и практическое применение / Е. С. Воропай [и др.] // Вестн. Бел. гос. ун-та. – 2009. – Сер. 1, № 1. – С. 14–20.
2. Laser ablation for analytical sampling: what can we learn from modeling? / A. Bogaerts [et al.] // Spectrochimica Acta, Part B : Atomic Spectroscopy. – 2003. – Vol. 58, № 11. – P. 1867–1893.
3. Laser-induced vaporization of a metal surface / M. Aden [et al.] // J. of Physics. D, Appl. Physics. – 1992. – Vol. 25, № 1. – P. 57–65.
4. Сухов, Л. Т. Лазерный спектральный анализ: физические принципы / Л. Т. Сухов ; отв. ред. В. Ф. Шабанов. – Новосибирск : Наука, 1990. – 139 с.
5. Материалы в приборостроении и автоматике : справочник / Ю. М. Пятин [и др.] ; под ред. Ю. М. Пятина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1982. – 528 с.
6. Чинь, Н. Х. Спектральный контроль и управление процессами образования кластеров нитридов алюминия в плазме при воздействии на алюминий сериями сдвоенных лазерных импульсов / Н. Х. Чинь, А. Р. Фадаиян, А. П. Забогин // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов : межвуз. сб. науч. тр. / под общей ред. В. М. Самсонова, Н. Ю. Сдобнякова ; Тверской гос. ун-тет. – Тверь, 2011. – Вып. 3. – С. 259–263.

ФОРМИРОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ С ДИОДАМИ ШОТТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

**Я. А. Соловьёв, В. А. Солодуха, В. А. Пилипенко,
Д. В. Жигулин, Е. С. Ацецкая, О. Э. Сарычев**

*ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца И.П., 121А, Минск, Беларусь,
e-mail: jsolovjov@integral.by*

При быстрой термообработке пленок никеля, платины и сплава никель-платина-ванадий некогерентным световым потоком в режиме теплового баланса в диапазоне температур от 400 до 550 °С получены барьеры Шоттки высотой 0,63, 0,71 и 0,82 В. Это обеспечивает работоспособность диодов Шоттки при верхней границе диапазона температур окружающей среды от +125 до +175 °С.

Ключевые слова: диод Шоттки; силицид никеля; силицид платины; быстрая термообработка.

FORMATION OF SEMICONDUCTOR DEVICES WITH SCHOTTKY DIODES USING RAPID THERMAL TREATMENT

**Ja. A. Solovjov, V. A. Solodukha, V. A. Pilipenko,
D. V. Zhygulin, E. S. Atsetsckaya, O. E. Sarychev**

*JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company 121 A, Kazintsya I.P. Str.,
Minsk, 220108, Belarus
Corresponding author: Ja. A. Solovjov (jsolovjov@integral.by)*