

жженных дефектов, так и времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации в исследуемых образцах;

– при  $T_{\text{отжига}} = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  в образце ДНА проявляются парамагнитные центры с  $g$ -фактором, равным 2,00245, и временами парамагнитной релаксации  $T_2 = 1,56 \cdot 10^{-5}$  с и  $T_1 = 8,38 \cdot 10^{-8}$  с, которые близки к  $P1$  центру в синтетическом алмазе, природа которого обусловлена атомом азота, замещающего атом углерода в узле решетки. Это косвенно доказывает наличие парамагнитного азота в нанокристаллах алмаза.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Reina G. Chemical functionalization of nanodiamonds: Opportunities and challenges ahead / G. Reina, L. Zhao, A. Bianco, N. Komatsu // *Angew. Chem.Int. Ed.* 58 (2019) 17918–17929..
2. Zhang, B. Analytical strategies for characterizing the surface chemistry of nanoparticles / B. Zhang, V. Yan// *Anal. Bioanal. Chem.* 396 (2010) 973–982.
3. Воробьев А.Е., Наноалмазы. Монография. / А.Е.Воробьев, К.А. Воробьев, Наноалмазы. Монография. Мир науки, 2018. – с.125.
4. Рычкова С.А. "Физико-химические закономерности сорбции полярных органических соединений различных классов на пористом микродисперсном детонационном наноалмазе: диссертация .. кандидата химических наук : 02.00.04 Москва 2016".
5. Yajuan Zou Organic chemistry for nanodiamond: Controlled functionalization, quantitative characterization and structure-property relationships / Yajuan Zou , Masahiro Nishikawa and Naoki Komatsu / *Carbon Reports* . Vol. 1 No. 2 2022. – P. 70–78.
6. Плотников В.А., Сорбционные и десорбционные свойства детонационного наноалмаза./ В.А. Плотников [и др.]. – Изв. вузов. Химия и хим. технология. Т. 60. Вып. 9, 2017.. – с. 28-30.
7. Долматов В.Ю., Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение, Успехи химии №76(5), 2007, С. 377–379.

### ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ НАПЫЛЕНИЯ НАНОПЛЕНОК ОЛОВА С ПОМОЩЬЮ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ

М. П. Патапович<sup>1</sup>, Н. Х. Чинь<sup>2</sup>, М. А. Малец<sup>1</sup>, Н. А. Лапцевич<sup>1</sup>

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

<sup>2)</sup> Vinh University, Vinh, Vietnam

Изучена возможность напыления нанопленок, содержащих в своем составе олово, на различных видах поверхностей (металл, стекло) при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень в атмосфере воздуха. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. Достоинствами импульсного лазерного напыления как метода получения кластеров, фракталов являются: универсальность по отношению к материалу, возможность исключения посторонних примесей, гибкость метода, возможность контроля образования пленочных структур.

Выполненные спектроскопические исследования лазерной плазмы, образованной при воздействии двух последовательных импульсов на мишень, иллюстрируют развитие методов получения нанокластеров различных химических элементов. Данным способом можно получать нанопленки не только чистых металлов, но и композици-

онных сплавов. Показана возможность напыления нанопленок для создания газочувствительных сенсоров.

**Ключевые слова:** атомно-эмиссионная спектрометрия; сдвоенные лазерные импульсы; лазерная плазма; лазерная абляция; наноконплексы; напыление тонких пленок.

## STUDYING THE POSSIBILITY OF DEPOSITION OF TIN NANOFILMS USING DOUBLE LASER PULSES

M. P. Patapovich<sup>1</sup>, N. H. Trinh<sup>2</sup>, M. A. Malets<sup>1</sup>, N. A. Laptsevich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State Academy of Communications, st. F. Skarina, 8/2, 220076, Minsk, Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus*

*Corresponding author: M. P. Patapovich (mpetpat@mail.ru)*

The possibility of deposition of nanofilms containing tin in their composition on various types of surfaces (metal, glass) under the action of dual laser pulses on a target in an air atmosphere has been studied. The experiments were carried out using a laser two-pulse multichannel atomic emission spectrometer LSS-1. The advantages of pulsed laser deposition as a method for producing clusters and fractals are: versatility in relation to the material, the ability to exclude impurities, the flexibility of the method, and the ability to control the formation of film structures.

The performed spectroscopic studies of laser plasma formed by the action of two successive pulses on a target illustrate the development of methods for obtaining nanoclusters of various chemical elements. This method can be used to obtain nanofilms of not only pure metals, but also composite alloys. The possibility of obtaining nanofilms for creating-gas-sensitive sensors is shown.

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

### ВВЕДЕНИЕ

Для создания материалов, обладающих уникальными свойствами, необходимо изучить особенности в них входящих металлов и соединений, например, медь и ее сплавы (латуни, бронзы), оксиды полупроводниковых материалов [1]. В частности, оксид цинка привлекает внимание исследователей в связи с обширной сферой возможных применений, так как материалы на его основе могут быть использованы в качестве компонентов газовых сенсоров, катализаторов, люминесцентных материалов, светоизлучающих диодов [2–4]. Кроме того, оксиды полупроводниковых материалов характеризуются рядом уникальных свойств, таких как высокая чувствительность к составу газовой фазы, каталитическая активность, высокая реакционная способность поверхности. Создать тонкие слои оксида цинка можно с помощью как физических, так и химических методов. Латуни, имеющие двухкомпонентную основу, широко применяются в промышленности, причем используются в основном многокомпонентные латуни, в которых содержатся так называемые «третьи» элементы, существенно изменяющие характеристики исходного сплава [1].

Что касается олова, то его применение имеет несколько основных направлений. Например, благодаря своей нетоксичности и стойкости к коррозии в среде органических солей и кислот, данный металл получил распространение в пищевой промыш-

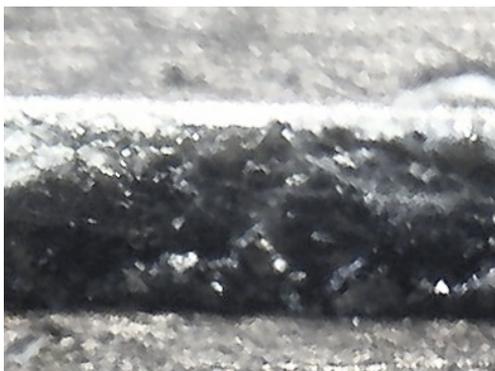
ленности. Его можно нанести в виде покрытия на различные изделия, имеющие контакт с продуктами питания. Так как олово защищает медь от негативного действия серы, содержащейся в резиновой изоляции, им покрывают медные жилы проводов. Наконец, для соединения элементов в производстве электронных приборов применяется пайка, и олово используется в качестве припоя. К тому же, олово является составляющей большого количества сплавов с медью, цинком, сурьмой. Этот металл также входит в состав нанопленок, которые требуются для развития микроэлектроники. Поэтому изучение способов формирования стабильных наноструктур имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

Одним из основных инструментов современных технологий, который расширяет круг материалов, позволяющих совершенствовать устройства квантовой электроники, является техника импульсного лазерного напыления. Достоинствам данного метода можно считать: его универсальность по отношению к материалу, возможность исключить наличие посторонних примесей, гибкость метода, возможность контроля роста пленочных структур [1–4]. Так как частицы в лазерной плазме обладают высокой энергией, то температура кристаллизации пленок оказывается ниже по сравнению с другими методами, вследствие чего существенно упрощается технология введения легирующих добавок.

Развитие технологии импульсного лазерного напыления невозможно без разработки новых методик. Кроме того, большое практическое значение имеют физические способы получения многокомпонентных порошков. В этом случае образование частиц происходит в неравновесных условиях, когда сдвоенные лазерные импульсы, характеризующиеся высокими давлением и температурой, воздействуют на сплавы, содержащие в себе различные соединения металлов.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Метод двухимпульсного лазерного воздействия на мишень при различных параметрах проведения эксперимента (энергии накачки, параметра расфокусировки) позволяет одновременно как проводить спектральный анализ, так и управлять составом плазмы [5–6], направляемой на подложку. Характер данного метода даёт более высокую плотность частиц в факеле, что позволяет равномернее напылять необходимые нанопленки.



**Изображение нанопленки олова на металлической поверхности**

Применяемый в работе подход основан на использовании сдвоенных лазерных импульсов для распыления мишеней, содержащих требуемые металлы.

Для проведения исследований использовался лазерный многоканальный атомно-эмиссионный спектрометр LSS-1, который включает в себя в качестве источника возбуждения плазмы двухимпульсный неодимовый лазер с регулируемой энергией и интервалом между сдвоенными импульсами [7].

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс напыления нанопленки олова на поверхность металла проводился серией сдвоенных лазерных импульсов, действующих на мишень, установленную под углом 25 градусов к падающему излучению. Энергия каждого импульса излучения равнялась примерно 35 мДж, а временной интервал между импульсами составлял 10 мкс. Изображение полученной нанопленки приведено на рисунке.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, синтез тонкопленочных металлических покрытий показал, что использование сдвоенных лазерных импульсов позволяет проводить лазерное напыление тонких пленок на металл непосредственно в воздухе. Это позволяет снизить негативное воздействие окружающей среды на процессы осаждения, такие как торможение осаждаемых частиц и внедрение атмосферных газов в объем пленки. Полученные нанопленки в дальнейшем могут быть использованы для создания газочувствительных сенсоров.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Jagadish, C. Zink Oxide Bulk, Thin Films and Nanostructures. / eds C. Jagadish, S. J. Pearton. - Amsterdam, Elsevier, 2006. - 589 p.
2. Крастева, Л.К. Синтез и характеристика наноструктурированных слоев оксида цинка для сенсорики. //Л.К. Крастева, Д.Ц. Димитров, К.И. Папазова, Н.К. Николаев, Т.В. Пешкова, В.А. Мошников, И.Е. Грачева, С.С. Карпова, Н.В. Канева. // Физика и техника полупроводников. – 2013. – Т. 47, вып. 4. – С.564–569.
3. Shukla, G. ZnO/MgZnO p-n junction light-emitting diodes fabricated on sapphire substrates by pulsed laser deposition technique. // J. Phys. D Appl. Phys. – 2009.- V.42. - P. 75–105.
4. Urban, B. E. Optimization of nonlinear optical properties of ZnO micro and nanocrystals for biophotonics. /B. E. Urban, J. Lin, O. Kumar, K. Senthilkumar, Y. Fujita, and A. Neogi.// Opt. Mater. Express. – 2011. – V. 1. P. 658–669.
5. Жерихин, А.Н. Лазерное напыление тонких пленок. / А.Н. Жерихин. //Итоги науки и техники. Серия: Проблемы лазерной физики. - М. ВИНТИ. 1990. – 107 с.
6. Анисимов, С.И. Избранные задачи теории лазерной абляции. / С.И. Анисимов, Б.С. Лукьянчук. //УФН. - 2002. - Т.172, №3. – С.301-333.
7. Баззал, Х. Исследование влияния формы канала на процессы образования нанокластеров AlN и AlO в плазме при воздействии серий сдвоенных лазерных импульсов на алюминиевую мишень в воздушной атмосфере / Баззал Х., Е.С. Воропай, А.П. Зажогин, М.П. Патапович // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2019. – Вып. 11. – С. 57–64.