

## **ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРА РАСФОКУСИРОВКИ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ВОЗМОЖНОСТЬ СОЗДАНИЯ ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ГАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ СЕНСОРОВ**

А.П. Зажогин<sup>1</sup>, N.H. Trinh<sup>2</sup>, М.П. Патапович<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет  
220030, Республика Беларусь, Минск, пр-т Независимости, 4

*zajogin\_an@mail.ru*

<sup>2</sup>Vinh University

182 Le Duan Str., Vinh City, Nghe An Province, Vietnam

*ngochoangch10@gmail.com*

<sup>3</sup> УО «Белорусская государственная академия связи»

220114, Республика Беларусь, Минск, ул. Ф. Скорины, 6/2

*mpepat@mail.ru*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.718

**Аннотация:** Изучена возможность создания тонкопленочных газочувствительных сенсоров с применением композитных материалов, содержащих в своем составе олово, что позволяет значительно улучшить их характеристики, а также проведен послойный анализ металлов и многокомпонентных сплавов при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на мишень в атмосфере воздуха. Все эксперименты были проведены с помощью лазерного двухимпульсного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. В ходе данного исследования были изучены процессы формирования определенного компонентного состава приповерхностной лазерной плазмы, а также влияние параметра расфокусировки между сдвоенными лазерными импульсами при их воздействии на поверхность облучаемого образца. Таким образом, в данной работе проиллюстрировано развитие методов получения нанокластеров химических элементов при проведении спектроскопических исследований лазерной плазмы, образованной при воздействии двух последовательных импульсов на мишень и возможность получения нанопленок как чистых металлов, так и композиционных сплавов для последующего практического применения.

*Ключевые слова:* газочувствительные сенсоры, сдвоенные лазерные импульсы, лазерная плазма, послойный анализ, напыление тонких пленок, атомно-эмиссионная многоканальная спектрометрия.

### **1. Введение**

Газовые датчики служат для обнаружения токсичных газов, контроля качества окружающего воздуха и производственных процессов. Создание газочувствительных покрытий для газовых сенсоров с улучшенными характеристиками осуществляется двумя основными методами: синтезом новых соединений и модификацией свойств уже известных [1-5]. Наиболее значительные улучшения характеристик сенсоров наблюдаются при использовании подхода, основанного на применении композитных материалов. Данный способ заключается в использовании смесей двух и более компонентов, один из которых высокочувствителен к определенному газу [1, 6].

Благодаря ряду преимуществ по сравнению с другими типами

газовых датчиков использование полупроводниковых сенсоров чаще всего рассматривается как наиболее перспективное направление в данной области. Работа полупроводникового сенсора основана на регистрации изменений сопротивления при воздействии на него измеряемого газа. Полупроводниковые сенсоры (датчики) обладают почти полным отсутствием селективности (избирательности), но при этом имеют ряд преимуществ. В частности, они обеспечивают длительную работу в необслуживаемом режиме, имеют небольшие габаритные размеры и высокую технологичность изготовления, обладают высоким быстродействием и чувствительностью к малым концентрациям измеряемых газов [7].

Сплавы на основе цинка с добавками (алюминия, меди) характеризуются невысокой температурой плавления, хорошей жидкотекучестью, легко обрабатываются давлением и резанием, свариваются и паяются. На изделия из цинковых сплавов можно наносить металлические и неметаллические покрытия электрохимическим и химическим способами. Покрытие металла слоем цинка для защиты от коррозии подходит для ровных поверхностей, не подверженных механическим воздействиям [8].

Для развития микроэлектроники требуется создание качественных нанопленок, в состав которых входит олово. Этот элемент в промышленности применяется для изготовления тары из луженого железа (белой жести), в припоях для электроники, в домовых трубопроводах и в подшипниковых сплавах. У олова имеется два вида оксидов: станнат (оксид олова (II) —  $SnO$ ) и станнит (диоксид олова —  $SnO_2$ ). Оксид олова (II) в подавляющем большинстве случаев используется в качестве исходного продукта в производстве других соединений олова. Также может применяться в качестве восстановителя и в создании рубинового стекла [7, 8]. Пленки из диоксида олова, нанесенные на различные виды поверхности (стекло, керамика) могут применяться в датчиках горючих газов в воздухе. При нагревании до температуры в несколько сотен градусов Цельсия в присутствии горючих газов электрическое сопротивление такой наноструктуры снижается.

Таким образом, создание качественных оловосодержащих нанопленок на различных видах поверхности, входящих в состав газочувствительных сенсоров, методом мощных сдвоенных лазерных импульсов в атмосфере воздуха путем варьирования параметра расфокусировки и является целью данной работы.

## **2. Методы исследования**

В работе изучена возможность получения нанопленок на

металлической поверхности при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на оловосодержащие мишени в атмосфере воздуха. Эксперименты проводились с помощью лазерного двухимпульсного лазерного атомно-эмиссионного многоканального спектрометра LSS-1. При проведении экспериментов энергия импульсов составляла 53 мДж, а межимпульсный интервал — 10 мкс. Исследованы процессы формирования определенного компонентного состава приповерхностной лазерной плазмы и изучено влияние параметра расфокусировки между сдвоенными лазерными импульсами при их воздействии на поверхность облучаемого образца. В частности, подбором величины расфокусировки можно варьировать количество необходимого элемента в составе наноструктур для дальнейшего применения. Расфокусировка проводилась смещением мишени по отношению к фокусу, причем увеличение параметра расфокусировки приводит к росту площади лазерного пятна на поверхности образца и к снижению плотности потока излучения [9-11].

При проведении ряда предварительных экспериментов для дальнейшей работы были определены оптимальные параметры установки и следующие длины волн аналитических линий химических элементов: для цинка –  $Zn$  (481,205 нм); для олова –  $Sn$  (452,56 нм).

### **3. Результаты и обсуждение**

В ходе проведения эксперимента первоначально был проведен послойный анализ имеющейся многокомпонентной структуры. Для этого изучалась зависимость интенсивности линий химических элементов (олова и цинка) от номера последовательных сдвоенных лазерных импульсов, воздействовавших в атмосфере воздуха на мишень. При этом межимпульсный интервал составлял 10 мкс, а энергия импульсов находилась в диапазоне от 20 до 60 мДж. Число импульсов в серии равнялось 50. На рис. 1 приведены зависимости интенсивности линий олова и цинка от номера последовательных лазерных импульсов, воздействующих на поверхность исследуемых объектов.

Результаты, полученные при проведении исследования, отражают факт появления линии цинка после 31-го импульса. Вместе с тем олово продолжает поступать в лазерный факел. Поэтому, для более глубокого понимания скрытых механизмов воздействия сдвоенных лазерных импульсов на мишень, необходимо рассмотреть процессы не только на поверхности, но и в приповерхностной плазме. Следует отметить, что на процесс образования нанопленок многокомпонентных сплавов влияют как временной интервал и число сдвоенных импульсов, так и параметр расфокусировки. Это можно обеспечить смещением мишени по отношению к фокусу, тогда увеличение параметра расфокусировки

приведет к увеличению площади лазерного пятна на поверхности образца и, как следствие, к снижению плотности потока излучения [11].

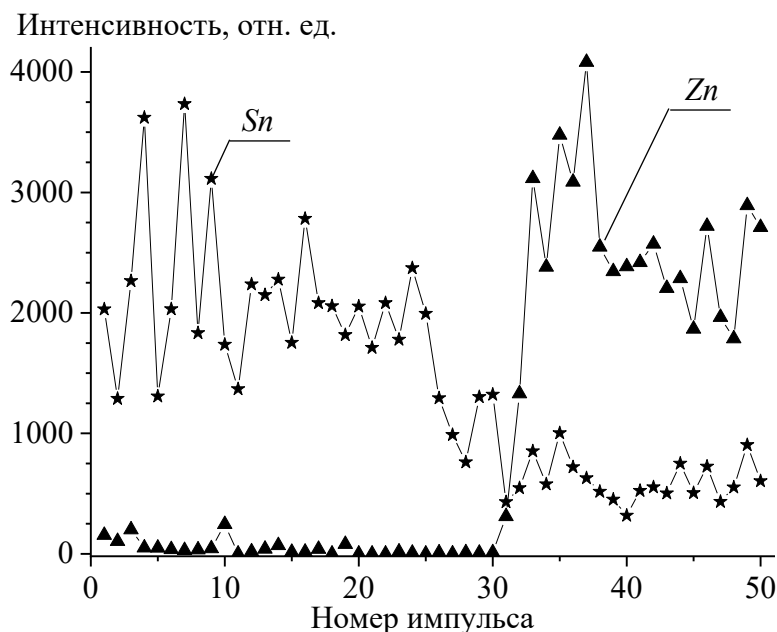


Рис. 1. Зависимость интенсивности линий олова и цинка от номера лазерного импульса.

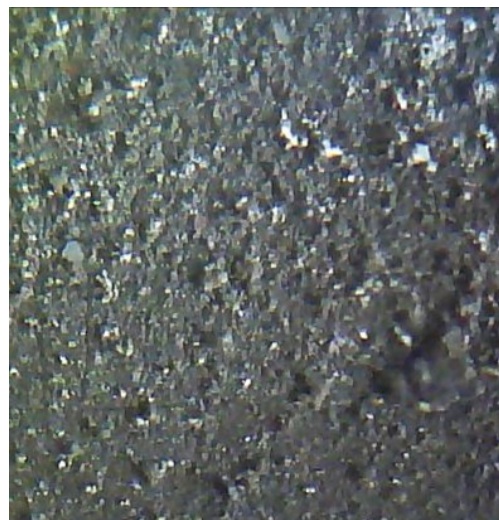
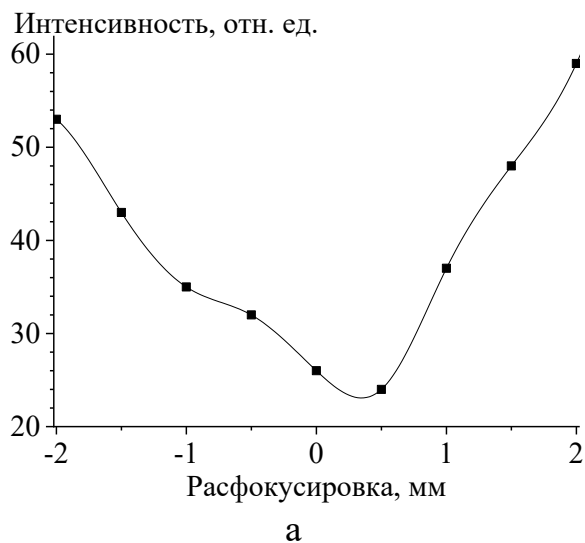


Рис. 2. Зависимость интенсивности линий олова от параметра расфокусировки (а) и снимок нанопленки на металлической поверхности (б). Линия – аппроксимация экспериментальных данных.

Для оценки результата воздействия лазерных импульсов на металлическую поверхность, а также на возможность получения качественных нанопленок, необходимо изучить влияние расфокусировки на интенсивности спектральных линий химических элементов (олова и цинка), входящих в состав наноструктур. В качестве примера на рис. 2

приведена зависимость интенсивности линии олова от параметра расфокусировки (см. рис. 2 а), а также внешний вид полученной пленки многокомпонентных сплавов на металлической поверхности (см. рис. 2 б).

Таким образом, в образовании нанокластеров в лазерной плазме наиболее важную роль играют процессы ионизации и рекомбинации ионов, что определяется плотностью потока лазерного излучения, потенциалом ионизации атомов, составляющих лазерную мишень, и диаметром пятна фокусировки.

#### **4. Заключение**

Спектроскопические исследования лазерной плазмы, проведенные при воздействии на многокомпонентную мишень с помощью серии мощных сдвоенных лазерных импульсов, позволяют сделать вывод о наличии возможности управления и контроля компонентным составом плазмы. Кроме того, проиллюстрировано развитие методов получения нанокластеров химических элементов при проведении спектроскопических исследований лазерной плазмы, образованной при воздействии двух последовательных импульсов на мишень, когда на первичные процессы плазмообразования будут накладываться процессы нагрева и испарения микрокапельной фракции от первого импульса, а также давления ударной волны, обусловленные действием второго импульса. Такой способ позволяет получать наноструктуры как чистых металлов, так и композиционных сплавов, что в перспективе определит возможность напыления нанопленок для создания газочувствительных сенсоров.

#### **Библиографический список:**

1. **Bayal, N.** Synthesis of metal aluminate nanoparticles by sol-gel method and studies on their reactivity, *Journal of alloys and compounds* / N. Bayal, P. Jeevanandam. – 2012. – V. 516. – P. 27-32. DOI: 10.1016/j.jallcom.2011.11.080.
2. **Samsonov, V.M.** A Thermodynamic approach to mechanical stability of nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov // *Central European Journal of Physics*. – 2003. – V. 1. – I. 2. – P. 344-354. DOI: 10.2478/BF02476301.
3. **Samsonov, V.M.** On thermodynamic stability conditions for nanosized particles / V.M. Samsonov, N.Yu. Sdobnyakov, A.N. Bazulev // *Surface Science*. – 2003. – V. 532-535. – P. 526-530. DOI: 10.1016/S0039-6028(03)00090-6.
4. **Han, M.** Physical properties of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiAlO<sub>4</sub>, CuAlO<sub>4</sub>, and ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinels synthesized by a solution combustion method / M. Han, Z. Wang, Y. Xu et. al. // *Materials Chemistry and Physics*. – 2018. – V. 215. – P. 251-258. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.05.029.
5. **Su, S.Y.** Preparation of CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> submicron tubes from electrospun Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers / S.-Y. Su, S.-S. Wang, S. Sakthnatan et al. // *Ceramics International*. – 2019. – V. 45. – I. 1. – P. 1439-1442. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.251.
6. **Ильин, А.П.** Особенности физико-химических свойств нанопорошков и наноматериалов: учебное пособие / А.П. Ильин, А.В. Мостовщиков, А.В. Коршунов, Л.О. Поог. – 2-е изд., испр. и доп. – Томск: Изд-во ТПУ, 2017. – 212 с.
7. **Sdobnyakov, N.Yu.** On the mechanical stability conditions for nanoparticles in vacuum and under an external pressure / N.Yu. Sdobnyakov, V.M. Samsonov, A.N. Bazulev // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1352. – № 1. – Art. № 012045. – 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1352/1/012045.

8. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.
9. 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. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.057.
10. Баззал, Х. Исследования процессов образования нитрида алюминия в плазме в зависимости от угла падения сдвоенных лазерных импульсов на мишень из алюминиевого сплава D16T в атмосфере воздуха / Х. Баззал, А.Р. Фадаиян, А.П. Зажогин // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2017. – № 1. – С. 34-42.
11. Зажогин, А.П. Особенности методов получения аморфных нанопленок для создания газочувствительных сенсоров при воздействии сдвоенных лазерных импульсов на поверхность мишени, содержащей олово / А.П. Зажогин, N.H. Trinh, M.A. Малец, М.П. Патапович // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2022. – Вып. 14. – С. 602-608. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.602.

#### References:

1. Bayal N., Jeevanandam P. Synthesis of metal aluminate nanoparticles by sol-gel method and studies on their reactivity, *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, vol. 516, pp. 27-32. DOI: /10.1016/j.jallcom.2011.11.080.
2. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu. A thermodynamic approach to mechanical stability of nanosized particles, *Central European Journal of Physics*, 2003, vol. 1, issue 2, pp. 344-354. DOI: 10.2478/BF02476301.
3. Samsonov V.M., Sdobnyakov N.Yu., Bazulev A.N. On thermodynamic stability conditions for nanosized particles, *Surface Science*, 2003, vol. 532-535, pp. 526-530. DOI: 10.1016/S0039-6028(03)00090-6.
4. Han M., Wang Z., Xu Y. Physical properties of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, CoAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, NiAlO<sub>4</sub>, CuAlO<sub>4</sub>, and ZnAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinels synthesized by a solution combustion method, *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 215, pp. 251-258. DOI: 10.1016/j.matchemphys.2018.05.029.
5. Su S.-Y., Wang S.-S., Sakthnatan S. et al. Preparation of CuAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> submicron tubes from electrospun Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> fibers /, *Ceramics International*, 2019, vol. 45, issue 1, pp. 1439-1442. DOI: 10.1016/j.ceramint.2018.09.251.
6. Ilyin A.P., Mostovshchikov A.V., Korshunov A.V., Root L.O. *Osobennosti fiziko-khimicheskikh svoystv nanoporoshkov i nanomaterialov: uchebnoe posobie* [Features of physical and chemical properties of nanopowders and nanomaterials: textbook], 2<sup>nd</sup> ed., Tomsk, TPU Publishing House, 2017, 212 p. . (In Russian).
7. Sdobnyakov N.Yu., Samsonov V.M., Bazulev A.N. On the mechanical stability conditions for nanoparticles in vacuum and under an external pressure, *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1352, no. 1, art. no. 012045, 4 p. DOI: 10.1088/1742-6596/1352/1/012045.
8. Grigor'yants A.G. *Osnovy lazernoj obrabotki materialov* [Fundamentals of laser processing of materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989, 304 p. (In Russian).
9. Bazzal K., Voropay E.S., Zajogin A.P., Patapovich M.P. Issledovanie vliyaniya formy kanala na protsessy obrazovaniya nanoklasterov AlO i AlN v plazme pri vozdejstvii serij sdvoennykh lazernykh impul'sov na alyuminievuyu mishen' v vozduшной atmosfere Investigation of the channel-form effect on the formation processes of AlO and AlN nanoclusters in plasma when aluminum target is subjected to series of double laser pulses in air], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2019, issue 11, pp. 57-64. DOI: 10.26456/pcascnn/2019.11.057. (In Russian).
10. Bazzal K., Fadaecian A.R., Zajogin A.P. Issledovaniya protsessov obrazovaniya nitride alyuminiya v plazme v zavisimosti ot ugla padeniya sdvoennykh lazernykh impul'sov na mishen' iz alyuminievogo splava D16T v atmosphere vozdukha [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], *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika [Journal of the Belarusian State University. Physics]*, 2017, no. 1, pp. 34-42. (In Russian).
11. Zazhogin, A.P., Trinh N.H., Malets M.A., Patapovich M.P. Osobennosti metodov polucheniya amorfnykh nanoplenok dlya sozdaniya gasochuvstvitelnykh sensorov pri vozdeistvii sdvoennykh lazernykh impul'sov na poverhnost' misheni, soderzhashey olovo [Peculiar properties of methods for obtaining amorphous nanofilms for creating gas-sensitive sensors under the action of laser double pulses on the surface of a target containing tin], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials]*, 2022, issue 14, pp. 602-608. DOI: 10.26456/pcascnn/2022.14.602. (In Russian).

**INFLUENCE OF THE DEFOCUSING PARAMETER OF DUAL LASER PULSES ON THE  
POSSIBILITY OF DESIGNING THIN-FILM GAS-SENSITIVE SENSORS**

A.P. Zazhogin<sup>1</sup>, N.H. Trinh<sup>2</sup>, M.P. Patapovich<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Belarusian State University, Minsk, Belarus*

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

<sup>3</sup>*Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus*

DOI: 10.26456/pcascnn/2023.15.718

**Abstract:** The possibility was studied of creating thin-film gas-sensitive sensors using composite materials containing tin in their composition, which can significantly improve their characteristic. In addition, a layer-by-layer analysis of metals and multicomponent alloys was carried out under the action of dual laser pulses on a target in an air atmosphere. All experiments were carried out using a laser two-pulses multichannel atomic emission spectrometer LSS-1. In the course of this study, the processes of formation of a certain component composition of the near-surface laser plasma, as well as the influence of the defocusing parameter between doubled laser pulses upon their impact on the surface of the irradiated sample, were studied. Thus, this work illustrated the development of methods for obtaining nanoclusters of chemical elements during spectroscopic studies of laser plasma formed by the action of two successive pulses on a target and the possibility of obtaining nanofilms of both pure metals and composite alloys for subsequent practical application.

*Keywords:* gas-sensitive sensors, double laser pulses, laser plasma, layer-by-layer analysis, deposition of thin films, multichannel atomic emission spectrometry.

*Зажогин Анатолий Павлович – д.ф.-м.н., профессор кафедры лазерной физики и спектроскопии, физический факультет Белорусского государственного университета*

*Ngoc H. Trinh – Ph. D., заведующий кафедрой прикладной физики, Vinh University, Vinh, Vietnam*

*Патапович Мария Петровна — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физических и математических основ информатики факультета информационных технологий УО «Белорусская государственная академия связи»*

*Anatoli P. Zajogin – Dr. Sc., Full Professor, Department of Laser Physics and Spectroscopy, Faculty of Physics, Belarusian State University*

*Ngoc H. Trinh – Ph. D., Head of the Applied Physics Department, Vinh University, Vinh, Vietnam*

*Mariya P. Patapovich – Ph. D., Docent, Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Belarus*

Поступила в редакцию/received: 29.07.2023; после рецензирования/reviced: 06.09.2023; принята/accepted: 10.09.2023.