

## ТЕХНОЛОГИЯ ЛАЗЕРНОГО СИНТЕЗА НАНОМАТЕРИАЛОВ В ПРИСУТСТВИИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ

*Черников А.С., Кочуев Д.А., Хорьков К.С., Прохоров А.В.*

*Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых,  
Владимир, Россия*

**Ключевые слова:** наноматериалы, наночастицы, лазерный синтез, лазерное осаждение, электростатическое поле, нитрид галлия, сульфид цинка.

**Аннотация.** В работе представлена технология обработки материалов субпикосекундными лазерными импульсами в электростатическом поле для формирования тонкопленочных структур и наночастиц. Представлена конструктивная схема обработки мишеней нитрида галлия и сульфида цинка лазерным излучением. Рассмотрено влияние среды и параметров лазерного воздействия на свойства синтезируемых наноматериалов. Установлено, что повышение давления в камере, замена среды и изменение режима сканирования приводит к радикальному изменению процесса лазерного синтеза.

## LASER SYNTHESIS TECHNOLOGY OF NANOMATERIALS IN THE PRESENCE OF AN ELECTROSTATIC FIELD

*Chernikov A.S., Kochuev D.A., Khorkov K.S., Prokhorov A.V.*

*Vladimir State University named after Aleksandr and Nikolai Stoletov,  
Vladimir, Russian Federation*

**Keywords:** nanomaterials, nanoparticles, laser synthesis, laser deposition, electrostatic field, gallium nitride, zinc sulfide.

**Abstract.** In this paper, we present a technology for processing materials with subpicosecond laser pulses in an electrostatic field for the formation of thin-film structures and nanoparticles. A constructive scheme of processing targets of gallium nitride and zinc sulfide by laser radiation is presented. The influence of the medium and the parameters of laser exposure on the properties of synthesized nanomaterials is considered. It is established that increasing the pressure in the chamber, replacing the medium and changing the scanning mode leads to a radical change in the laser synthesis process.

### Введение

В течение последних десятилетий направление исследований, связанное с изучением и практическим применением соединений группы III-V и II-VI, стремительно развивается. Данный класс материалов находит широкое применение в различных оптоэлектронных устройствах, таких как: светоизлучающие диоды, плоскочелюстные дисплеи, лазеры, электролюминесцентные источники света, солнечные элементы, сенсорные устройства и др. [1-4].

Одним из наиболее технологичных методов синтеза тонких пленок полупроводниковых материалов и многослойных гетероструктур на различных подложках является метод фемтосекундного импульсного

лазерного осаждения. Импульсное лазерное осаждение – это контролируемый процесс осаждения материалов на поверхность подложки. Варьируя режимы лазерного воздействия, например, изменяя энергию лазерного импульса или размер фокусирующего пятна, можно изменять энергию частиц в лазерном факеле, тем самым, управляя процессом конденсации паров осаждаемого материала.

**Цель работы** – изучить доминирующие факторы, влияющие на эффективность лазерного синтеза наночастиц нитрида галлия и сульфида цинка в электростатическом поле.

### Материалы и методы исследований

Получение наночастиц производилось с использованием фемтосекундной Yb:KGW лазерной системы с длиной волны 1030 нм, длительностью импульса 280 фс, энергией в импульсе до 150 мкДж, частотой следования импульсов лазерного излучения 10 кГц. На рисунке 1 представлена схема экспериментальной установки для лазерного синтеза наноматериалов в электростатическом поле.

В качестве мишеней выступали чистые (99,99%) образцы ZnS и Ga. В рабочей камере использовались пары аммиака для синтеза нитрида галлия и аргон при синтезе наночастиц сульфида цинка.

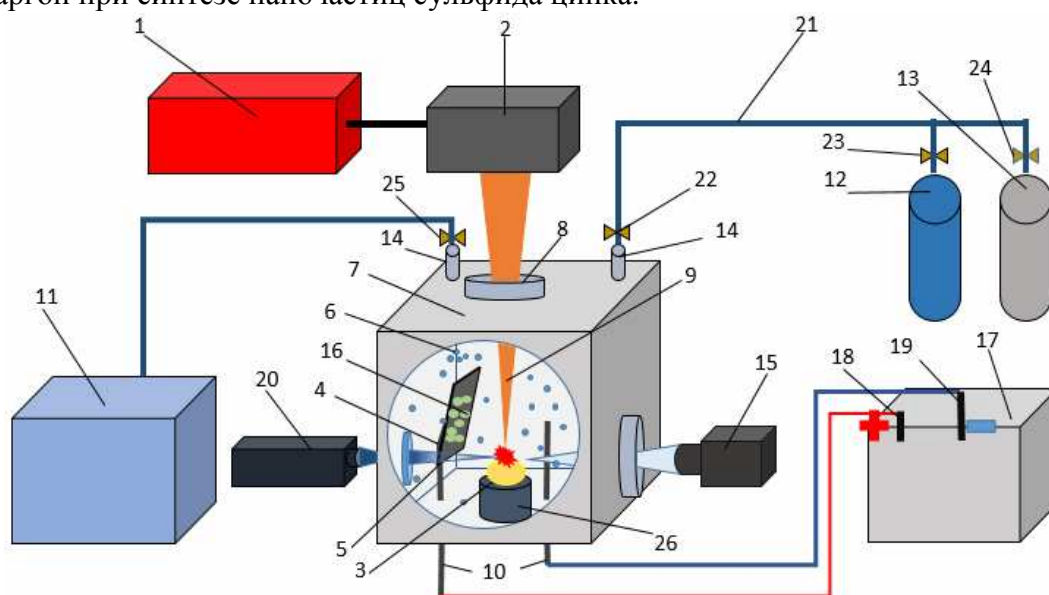


Рис. 1. Экспериментальная лазерная установка, включающая в себя:

- 1 – Yb:KGW фемтосекундный лазер; 2 – гальваносканатор; 3 – синтезируемый материал; 4 – подложка монокристаллического кремния; 5 – зажим для подложки;
- 6 – молекулы газа или паров; 7 – изолированный сосуд (вакуумная камера); 8 – окна ввода лазерного излучения и слежения за процессом; 9 – лазерное излучение;
- 10 – вводы высокого напряжения; 11 – вакуумный насос; 12, 13 – подача аргона или аммиака; 14 – ввод для накачивания и откачивания газа; 15 – CCD-камера;
- 16 – аблированные наночастицы; 17 – источник высокого напряжения;
- 18 – положительная клемма; 19 – отрицательная клемма; 20 – спектрометр;
- 21 – газовая магистраль; 22-25 – вентиль; 26-предметный стол

Электростатическое поле на электродах создавалось источником высокого напряжения, напряжение изменялось в диапазоне от 15 до 30 кВ, напряженность поля составляла 2-15 кВ/см. Процесс лазерного синтеза в электростатическом поле регистрировался CCD-камерой.

### **Результаты и обсуждения**

Применение электростатического поля позволило снизить интенсивность свечения лазерного эрозионного факела, так же на пластинах электродов наблюдался значительный рост слоя осажденных частиц, что говорит об эффективном выносе продуктов обработки из области распространения лазерного луча. Использование электростатического поля в процессе лазерного синтеза наночастиц позволяет помимо улавливания частиц, осуществлять прогнозируемое осаждение наноматериалов непосредственно на поверхность кремниевых подложек, за которыми установлены электроды, на которые подается напряжение, при этом производить вынос продуктов синтеза из области распространения лазерного луча. В результате чего частицы не попадают под повторное воздействие лазерного излучения, не наблюдается коагуляция продуктов абляции, вызванная воздействием лазерного эрозионного факела, что позволяет получать материалы заданного размера с более узким фракционным составом.

В результате лазерного импульсного синтеза ZnS в среде аргона с использование электростатического поля, полученные наночастицы имеют сферическую форму, на поверхности частиц отсутствуют неоднородности, при этом характерный размер частиц, полученных при скорости сканирования 1 мм/с находится в диапазоне значений от 2 до 160 нм, основная фракция находится в диапазоне 15-30 нм. Средний размер наночастиц GaN составляет около 70 нм, однако представлены и крупные частицы [5]. Формирование наночастиц требуемого размера может быть реализовано путем управления параметрами лазерного излучения [6].

### **Выводы**

Наиболее весомые факторы в процессе экспериментальных работ является режим сканирования и концентрация аммиака. Наличие электростатического поля способствует выносу и отклонению потока аблируемых частиц из области распространения лазерного излучения и эрозионного факела. В результате чего аблируемые частицы не подвергаются повторному воздействию ни со стороны лазерного излучения, ни со стороны лазерного эрозионного факела. Таким образом, можно говорить о том, при наличии электростатического поля в процессе абляционной обработки, коагуляция частиц либо полностью исключается, либо ее вероятность значительно снижается, при этом удастся получить узкое распределение размеров частиц по размерам.

**Финансирование.** Работа была выполнена в рамках государственного задания ВлГУ 075-03-2020-046/1 (ГБ 1187/3).

### Список литературы / References

1. Acharya A.R. Group III–nitride semiconductors: preeminent materials for modern electronic and optoelectronic applications // *Himalayan Physics*. 2014, vol. 5, pp. 22-26. doi.org/10.3126/hj.v5i0.12818.
2. Chen F., Ji X., Lau S.P. Recent progress in group III-nitride nanostructures: From materials to applications // *Materials Science and Engineering: R: Reports*. 2020, vol. 142, p.100578. doi.org/10.1016/j.mser.2020.100578.
3. Li G., Wang W., Yang W., Lin Y., Wang, H., Lin Z., Zhou S. GaN-based light-emitting diodes on various substrates: a critical review // *Reports on Progress in Physics*. 2016, vol. 79, no. 5, p. 056501. doi.org/10.1088/0034-4885/79/5/056501.
4. Ahmad U., Aslam S., Mustafa F., Jamil A., Ahmad M.A. Synthesis and characterization of InN quantum dots for optoelectronic applications // *Optik*. 2018, vol. 173, pp. 97-100. doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.07.104.
5. Kochuev D.A., Chernikov A.S., Chkalov R.V., Prokhorov A.V., Khorkov K.S. Deposition of GaN nanoparticles on the surface of a copper film under the action of electrostatic field during the femtosecond laser ablation synthesis in ammonia environment // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2131, no. 5, p. 052089. doi.org/10.1088/1742-6596/2131/5/052089.
6. Chernikov A.S., Kochuev D.A., Voznesenskaya A.A., Egorova A.V., Khorkov K.S. Synthesis of spherical zinc sulfide nanoparticles produced by femtosecond laser ablation and deposited on a silicon substrate under the action of an electrostatic field // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021, vol. 2077, no. 1, p. 012002. doi.org/10.1088/1742-6596/2077/1/012002.

<b>Черников Антон Сергеевич</b> – младший научный сотрудник	<b>Chernikov Anton Sergeevich</b> – junior researcher
<b>Кочуев Дмитрий Андреевич</b> – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник	<b>Kochuev Dmitry Andreevich</b> – candidate of physical and mathematical sciences, researcher
<b>Хорьков Кирилл Сергеевич</b> – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник	<b>Khorkov Kirill Sergeevich</b> – candidate of physical and mathematical sciences, senior researcher
<b>Прохоров Алексей Валерьевич</b> – доктор физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник freeod@mail.ru	<b>Prokhorov Alexey Valerievich</b> – doctor of physical and mathematical sciences, associate professor, leading researcher

*Received 02.11.2022*