

## ЛАЗЕРНЫЙ СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

Е.М. Тюльпанова

katt-03@mail.ru

SPIN-код: 8563-7451

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

---

### Аннотация

Представлен обзор отличий свойств наноструктур и наноматериалов от аналогичных свойств макроскопических объектов. Подробно описаны особые оптические свойства наночастиц и влияние параметров наночастиц на эти свойства. Теоретически и экспериментально исследован метод получения наночастиц лазерной абляцией в жидкости. Рассмотрены возможности повышения эффективности солнечных элементов посредством применения наночастиц благородных металлов и определены их оптимальные параметры. Экспериментально оценены свойства коллоидного раствора, синтезируемого методом лазерной абляции в жидкости. Определено влияние условий облучения на размеры наночастиц. На основании требований к свойствам и параметрам наночастиц предложено устройство для осуществления непрерывного лазерного синтеза, а также способы оптимизации контроля процесса синтеза.

### Ключевые слова

Лазерная абляция, солнечный элемент, наноматериалы, наночастицы, повторное облучение, коллоидный раствор, золотые наночастицы, серебряные наночастицы, локализованный плазмонный резонанс

Поступила в редакцию 21.05.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

---

**Введение.** Одним из наиболее интенсивно развивающихся направлений современной науки является исследование путей получения и свойств наноразмерных объектов — наночастиц (НЧ), которые нашли широкое технологическое применение, в том числе в наноэлектронике, нанофотонике, медицине, системах связи, при исследовании окружающей среды и Космоса [1].

Большой научный и практический интерес к НЧ и наноматериалам обусловлен тем, что многие их физические, химические и термодинамические свойства существенно отличаются от свойств макроскопического вещества того же состава. Кроме того, влияние размера и структуры НЧ на их свойства так же велико, как и влияние их химического состава [1].

Важной особенностью металлических НЧ является отличное от макроразмерных частиц взаимодействие с излучением. В переменном электромагнитном поле свободные электроны смещаются относительно ионной решетки металла, в результате чего образуются избыточные разноименные заряды на противоположных поверхностях частицы. Возникает возвращающая сила, пропорциональная смещению электронного облака, действующая на него противоположно смеще-

нию [2]. Таким образом, возникают колебания, которые в случае НЧ приводят к возникновению эффекта локализованного плазмонного резонанса (ЛПР).

ЛПР возникает в результате поглощения плазмоном кванта света на частоте, совпадающей с его резонансной частотой. Для золотых наночастиц (ЗНЧ) это явление наблюдается в области зеленого света видимой части излучения (рис. 1) [3]. Однако высота пика зависит от размера ЗНЧ: для частиц размером более 100 нм характерно сильное рассеяние, при размере менее 40 нм более ярко выражено поглощение (рис. 2) [4]. Стоит отметить, что спектр экстинкции НЧ золота, имеющих размер 20 нм и менее, полностью состоит из поглощения [5]. Вследствие этого ЗНЧ имеют перспективы применения в области солнечной энергетики.

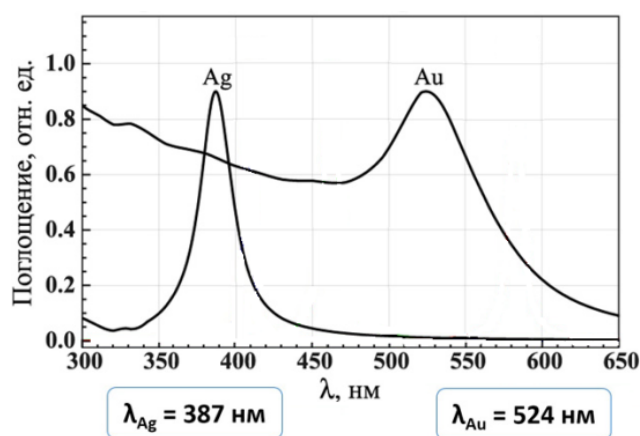


Рис. 1. Взаимное расположение пиков плазмонного резонанса ядра Ag и Au [3]

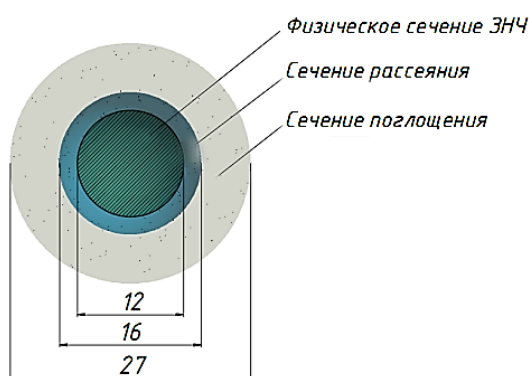


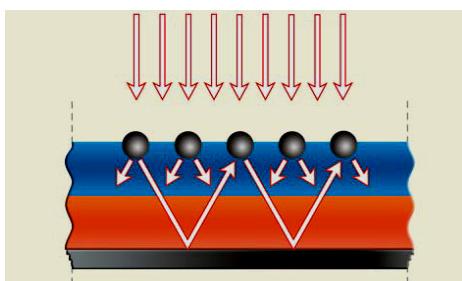
Рис. 2. Сечения рассеяния и поглощения ЗНЧ размером 12 нм [6]

Фотовольтаика — раздел науки, связанный с осуществлением прямого преобразования света в электрический ток. Солнечные элементы (СЭ) — устройства, работающие по этому принципу. Фотовольтаика развивается на протяжении нескольких десятилетий. За это время сменилось несколько поколений солнечных элементов [7], при этом решались такие задачи, как повышение эффектив-

ности СЭ, увеличение срока службы и стабильности работы при непостоянных внешних условиях (температура, влажность, облачность), а также снижение стоимости [8].

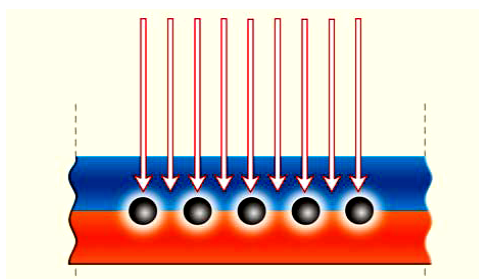
С точки зрения повышения КПД солнечных элементов, или эффективности преобразования энергии солнечного света в электрический ток, основная задача, стоящая перед разработчиками СЭ, заключается в увеличении фактора заполнения, определяющего эффективность. С этой целью для захвата света могут быть использованы плазмонные свойства НЧ металлов.

Во-первых, металлические НЧ могут служить рассеивающими элементами для длинноволновой составляющей спектра солнечного света, падающего на тонкую пленку полупроводника (рис. 3). В результате падающий свет несколько раз пройдет через материал, увеличив тем самым длину своего оптического пути [9].



**Рис. 3.** Рассеяние света на металлических наночастицах, находящихся на поверхности полупроводника [9]

Во-вторых, для повышения эффективности тонкопленочного СЭ можно использовать эффект резонансного возбуждения плазмонных мод в металлических НЧ, заключенных в полупроводниковую матрицу (рис. 4). Тогда металлические наночастицы (размером примерно 5...20 нм) будут активно поглощать падающее на СЭ излучения, на поверхности НЧ при этом будут возникать локализованные плазмонные моды, за счет энергии которых будет происходить дополнительная генерация электронно-дырочных пар в полупроводнике и тем самым увеличиваться фактор заполнения [9].



**Рис. 4.** Возбуждение локализованных плазмонных мод на поверхности металлических наночастиц, включенных в полупроводниковую матрицу [9]

Известно, что максимум спектра солнечного излучения приходится на  $\lambda_{\max} \approx 500$  нм [10], что близко к области максимума поглощения золотыми НЧ. В свою очередь, пик плазмонного резонанса серебра находится также в зоне видимого спектра ( $\lambda_{\max} \approx 400$  нм) и относительно золота более ярко выражен (см. рис. 1). Следовательно, применение золотых и серебряных НЧ в качестве центров поглощения солнечного света в СЭ должно положительно сказаться на их КПД. Не исключается также возможность внедрения НЧ указанных металлов в матрицу СЭ с целью дополнительного рассеяния солнечного света.

Среди большого разнообразия физических и химических способов синтеза наночастиц выделяется лазерная абляция в жидкости (ЛАЖ). Лазерная абляция позволяет получать большое разнообразие наноматериалов в различных растворах и, в отличие от химических большинства методов, не требует особых химических реагентов и не производит токсичных отходов. Процесс ЛАЖ достаточно стабильный, т. е. имеет высокую воспроизводимость, и легко автоматизируется.

Метод лазерной абляции сделал возможным управление характеристиками НЧ непосредственно во время генерации [11]. Однако в процессе ЛАЖ синтезируются частицы разной дисперсности, поэтому затруднено управление распределением частиц по размерам. На выходе при ЛАЖ получается коллоидный раствор, свойства которого легко оценить оптическими методами.

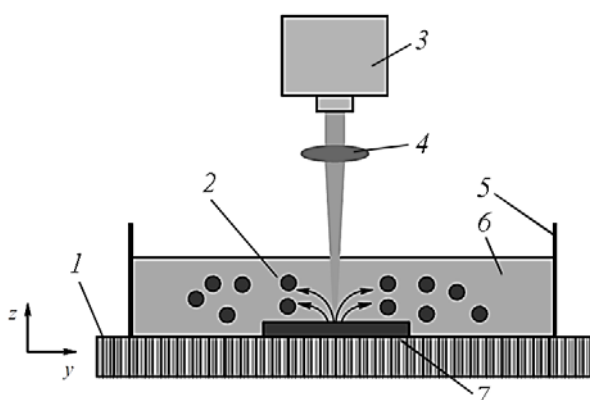
На состав и структуру НЧ влияет не только материальный состав мишени и жидкой среды, но и параметры процесса ЛАЖ [12]. При увеличении энергии в импульсе образуются НЧ больших размеров, в то же время растет концентрация вещества мишени в области плазменного факела в результате отрыва более крупных расплавленных кластеров [12]. Кроме того, образовавшиеся в процессе абляции НЧ могут подвергнуться воздействию лазерного излучения, находясь при этом в растворе. При повторном облучении ЗНЧ происходит их оплавление и слипание [13] при отсутствии в растворе прекурсоров, препятствующих сближению. Таким образом, средний размер частиц, уже находящихся в растворе, может увеличиваться.

Цель данной работы являлось исследование влияния параметров процесса ЛАЖ, среди которых энергия в импульсе и степень повторного облучения НЧ, на параметры получаемых коллоидных растворов и НЧ непосредственно. Комбинация данных параметров процесса определяет производительность генерации НЧ заданного размера. Энерговклад влияет на массовый выход абляции, тогда как степень нахождения готовых наночастиц под действием последующих импульсов может служить инструментом контроля их размеров. Отличием лазерной абляции серебра в воде от абляции золота является химическое взаимодействие  $\text{Ag}$  и  $\text{H}_2\text{O}$ , в результате которого НЧ серебра покрыты тонким оксидным слоем  $\text{Ag}_2\text{O}$  [12].

**Методика эксперимента.** Лазерную абляцию проводили в дистиллированной воде, чтобы исключить образование химических соединений аблируемого веще-

ства с примесями, а также избежать оптического пробоя жидкой среды. В качестве обрабатываемых материалов выбраны золото и серебро, оба 999 пробы.

Использовали лазерное излучение с длиной волны  $\lambda = 532$  нм, длительностью импульса  $\tau_{\text{и}} = 5$  нс. Энергия в импульсе изменялась в пределах 280...380 мкДж. Плоский образец прямоугольной формы (серебро или золото) помещали на дно кюветы с дистиллированной водой (рис. 5). Проводилось сканирование лазерными импульсами по поверхности образца. Для исследования влияния повторного облучения на параметры наночастиц образцы облучали путем нескольких проходов по поверхности. Таким образом были подготовлены образцы, подверженные одному, трем и пяти проходам.



**Рис. 5.** Схема эксперимента по генерации наночастиц методом лазерной абляции в жидкости:

1 — XYZ-стол; 2 — синтезированные наночастицы; 3 — лазер; 4 — фокусирующая линза; 5 — химический стакан; 6 — жидкость; 7 — материал мишени

Подготовленные водные коллоидные растворы золотых и серебряных наночастиц исследовали с помощью спектрофотометра (Perkin Elmer Lambda 750) для определения коэффициента экстинкции пропускаемого через них света видимого диапазона вблизи соответствующих плазмонных пиков. Размеры полученных частиц исследовали на сканирующем и просвечивающем электронных микроскопах.

**Результаты эксперимента.** Измерение размера частиц проводили как прямым, так и косвенным методами.

**Золото.** Методом спектрофотометрии измерили спектр экстинкции коллоидного раствора золота, полученного при различных значениях энергии и одинаковых прочих условиях (рис. 6). Известно, что с уменьшением интенсивности излучения резонансный пик становится шире, а коэффициент ослабления в длинноволновой области спектра менее резко уменьшается из-за увеличения доли крупных частиц в растворе [14]. Однако результаты показали линейное увеличению амплитуды спектра экстинкции раствора (рис. 7), что указывает на повышенную концентрацию частиц без изменения их размеров [14].

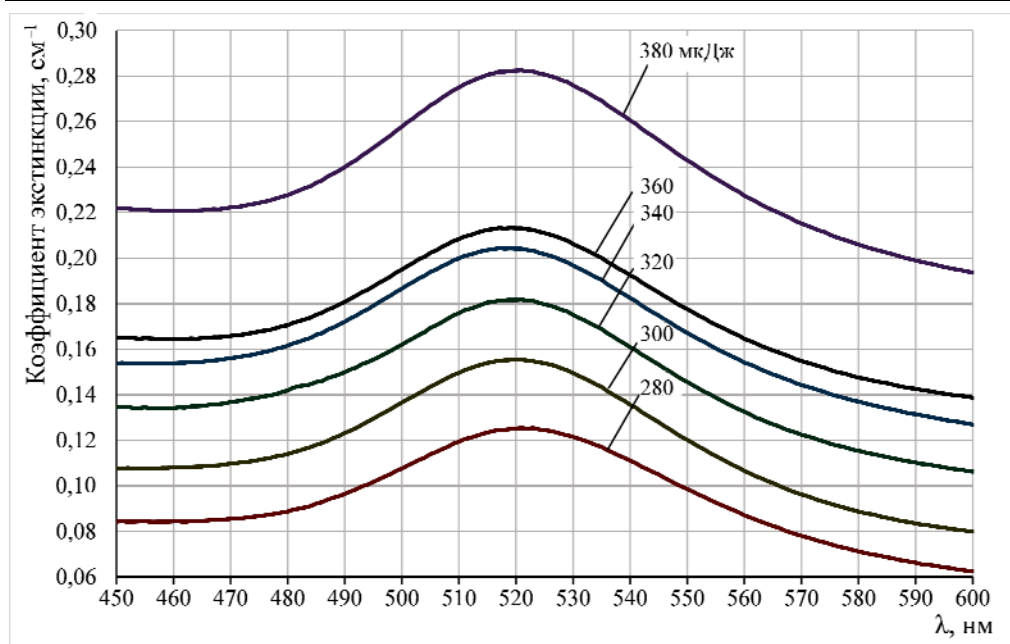


Рис. 6. Значения экстинкции коллоидных растворов золота, полученных методом ЛАЖ при различных значениях энергии в импульсе

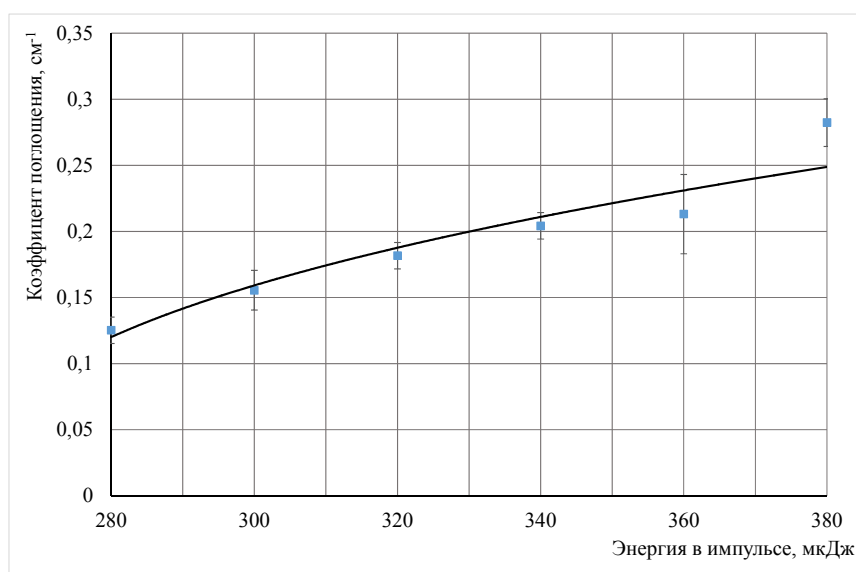
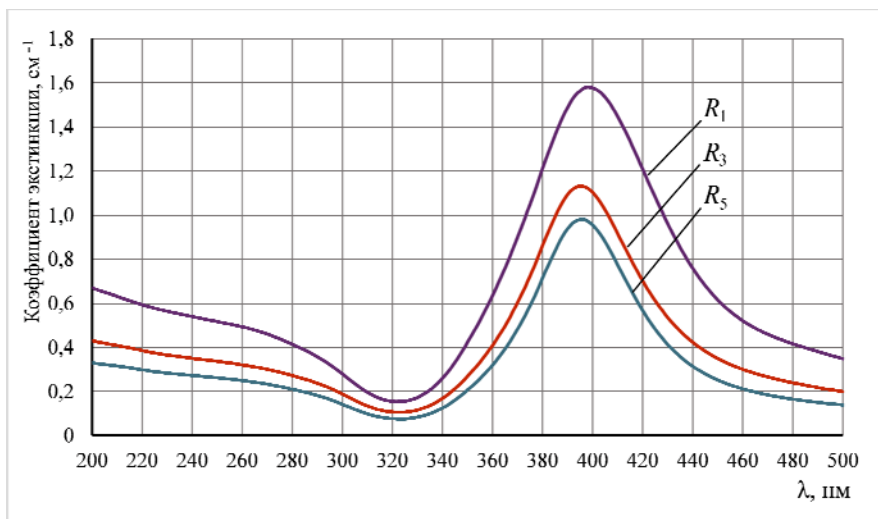


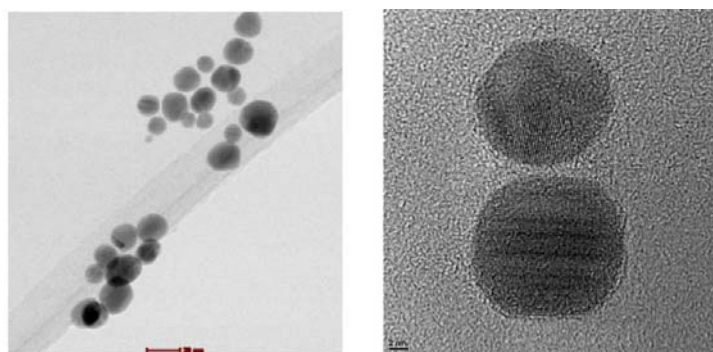
Рис. 7. Значения пика поглощения коллоидных растворов золота, полученных методом ЛАЖ, в зависимости от энергии в импульсе

**Серебро.** Коллоидный раствор серебра был подвержен разной степени облучения. Кроме измерения экстинкции образцов (рис. 8), был определен размер НЧ с помощью стандартных методик сканирующей и просвечивающей электронной микроскопии (рис. 9–11).

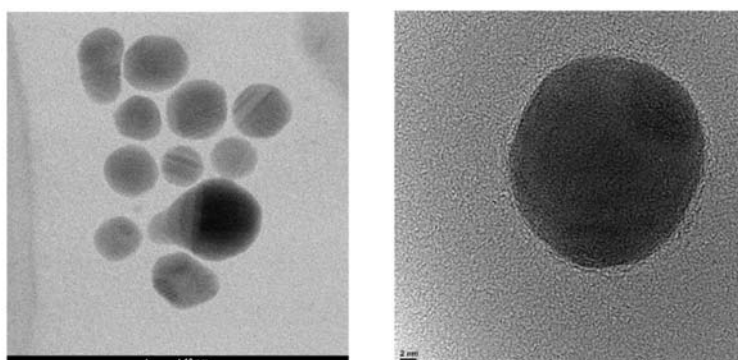


**Рис. 8.** Оптическая плотность коллоидного раствора серебра, полученного методом ЛАЖ, с различной степенью повторного облучения:

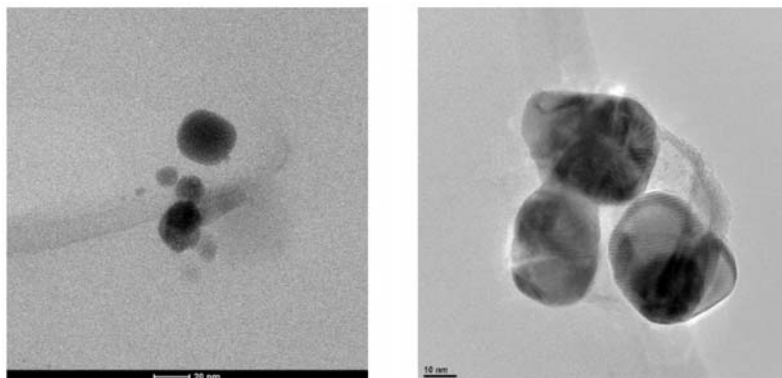
$R_1$  — размер при одном проходе;  $R_3$  — размер при трех проходах;  
 $R_5$  — размер при пяти проходах



**Рис. 9.** Изображения, полученные на сканирующем (слева) и просвечивающем (справа) электронных микроскопах для образца, подверженного однократному облучению

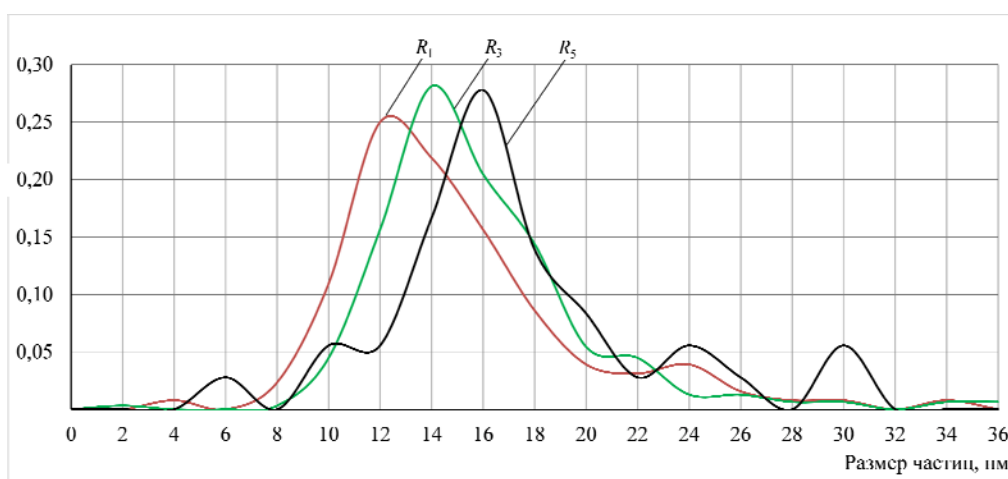


**Рис. 10.** Изображения, полученные на сканирующем (слева) и просвечивающем (справа) электронных микроскопах для образца, подверженного трехкратному облучению



**Рис. 11.** Изображения, полученные на сканирующем (слева) и просвечивающем (справа) электронных микроскопах для образца, подверженного пятикратному облучению

По результатам измерений было найдено распределение по размерам серебряных НЧ в коллоидном растворе (рис. 12). Таким образом, при увеличении степени повторного облучения средний размер НЧ становится больше, а при увеличении размера НЧ снижается экстинкция раствора.



**Рис. 12.** Распределение по размерам ЗНЧ, синтезированных ЛАЗ при различной степени повторного облучения:

$R_1$  — размер при одном проходе;  $R_3$  — размер при трех проходах;  
 $R_5$  — размер при пяти проходах

**Устройство для непрерывного синтеза.** Предложено устройство для осуществления непрерывного лазерного синтеза. Кинематическая схема механизма представлена на рис. 13.

**Выбор насоса.** Насос выбирают на основе следующих требований:

- равномерное течение жидкости;
- расход, обеспечивающий ламинарное течение жидкости;
- гибкие (силиконовые) трубки для перемещения воды.



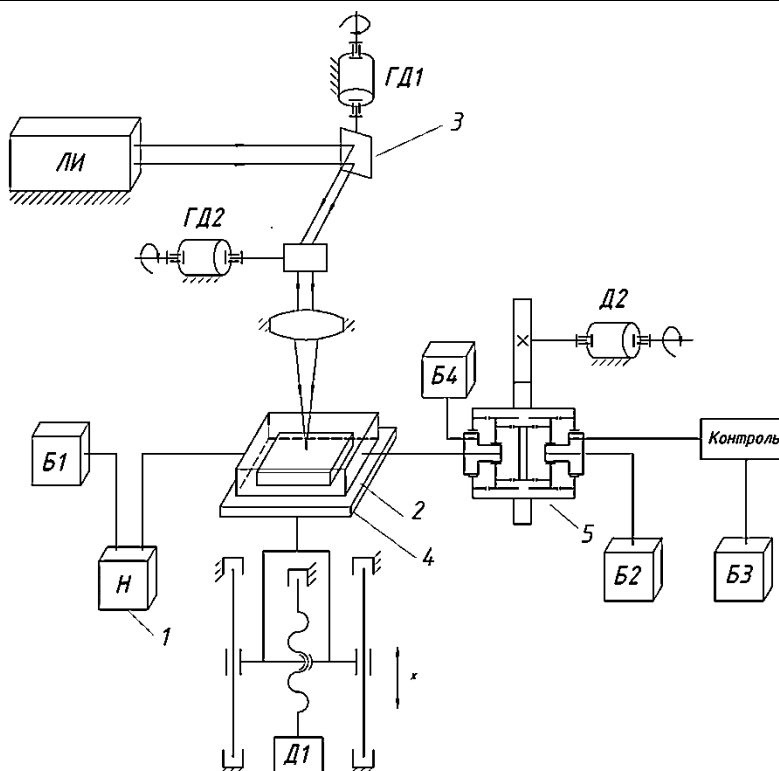


Рис. 13. Кинематическая схема устройства:

1 — насос; 2 — камера для синтеза; 3 — гальванометрический сканатор; 4 — каретка для позиционирования; 5 — устройство для седиментации частиц

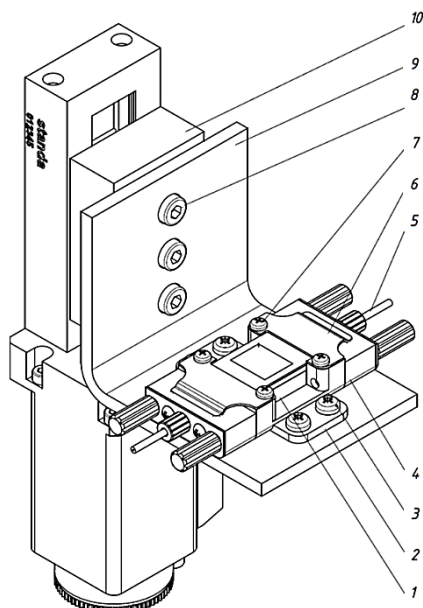
Данные требования обеспечивают перистальтические насосы, поэтому для данного устройства выбран встраиваемый перистальтический насос с мини-головкой OEM-B01.

**Технические характеристики OEM-B01**

Диапазон частоты вращения, об/мин, не более .....	300
Максимальный расход, мл/мин .....	190
Тип электродвигателя.....	Шаговый с фланцем 42 мм
Число фаз электродвигателя .....	2
Минимальный угол поворота вала электродвигателя, град. ....	1,8
Фазное напряжение электродвигателя, В .....	2,2
Фазный ток электродвигателя, А .....	1,0

**Проектирование камеры для синтеза ЗНЧ.** Спроектирована камера для синтеза НЧ, чертежи которой представлены на рис. 14.

Кювета, в которую помещается мишень, имеет прозрачное для ЛИ окно. Данный механизм обеспечивает проток жидкости через герметично закрытую кювету, соединенную с помощью элементов микрофлюидики с остальными звеньями схемы.



**Рис. 14.** Камера для синтеза НЧ:

1 — кювета; 2 — держатель кюветы; 3, 7, 8 — винты,  
4 — коннектор; 5 — трубка силиконовая; 6 — за-  
жим; 9 — уголок; 10 — моторизованный линейный  
транслятор 8МТ173-30

**Выбор каретки.** Для позиционирования кюветы и фокусировки лазерного луча используется система вертикального перемещения: моторизованный линейный транслятор 8МТ173-30.

#### Технические характеристики 8МТ173-30

Тип двигателя .....	Постоянного тока (номиналом 3 В, 1,2 Вт)
Кодировщик .....	Магнитный цифровой (2 канала)
Разрешение, мкм .....	0,10
Минимальный шаг перемещения, мкм .....	0,23
Двусторонняя повторяемость, мкм .....	0,40
Концевые выключатели	
Максимальная нагрузка, кг:	
Горизонтальная .....	5,0 (изменяется со скоростью)
Вертикальная .....	1,5 (изменяется со скоростью)
Масса, кг .....	0,33...0,38 (в зависимости от модели)

**Кинематика седиментации ЗНЧ.** В процессе лазерной абляции, как известно, образуются частицы разной дисперсности: не только наночастицы, но и частицы микрометрового размера. Таким образом, следует предусмотреть разделение частиц по размерам.

Существуют различные решения данного вопроса, в основе которых лежит фракцинация в различных потоках. В рамках проекта предлагается осуществлять разделение под действием центробежных сил.

Регулирование параметров данной установки, таких как расход жидкости и положение мишени относительно фокальной плоскости, дает возможность управлять характеристиками синтезируемых НЧ для получения требуемых размера и структуры.

**Выводы.** Методом лазерной абляции в жидкости получены коллоидные растворы серебра и золота в воде.

Оптическая плотность коллоидных растворов была измерена методом спектрофотометрии. Обнаружены максимумы в спектре экстинкции для наночастиц, которые находятся вблизи значений пика плазмонного резонанса: для золота около 520 нм, для серебра — 405 нм.

Значение в максимуме экстинкции зависит от нескольких факторов, в частности, от концентрации НЧ в растворе и от размера НЧ. Наблюдается рост пика при повышении энергии в импульсе; а также при повышении степени повторного облучения.

При увеличении энергии в импульсе значение пика линейно возрастало без увеличения полуширины, что говорит о повышении концентрации НЧ в растворе.

С помощью методик просвечивающей и сканирующей микроскопии был определен размер НЧ. По мере увеличения степени повторного облучения частиц в растворе максимум экстинкции снижался, а средний размер НЧ при этом увеличивался.

Разработана структурная схема комплекса, который обеспечивает непрерывный процесс синтеза коллоидного раствора. Для реализации комплекса была вновь разработана камера для синтеза наночастиц с использованием элементов микрофлюидики. Подобраны покупные элементы комплекса.

## Литература

- [1] Макаров Г.Н. Применение лазеров в нанотехнологии: получение наночастиц и наноструктур методами лазерной абляции и лазерной нанолитографии. *Успехи физических наук*, 2013, т. 183, № 7, с. 673–718.
- [2] Хохлов Н.Е. *Резонансные оптические эффекты при оптическом, магнитном и акустическом воздействиях на плазмон-поляритоны в слоистых структурах*. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Москва, 2015, 132 с.
- [3] Лебедев В.С. Оптические свойства наночастиц.  
URL: [http://mipt-krf.ru/index.php/science/presentat/presentation\\_optic\\_prop\\_nanopart/](http://mipt-krf.ru/index.php/science/presentat/presentation_optic_prop_nanopart/) (дата обращения 18.10.2017).
- [4] Хлебцов Б.Н., Ханадеев В.А., Пылаев Т.Е., Хлебцов Н.Г. Метод динамического рассеяния света в исследовании силикатных и золотых наночастиц, *Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Физика*, 2017, т. 17, № 2, с. 71–84.
- [5] Huang X., El-Sayed M.A. Gold nanoparticles: optical properties and implementations in cancer diagnosis and photothermal therapy. *Journal of Advanced Research*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 13–28.
- [6] Yoo S.J., Park Q.H. Enhancement of chiroptical signals by circular differential mie scattering of nanoparticles. *Scientific Reports*, 2015, no. 5, art. 14463.
- [7] Миличко В.А., Шалин А.С., Мухин И.С., Ковров А.Э., Красилин А.А., Виноградов А.В., Белов П.А., Симовский К.Р. Солнечная фотовольтаика: современное состояние и тенденции развития. *Успехи физических наук*, 2016, т. 186, № 8, с. 801–852.
- [8] Сычев В.В. Нанотехнологии для энергосбережения: прогноз наиболее значимых областей исследования. *Российский химический журнал*, 2008, № 6, с. 118–128.

- 
- [9] Кашкаров П.К., Казанский А.Г., Форш П.А., Емельянов А.В. Тонкопленочные солнечные элементы в прошлом и будущем. *Природа*, 2013, № 12, с. 56–64.
- [10] Баграташвили В.Н., Басков А.В., Борщенко И.А., Игнатъева Н.Ю., Омельченко А.И., Свиридов А.П., Свистушкин В.М., Соболев Э.Н., Шехтер А.Б. *Лазерная инженерия хрящей*. Москва, Физматлит, 2006, 488 с.
- [11] Солдатов А.Н., Васильева А.В. Эффект лазерной резонансной абляции в микро- и нанотехнологиях. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2008, т. 312, № 2, с. 81–85.
- [12] Amendola V., Meneghetti M. What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution? *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, no. 15, pp. 3027–3046.
- [13] Mafune F., Kohno J., Takeda Y., Kondow T. Full physical preparation of size-selected gold nanoparticles in solution: laser ablation and laser-induced size control. *The journal of physical chemistry*, 2002, vol. 106, no. 31, pp. 7575–7577.
- [14] Starinskiy S.V., Shukhov Yu.G., Bulgakov A.V. Effect of nanoparticle sizes on the extinction spectrum of colloidal solutions produced by laser ablation of gold in water. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 343–346.

**Тюльпанова Екатерина Михайловна** — студентка кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

**Научный руководитель** — Мельников Дмитрий Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Лазерные технологии в машиностроении», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

## LASER-INDUCED SYNTHESIS OF NANOPARTICLES AND THEIR APPLICATION IN SOLAR ENERGY

E.M. Tyulpanova

katt-03@mail.ru

SPIN-code: 8563-7451

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

---

### Abstract

The article presents a review of the nanostructures and nanomaterials properties distinctions from the equivalent properties of the macroscopic objects. It describes in detail special optical properties of the nanoparticles and the influence of the nanoparticles' parameters on these properties. The authors theoretically and experimentally investigate the method for obtaining nanoparticles by means of laser ablation in the fluid. We consider the possibilities of increasing the efficiency of the solar cells through the use of the noble-metal nanoparticles and define their optimal parameters. The work estimates experimentally the properties of the colloid solution, synthesized by the method of laser ablation in the fluid. The impact of the irradiation conditions on the nanoparticles dimensions is determined. By virtue of the requirements to the nanoparticles' properties and parameters we suggest a device for the implementation of the continuous laser synthesis as well as the ways for optimizing the control of the synthesis process.

### Keywords

Laser ablation, solar cell, nanomaterials, nanoparticles, reirradiation, colloid solution, gold nanoparticles, silver nanoparticles, localized plasma resonance

Received 21.05.2018

© Bauman Moscow State Technical University, 2018

---

### References

- [1] Makarov G.N. Laser applications in nanotechnology: nanofabrication using laser ablation and laser nanolithography. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2013, vol. 183, no. 7, pp. 673–718. (Eng. version: *Physics–Uspekhi*, 2013, vol. 56, no. 7, pp. 643–682.)
- [2] Khokhlov N.E. Rezonansnye opticheskie efekty pri opticheskom, magnitnom i akusticheskom vozdeystviyakh na plazmon-polyaritony v sloistyx strukturakh. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Optical resonance effects in optical, magnetic and acoustic impact on plasmon polaritons in layer structures. Kand. phys.-math. sci. diss.]. Moscow, 2015, 132 pp.
- [3] Lebedev V.S. Opticheskie svoystva nanochastits [Optical properties of nanoparticles]. URL: [http://mipt-krf.ru/index.php/science/presentat/presentation\\_optic\\_prop\\_nanopart/](http://mipt-krf.ru/index.php/science/presentat/presentation_optic_prop_nanopart/) (accessed 18 October 2017).
- [4] Khlebtsov B.N., Khanadeev V.A., Pylaev T.E., Khlebtsov N.G. Dynamic light scattering method in studies of silica and gold nanoparticles. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Ser. Fizika* [Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Physics], 2017, vol. 17, no. 2, pp. 71–84.
- [5] Huang X., El-Sayed M.A. Gold nanoparticles: optical properties and implementations in cancer diagnosis and photothermal therapy. *Journal of Advanced Research*, 2010, vol. 1, no. 1, pp. 13–28.

- 
- [6] Yoo S.J., Park Q.H. Enhancement of chiroptical signals by circular differential mie scattering of nanoparticles. *Scientific Reports*, 2015, no. 5, art. 14463.
- [7] Milichko V.A., Shalin A.S., Mukhin I.S., Kovrov A.E., Krasilin A.A., Vinogradov A.V., Belov P.A., Simovskiy K.R. Solar photovoltaics: current state and trends. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2016, vol. 186, no. 8, pp. 801–852. (Eng. version: *Physics–Uspekhi*, 2016, vol. 59, no. 8, pp. 727–772.)
- [8] Sychev V.V. Nanotechnologies for energy saving: estimate of the major research areas. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2008, no. 6, pp. 118–128.
- [9] Kashkarov P.K., Kazanskiy A.G., Forsh P.A., Emel'yanov A.V. Thin-film solar elements in the past and future. *Priroda*, 2013, no. 12, pp. 56–64.
- [10] Bagratashvili V.N., Baskov A.V., Borshchenko I.A., Ignat'yeva N.Yu., Omel'chenko A.I., Sviridov A.P., Svistushkin V.M., Sobol' E.N., Shekhter A.B. Lazernaya inzheneriya khryashchey [Laser engineering of gristles]. Moscow, Fizmatlit publ., 2006, 488 p.
- [11] Soldatov A.N., Vasil'yeva A.V. Effect of laser resonance ablation in micro- and nanotechnologies. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2008, vol. 312, no. 2, pp. 81–85.
- [12] Amendola V., Meneghetti M. What controls the composition and the structure of nanomaterials generated by laser ablation in liquid solution? *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2013, no. 15, pp. 3027–3046.
- [13] Mafune F., Kohno J., Takeda Y., Kondow T. Full physical preparation of size-selected gold nanoparticles in solution: laser ablation and laser-induced size control. *The journal of physical chemistry*, 2002, vol. 106, no. 31, pp. 7575–7577.
- [14] Starinskiy S.V., Shukhov Yu.G., Bulgakov A.V. Effect of nanoparticle sizes on the extinction spectrum of colloidal solutions produced by laser ablation of gold in water. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 343–346.

**Tyulpanova E.M.** — student, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

**Scientific advisor** — D.M. Melnikov, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser Technologies in Mechanical Engineering, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.