

Особенности и направления развития метода лазерной абляции для синтеза наночастиц

Е. С. Шитова^{1, 2}, Ф. В. Макаров, д. т. н.¹, А. А. Перцев, к. т. н.¹,
А. П. Пономаренко¹, А. А. Штраус¹

УДК 54.057, 54.052 | ВАК 2.2.4

В статье представлен аналитический обзор литературы, касающейся особенностей процесса лазерной абляции для синтеза наночастиц. Показана перспективность метода лазерной абляции, позволяющего обеспечить заданные требования к характеристикам наночастиц. Приведены основные факторы, влияющие на получаемые наночастицы, такие как параметры лазера (источник, длина волны, флюенс, длительность и частота импульса), материал и геометрические характеристики мишени, состояние окружающей среды (жидкость, газовая среда, вакуум). Определены тенденции развития метода.

Ключевые слова: наночастицы, нанотехнологии, лазерная абляция, синтез наночастиц

Введение

Уникальные свойства наночастиц делают их перспективными для применения во многих отраслях промышленности. Для некоторых направлений предъявляются повышенные требования к характеристикам используемых наночастиц: фазовый состав, размер, гранулометрический состав, наличие агломератов, чистота и др. Одним из методов синтеза наночастиц, который способен обеспечить эти требования, является лазерная абляция.

Лазерная абляция – метод, использующий лазер в качестве источника энергии для абляции твердых материалов, так называемых мишеней. В этом процессе большая энергия концентрируется в определенной точке на поверхности твердого тела для испарения поглощающего материала. Термин «абляция» относится к удалению поверхностных атомов и включает в себя не только однофотонный процесс (разрушение химических связей), но и многофотонное возбуждение (термическое испарение). Наночастицы высокой чистоты могут быть получены методом лазерной абляции, поскольку она в основном определяется чистотой мишени

и окружающей среды (газа или жидкости) без загрязнения реактора. Получение наночастиц с помощью лазерной абляции считается «зеленым» методом, так как не сопряжено с нагрузкой на экологию, как, например, различные химические технологии [1]. Однако в традиционном процессе лазерной абляции трудно контролировать распределение размеров, агломерацию и кристаллическую структуру, так как наночастицы образуются при случайном (броуновском) движении молекул. К параметрам, влияющим на характеристики полученных наночастиц, относятся длина волны лазерного излучения, длительность импульса, плотность мощности, состав мишени, внешние условия, такие как состав рабочей среды (газ, жидкость), температура, давление, наличие внешних полей и др. В настоящей статье проведен анализ работ, посвященных процессам получения наночастиц методом лазерной абляции, с 2001 по 2022 год.

Основная концепция лазерной абляции

На рис. 1 представлена схема образования наночастиц методом лазерной абляции. Когда лазерный луч фокусируется на поверхности твердого материала мишени, которая находится в газе или

¹ АО «ВНИИИМ», Москва, Россия.

² ESShitova@bochvar.ru.

жидкости, температура облучаемого пятна резко повышается, и материал мишени испаряется. Столкновения испаряемых атомов и кластеров с окружающими молекулами приводят к их переходу в возбужденное состояние с последующим световым излучением и генерацией электронов и ионов, которые образуют лазерно-индуцированный плазменный факел. Структура плазмы (размер факела и спектр его излучения) зависят от материала мишени, окружающей среды, атмосферного давления и условий работы лазера. Коагуляция является еще одним критическим явлением, которое должно точно контролироваться на более поздних стадиях формирования наночастиц. Поскольку частицы, генерируемые лазером, имеют чистую поверхность, агломерированные частицы создают химические связи в точке контакта, что ухудшает свойства первичных наночастиц [2].

При взаимодействии лазерного излучения с веществом происходит несколько параллельных процессов. К термическим процессам можно отнести испарение, кипение и взрыв. Процесс испарения

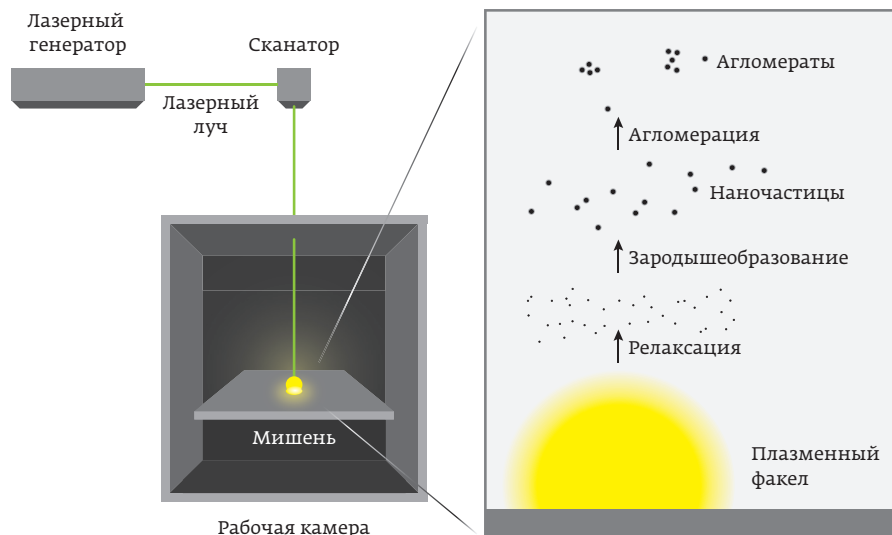


Рис. 1. Схема процесса лазерной абляции для синтеза наночастиц

включает переход от твердой или жидкой фазы материала мишени к паровой фазе за счет эмиссии ионных, атомарных и молекулярных частиц с поверхности. Кипение происходит во время фазового перехода, при котором твердый материал мишени превращается в жидкую фазу, а в материале образуются газовые пузыри, которые удаляют материал с поверхности. Для фазового взрыва требуется температура, близкая к критической температуре кипения, при которой может быть реализован процесс гомогенного зародышеобразования пузырьков пара с использованием наиболее благоприятного теплового эффекта [3, 4].

Нетепловые процессы происходят из-за высокой энергии излучения в единицу времени, что приводит к разрушению мишени, например, откол и фрагментация. При взаимодействии лазерного излучения с веществом возникает механическое напряжение в решетке мишени, что вызывает ударную волну и приводит к образованию трещин в материале мишени и происходит откол (рис. 2). Фрагментация – процесс разложения твердого образца на многочисленные кластеры. Нетепловые процессы являются нежелательными, так как не позволяют контролировать свойства получаемых наночастиц [4, 5].

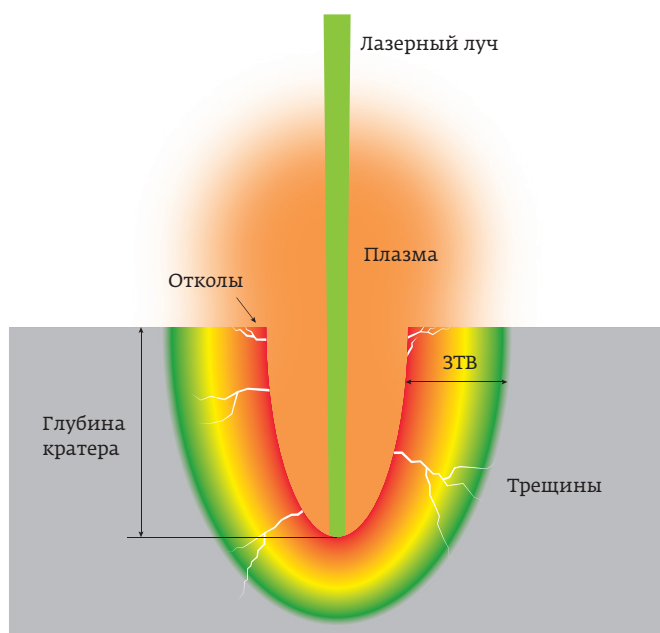


Рис. 2. Схематическое изображение кратера, образованного при лазерной абляции

Влияние лазерного излучения

Для получения наночастиц желаемого размера и структуры выбор лазерного генератора – один из важнейших этапов. Скорость испарения материала мишени определяется параметрами лазера

(источник, длина волны, флюенс, длительность и частота импульса), а эффективность поглощения излучения – материалом мишени, а также состоянием окружающей среды. Энергия лазера на единицу площади материала мишени определяется как флюенс лазера F [2]:

$$F = \frac{I}{A}, \quad (1)$$

где I – энергия импульса лазера, Дж;
 A – площадь лазерного пятна, см².

Обычно для производства наночастиц флюенс должен составлять не менее нескольких Дж/см².

Значимым фактором для синтеза наночастиц является длительность импульса. Фемтосекундные импульсы позволяют быстро оторвать материал от общего объема мишени при небольшом тепловом воздействии на нее. При пикосекундных импульсах уже наблюдаются релаксационные процессы тепла в мишени. Кроме того, плазма может поглотить часть поступающей энергии при длительных импульсах. При этом поступающая энергия будет увеличивать температуру плазмы, что способствует распылению материала [6].

Длина волны является еще одним важным параметром, определяющим эффективность поглощения мишенью. На глубину поглощения и диаметр пятна также влияет длина волны лазера. Обычно она подбирается, исходя из материала мишени (для обеспечения максимального поглощения энергии) и среды (минимальное рассеивание). Кроме того, оптические константы материала зависят от длины волны, металлические наночастицы и мишень могут поглощать энергию лазерного излучения определенных длин волн [7, 8].

Наиболее часто используемые лазеры для получения наночастиц: YAG : Nd с длиной волны 1066 нм и его вторая и третья гармоники – 532 и 355 нм, соответственно; импульсные волоконные лазеры, Ti : Sa лазеры с перестраиваемой длиной волны, в том числе фемтосекундного диапазона.

Итак, две основные характеристики, которые оказывают влияние на лазерную абляцию материалов: параметры лазерного луча (длина волны, длительность импульса и др.) и факторы, касающиеся экспериментальной установки (тип среды и техническое решение). Механизмы и продукты лазерной абляции различаются в зависимости от того, каким лазером производится воздействие: наносекундным, пикосекундным или фемтосекундным [9]. Ширина и глубина кратера – одни из факторов, с помощью которых можно охарактеризовать результаты абляции (рис. 2) [10].

Абляция металлической мишени начинается с поглощения энергии лазерного излучения. При этом происходит образование наночастиц из материалов мишени в различные фазы, зависящие от поглощенной энергии. Лазерная абляция в материале мишени происходит, когда интенсивность лазера достигает порогового значения. Пороговое значение интенсивности для удаления материала (I_{th}) можно записать следующим образом [9]:

$$I_{th} = I_0 \exp\left(\frac{-2G_w^2}{d_b^2}\right), \quad (2)$$

где I_0 – интенсивность лазерного излучения, Вт;
 G_w – глубина кратера, м;
 d_b – диаметр лазерного луча, м.

При этом энергия лазерного излучения должна быть достаточно высокой для образования плазмы и приемлемого уровня абляции. При абляции некоторые термодинамические процессы происходят вблизи поверхности мишени и плазменного факела, что приводит к непостоянству энергии в этой области.

Прогнозирующая модель для глубины кратера может быть выражена следующей формулой [9]:

$$G_w = \left[\gamma \frac{\lambda}{\sqrt{n}} \left(\frac{1}{\alpha} + \sqrt{\frac{4kd_b}{v}} \right) \right]^{1/2} \left[\ln \left(\frac{I_0}{I_{th}} \right) \right]^{1/\beta}, \quad (3)$$

где γ – эмпирический коэффициент (связан со степенью поглощения и формирования плазмы в различных средах);

λ – длина волны излучения, м;

n – показатель преломления материала мишени;

α – коэффициент поглощения материала мишени, м⁻¹;

k – коэффициент температуропроводности материала, м²/с;

v – скорость света в среде, м/с;

β – эмпирический коэффициент (учитывающий такие эффекты, как давление отдачи, плазмозащитный эффект, динамика испарения и многократное отражение лазерного луча в кратере).

Формула определения глубины зоны термического влияния (ЗТВ) может быть записана как [10]:

$$G_{HAZ} = \sqrt{\frac{d_b^2}{8} \left[\ln \left(\frac{I_0}{I_{th}} \right) \right]^{1/\beta} - \frac{G_w}{2}}. \quad (4)$$

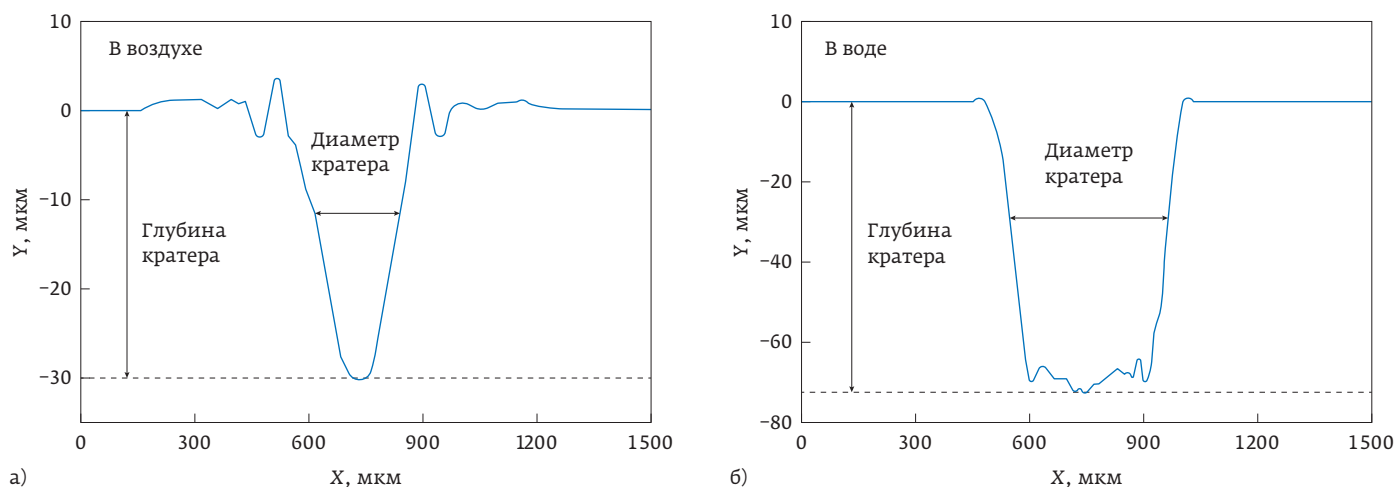


Рис. 3. Профиль области лазерной абляции кремниевой мишени после 1000 импульсов в воздухе (а) и воде (б) [9]

Влияние среды на синтез наночастиц

В процессе лазерной абляции часть энергии лазерного излучения теряется в окружающей среде прежде, чем достигнет материала мишени. Причем потери выше в воде, чем в воздухе (а в воздухе выше, чем в вакууме). Это связано с тем, что при абляции в вакууме отсутствует такое явление, как оптический пробой и ионизация. Кроме того, аблировавшие электроны свободнее рассеиваются в вакууме, а показатель преломления очень низок [9, 11].

В целом, лазерная абляция в газовой среде низкого давления предпочтительна для создания большого факела и хорошо работает при генерации мелких частиц. Лазерная абляция в жидкости применяется для ограничения плазменного факела в малой области до непосредственного рассеивания частиц в жидкой фазе. В любом случае окружающая среда должна быть тщательно подобрана, поскольку частицы, генерируемые лазером, легко вступают в реакцию с окружающими молекулами, образуя такие соединения как оксиды, нитриды и другие, которые могут быть нежелательны или, наоборот, являться целью [2].

Следует отметить, что кратер, сформированный лазерной абляцией в воде и воздухе, имеет существенные отличия. В работе [9] в воде края кратера гладкие, в то время как на воздухе имеются выступы до 3,5 мкм. Кроме того, диаметр кратера и глубина в воде в несколько раз больше, чем на воздухе (рис. 3).

Глубина абляции увеличивается с ростом мощности лазера и сокращением размера пятна. Кроме того, степень абляции значительно уменьшается с увеличением глубины кратера [11].

Окружающая среда (жидкость) формирует условия закалки, порядок которой больше, чем при охлаждении в газе или вакууме, что создает условия для синтеза метастабильных фаз, формирующихся при высоких давлениях и температуре [12].

Синтез наночастиц методом лазерной абляции был впервые применен как альтернатива химическому методу, так как имеется возможность получать более чистый продукт [2]. В зависимости от типа жидкости получают различные наночастицы. Так, например, лазерная абляция олова в воде позволяет получить диоксид олова SnO_2 , в то время как в этаноле получают монокристаллы олова, покрытого гидроксидом олова [13]. Наиболее используемые жидкости при лазерной абляции – вода (чистая, дистиллированная или деионизованная) [14–21], раствор сульфата натрия [22, 23], ацетон [24, 25], спирты [26–32], масла [33–35], жидкий азот [36] и другие растворители и стабилизаторы. В табл. 1 приведены некоторые экспериментальные результаты по получению наночастиц в различных жидкостях.

Лазерная абляция частиц в жидкости считается эффективным способом генерации наночастиц с большим потенциалом, ввиду того что имеется возможность получать различные модификации посредством изменения мишеней и жидкостей.

Перечислим основные отличия лазерной абляции в жидкости от других сред [37]:

- в жидких средах на поверхности раздела «жидкость – твердая фаза» создается плазменный факел;
- химические реакции происходят в экстремальных условиях (высокие температура и давление) на границе раздела «плазма – жидкость»;

Таблица 1. Результаты исследований влияния длины волны и флюенса на получение наночастиц в жидкостях

Жидкость	Длина волны, нм	Мишень	Флюенс, Дж/см ²	Размер наночастиц, нм
Деионизированная вода [15]	1064	Молибден	4,2	От 20 до 100
Деионизированная вода [16]	355, 532 и 1064	Палладий	9, 13 и 20	От 3,5 до 9
Деионизированная вода [18]	355, 532 и 1064	Золото	10–50	10, 20 и 25
Водный раствор сульфата натрия [22]	1064	Олово	12	65
Ацетон [25]	1064 и 532	Серебро	14–22	От 13 до 186
Метанол [30]	1064	Цинк	1	От 5 до 18
Этанол [32]	800	Железо	–	От 2 до 6

- время релаксации плазменного факела в жидкости много меньше, чем в газе и вакууме.

Отметим преимущества лазерной абляции в жидких средах по сравнению с другими методами (на примере химических):

- простое и чистое производство, так как процесс не нуждается в катализаторе и других побочных продуктах;
- не требуется создание экстремальных температуры и давления;
- за счет окружающей среды имеется возможность получения метастабильных наночастиц, наночастиц новых модификаций и биматериалов [38].

Другим преимуществом жидкости является то, что ее можно использовать для сбора наработанного материала. Кроме того, коллоидные растворы наночастиц обладают большей стабильностью по сравнению с нанопорошком и могут использоваться как самостоятельный продукт.

Влияние внешних полей при лазерной абляции в жидкости

Так как при плотности энергии лазерного излучения выше определенного уровня образуется плазма из заряженных частиц – ионов и электронов, на них воздействуют внешние электрические и магнитные поля, оказывая влияние на кинетику реакций на границе раздела «плазма – жидкость» и на конденсацию наночастиц. Помимо этого, наночастицы, полученные методом лазерной абляции в жидкости, обладают отрицательным зарядом [39], и приложение внешнего электрического поля во время или после генерации может повлиять на их размер и морфологию [39, 40].

Приложение внешнего электрического поля при лазерной абляции в жидкости также может привести

к образованию наночастиц, обладающих метастабильным фазовым составом (рис. 4) и которые невозможно получить при нормальных условиях [40].

При лазерной абляции в жидкости при наложении внешнего магнитного поля процесс становится более сложным из-за движения заряженных частиц под действием силы Лоренца. Также магнитное поле влияет на структуру и динамику плазменного факела, увеличивая его светимость и скорость частиц [41].

Другая цель применения электрического и магнитного полей – повышение производительности синтеза наночастиц в жидкости [42–43].

Влияние геометрических параметров мишени

Основное ограничение применения метода лазерной абляции в промышленности – низкая производительность [1]. Несколько групп ученых решают задачу масштабирования технологии получения наночастиц методом лазерной абляции металлических мишеней в жидкостях [44–46]. Влияние параметров лазерного излучения было рассмотрено ранее. Геометрические

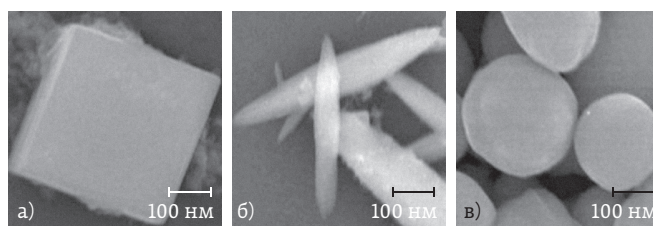


Рис. 4. СЭМ-изображения наночастиц GeO₂, полученных при лазерной абляции: а – во внешнем электрическом поле при разности потенциалов 14,5 В; б – при 32 В; в – без приложения внешнего поля [40]

параметры мишеней – еще один фактор, оказывающий серьезное влияние на производительность.

В работе [44] рассмотрено влияние на процесс абляции различных конфигураций: толщина мишени (фольга, проволока), размер диаметра пятна на мишени (за счет применения масок), площадь боковой поверхности мишени.

Обнаружено, что толщина мишени влияет на средний размер частиц. Кроме того, разброс по дисперсности уменьшается при ограничении геометрии образца в поперечном направлении или при уменьшении лазерного пятна.

При изменении геометрических параметров мишени изменяется механизм формирования наночастиц, так как на него оказывает влияние глубина аблированного слоя внутри объема мишени и пространственно-временной градиент температуры в материале.

Отмечено, что при одних и тех же параметрах лазерного излучения и окружающей среды производительность до 12 раз выше при воздействии на тонкую боковую грань мишени, чем при использовании объемного образца.

В качестве мишеней в работах [45–47] использована проволока. Показано, что формирование и динамика

кавитационного пузыря отличается от объемного, что позволяет увеличить производительность наночастиц до 15 раз при тех же характеристиках лазерного излучения.

Заключение

Проведенный анализ литературы показал большой интерес исследователей к методам получения наночастиц лазерной абляцией различных металлов и их соединений. Основными направлениями развития метода являются контроль получаемых наночастиц (их размер, форма, фазовый и гранулометрический составы, метастабильные фазы) и коллоидных растворов на их основе (стабильность коллоидов), повышение производительности синтеза. Успешное решение этих задач позволит ускорить прогресс в области нанотехнологий и внедрение наноматериалов в различные отрасли промышленности.

Литература/References

1. Sportelli M. C. et al. The pros and cons of the use of laser ablation synthesis for the production of silver nano-antimicrobials. *Antibiotics*. 2018. 7. 3.
2. Kim M. et al. Synthesis of Nanoparticles by Laser Ablation: A Review. *KONA Powder and Particle Journal*. 2017; 34(34): 80–90.



**ПЕТЕРБУРГСКАЯ
ТЕХНИЧЕСКАЯ
ЯРМАРКА**

ДЕЛОВАЯ ПРОГРАММА:

- САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПРОМЫШЛЕННЫЙ КОНГРЕСС
- КОНФЕРЕНЦИЯ «КРЕПЕЖ. КАЧЕСТВО И ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»
- БИРЖА ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ



18–20

**АПРЕЛЯ
2023**

КВЦ «ЭКСПОФОРУМ»
Петербургское шоссе, 64

+7 965 772 7759 | a.ilina@restec.ru | +7 929 106 2738 | v.zudina@restec.ru | ptfair.ru

3. Shugaev M. V. et al. Laser-Induced Thermal Processes: Heat Transfer, Generation of Stresses, Melting and Solidification, Vaporization, and Phase Explosion. *Handbook of Laser Micro- and Nano-Engineering*. 2020. PP. 1–81.
4. Li X., Guan Y. Theoretical fundamentals of short pulse laser-metal interaction: A review. *Nanotechnology and Precision Engineering*. 2020; 3(3): 105–125.
5. Paltauf G., Dyer P.E. Photomechanical processes and effects in ablation. *Chem Rev*. 2003; 103(2): 487–518.
6. Phillips K. C. et al. Ultrafast laser processing of materials: a review. *Adv Opt Photonics*. 2015 7(4): 684–712.
7. Tsuji T. et al. Preparation of metal colloids by a laser ablation technique in solution; Influence of laser wavelength on the ablation efficiency (II). *J Photochem Photobiol A: Chem*. 2001; 145(3): 201–207.
8. Ash C. et al. Effect of wavelength and beam width on penetration in light-tissue interaction using computational methods. *Lasers Med Sci*. 2017; 32(8): 1909–1918.
9. Hamad A.H. et al. Laser Ablation in Different Environments and Generation of Nanoparticles. *Applications of Laser Ablation – Thin Film Deposition, Nanomaterial Synthesis and Surface Modification*. IntechOpen, 2016.
10. Tangwarodomnukun V. Overflow-assisted laser machining of titanium alloy: surface characteristics and temperature field modeling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017; 88 (1–4): 147–158.
11. He Z. et al. Study of the aluminum ablation features and spectral intensity at a various sample temperature in vacuum environment. *Spectrochim Acta Part B At Spectrosc*. 2022; 197: 106530.
12. Semaltianos N. G. Nanoparticles by Laser Ablation of Bulk Target Materials in Liquids. *Handbook of Nanoparticles*. 2015; PP. 1–22.
13. Musaev O. et al. Influence of the liquid environment on the products formed from the laser ablation of tin. *Applied Physics A*. 2013; 113(2): 355–359.
14. Giorgetti E. et al. TiO₂ nanoparticles obtained by laser ablation in water: Influence of pulse energy and duration on the crystalline phase. *J Alloys Compd*. 2015; 643(S1): S75–S79.
15. Zamora-Romero N. et al. Synthesis of molybdenum oxide nanoparticles by nanosecond laser ablation. *Mater Chem Phys*. 2020; Vol. 240.
16. Kim J. et al. The influence of laser wavelength and fluence on palladium nanoparticles produced by pulsed laser ablation in deionized water. *Solid State Sci*. 2014; 37: 96–102.
17. Singh A. et al. Effect of Laser Power on Yield of TiO₂ Nanoparticles Synthesized by Pulsed Laser Ablation in Water. *Journal of Ceramic Science and Technology*. 2017; 8(1): 39–44.
18. Torrisi L., Torrisi A. Laser ablation parameters influencing gold nanoparticle synthesis in water. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2018; 173(9–10): 729–739. <https://doi.org/10.1080/10420150.2018.1528598>
19. Barreca F. et al. Tungsten trioxide (WO₃ - X) nanoparticles prepared by pulsed laser ablation in water. *Mater Chem Phys*. 2011; 127(1–2): 197–202.
20. Rafique M. et al. Laser ablation synthesis of silver nanoparticles in water and dependence on laser nature. *Opt Quantum Electron*. 2019; 51(6): 1–11.
21. Mintcheva N. et al. Laser-Ablated ZnO Nanoparticles and Their Photocatalytic Activity toward Organic Pollutants. *Materials (Basel)*. 2018; 11(7). <https://doi.org/10.3390/ma11071127>.
22. Ismail R. A. et al. Pulsed Laser Ablation of Tin Oxide Nanoparticles in Liquid for Optoelectronic Devices. *Silicon*. 2021; 13(9): 3229–3237.
23. Sharif M., Dorrani D. Effect of NaCl Concentration on Silver Nanoparticles Produced by 1064 nm Laser Ablation in NaCl Solution. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*. 2015; 606(1): 36–46.
24. Giorgetti E. et al. Stable gold nanoparticles obtained in pure acetone by laser ablation with different wavelengths. *Journal of Nanoparticle Research*. 2012; 14(1).
25. Solati E., Mashayekh M., Dorrani D. Effects of laser pulse wavelength and laser fluence on the characteristics of silver nanoparticle generated by laser ablation. *Appl Phys A Mater Sci Process*. 2013; 112(3): 689–694.
26. Baladi A., Mamoori R. S. Study on wavelength and energy effects on pulsed laser ablation synthesis of aluminum nanoparticles in ethanol. 5th International Conference on MEMS NANO, and Smart Systems, ICMENS 2009. *IEEE Computer Society*. 2009; PP. 218–221.
27. Aziz W.J., Ali S. Q., Jassim N. Z. Production TiO₂ Nanoparticles Using Laser Ablation in Ethanol. *Silicon*. 2018; 10(5): 2101–2107.
28. Thongpool V., Asanithi P., Limsuwan P. Synthesis of Carbon Particles using Laser Ablation in Ethanol. *Procedia Eng*. 2012; 32: 1054–1060.
29. Zhang J., Lan C. Q. Nickel and cobalt nanoparticles produced by laser ablation of solids in organic solution. *Mater Lett*. 2008; 62(10–11): 1521–1524.
30. Farahani S.V., Mahmoodi A., Goranneviss M. The effect of laser environment on the characteristics of ZnO nanoparticles by laser ablation. *Int Nano Lett*. 2016; 6(1): 45–49.
31. Shalichah C., Khumaeni A. Synthesis of nickel nanoparticles by pulse laser ablation method using Nd: YAG laser. *J Phys Conf Ser*. 2018; 1025(1): 012002.
32. Santillán J.M.J. et al. Optical and Magnetic Properties of Fe Nanoparticles Fabricated by Femtosecond Laser Ablation in Organic and Inorganic Solvents. *ChemPhysChem*. 2017. 18(9): 1192–1209.
33. Huy Tran Q. et al. Preparation of Silver Nanoparticles Dispersed in Almond Oil Using Laser Ablation Technique. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2020; 762(1): 012005.
34. Flores-Castañeda M. et al. Bismuth nanoparticles synthesized by laser ablation in lubricant oils for tribological tests. *J Alloys Compd*. 2015; 643(S1): S67–S70.
35. Sadrolhosseini A.R., Abdul Rashid S., Zakaria A. Synthesis of Gold Nanoparticles Dispersed in Palm Oil Using Laser Ablation Technique. *J Nanomater*. 2017; 12:1–5.
36. Wang Z. et al. The effect of target size on α -Fe nanoparticle preparation by pulsed laser ablation. *Appl Phys A Mater Sci Process*. 2009; 97(3): 683–688.
37. Yang G. W. Laser ablation in liquids: Applications in the synthesis of nanocrystals. *Prog Mater Sci*. 2007; 52(4): 648–698.
38. Azevedo W. M. de et al. Laser Ablation in Liquid: An Unconventional, Fast, Clean and Straightforward Technique for Material Preparation. *Applications of Laser Ablation – Thin Film Deposition, Nanomaterial Synthesis and Surface Modification*. IntechOpen, 2016.
39. Sylvestre J. P. et al. Surface chemistry of gold nanoparticles produced by laser ablation in aqueous media. *Journal of Physical Chemistry B*. 2004; 108(43): 16864–16869.
40. Lau Truong S. et al. Generation of Ag nanospikes via laser ablation in liquid environment and their activity in SERS of organic molecules. *ApPhA*. 2007; 89(2): 373–376.
41. Liu P. et al. Controllable Fabrication and Cathodoluminescence Performance of High-index Facets GeO₂ Micro- and Nanocubes and Spindles upon Electrical-field-assisted Laser Ablation in Liquid. *Journal of Physical Chemistry C*. 2008; 112(35): 13450–13456.
42. Harilal S.S. et al. Confinement and dynamics of laser-produced plasma expanding across a transverse magnetic field. *Phys Rev E*. 2004; 69(2): 026413.
43. Mozaffari H., Mahdieh M.H. Enhancement of ablation rate and production of colloidal nanoparticles by irradiation of metals with nanosecond pulsed laser in presence of external electric field. *Phys Lett A*. 2019; 383(7): 646–654.
44. Scaramuzza S., Zerbetto M., Amendola V. Synthesis of gold nanoparticles in liquid environment by laser ablation with geometrically confined configurations: Insights to improve size control and productivity. *Journal of Physical Chemistry C*. 2016; 120(17): 9453–9463.
45. Rhim J. W. et al. Preparation and characterization of chitosan-based nanocomposite films with antimicrobial activity. *J Agric Food Chem*. 2006; 54(16): 5814–5822.
46. Liu X. et al. Noble metal-metal oxide nanohybrids with tailored nanostructures for efficient solar energy conversion, photocatalysis and environmental remediation. *Energy & Environmental Science*. 2017; 10(2): 402–434.
47. Kohsakovski S. et al. High productive and continuous nanoparticle fabrication by laser ablation of a wire-target in a liquid jet. *Appl Surf Sci*. 2017; 403: 487–499.

Статья поступила в редакцию 14.01.2023
Принята к публикации 15.02.2023



2023

5-7 апреля

Казахстан, Атырау



ATYRAU
OIL & GAS KAZAKHSTAN

20-я Юбилейная Северо-Каспийская
региональная выставка

*20 лет
успеха*

«Атырау Нефть и Газ»



Подробная информация:
www.oil-gas.kz



kioge.kz



kiogekazakhstan

