

Влияние положения поверхности образца относительно фокальной плоскости оптической системы на эффективность выхода наночастиц ZnS при лазерной абляции

© А.В. Харькова, Д.А. Кочуев, А.А. Вознесенская, К.С. Хорьков

Владимирский государственный университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, 600024 Владимир, Россия

E-mail: alenaenergje@gmail.com

Поступила в Редакцию 5 мая 2025 г.

В окончательной редакции 24 июня 2025 г.

Принята к публикации 24 июня 2025 г.

Исследован процесс синтеза наночастиц сульфида цинка при различном положении обрабатываемой поверхности относительно фокальной плоскости оптической системы. Получена зависимость производительности абляционной обработки в зависимости от положения фокальной плоскости оптической системы относительно обрабатываемой поверхности. Наиболее эффективный режим абляции наблюдается в случае положения фокальной плоскости ниже обрабатываемой поверхности образца, при котором достигается масса удаляемого материала 100 мг в течение 75 мин, что, как минимум, в 2 раза эффективнее обработки в фокусе.

Ключевые слова: абляционный синтез наночастиц, управление дисперсностью наночастиц.

DOI: 10.61011/FTP.2025.06.61566.8103

1. Введение

Использование субпикосекундных лазерных импульсов для получения наночастиц является эффективным инструментом. Тонкая настройка параметров лазерной абляции позволяет эффективно влиять на свойства получаемых наночастиц. Основными факторами, влияющими на свойства получаемых наночастиц при лазерной абляции, являются среда обработки и плотность мощности лазерного луча [1–3]. Цель исследования — изучение процесса синтеза наночастиц при различном положении обрабатываемой поверхности относительно фокальной плоскости оптической системы.

2. Образцы и методика исследования

Для проведения серии экспериментов в работе была использована субпикосекундная лазерная система с длиной волны 1030 нм, длительностью импульса 280 фс и частотой следования импульсов 10 кГц. В качестве образца был использован CVD-ZnS. Эксперименты проведены в среде инертного газа аргона. Область обработки составляла 16 на 16 мм, растр на обрабатываемой поверхности формировался линиями шириной 50 мкм, плотность расположения линий 100 линий/мм, скорость перемещения луча была равна 1000 мм/с. Цикл получения одной пробы составлял 75 м, что соответствует времени получения минимально достаточного количества порошкового материала для его исследования за наименьший временной промежуток. Сбор наночастиц был осуществлен при помощи электрофильтра, осаждение происходило на электроды. Исследование эффективности выхода материала проводилось путем взвешивания образца до и после абляции на весах марки OHAUS

ADVENTUR CRAR, погрешность не превышала 1 %. В процессе получения наночастиц энергия в импульсе составляла 50 мкДж, погрешность изменения мощности лазерного излучения в процессе абляции не превышала 0.5 %.

Облучение поверхности сульфида цинка с изменением положения относительно фокальной плоскости лазерного луча схематично представлено на S1, S2 и S3 — положение поверхности облучаемого образца относительно фокальной плоскости объектива. На рис. 1 представлена схема процессов при фемтосекундной лазерной абляции, где 1 — облако аблированных наночастиц, 2 — область воздействия лазерного луча, 3 — обрабатываемый образец поликристаллического сульфида цинка, 4 — лазерный эрозионный факел и плазменный канал при оптическом пробое аргона, 5 — плазменный канал, образованный в результате пробоя аргона и попадающих в него аблированных наночастиц; приняты следующие обозначения: d — диаметр пятна, E — энергия в импульсе. Серыми прямоугольниками обозначены процессы, не характерные для рассматриваемого состояния системы, зелеными обозначены процессы, протекающие при обработке поверхности сульфида цинка ультракороткими лазерными импульсами согласно зонам обработки S1-S3. Положение плоскостей (S1, S2 и S3) отличается расположением поверхности образца относительно фокальной плоскости объектива по оси z . Плоскость S1 подразумевает расположение поверхности обрабатываемого образца ZnS на 20 мм выше области каустики. Лазерный луч распространяется через аргон, не вызывая процессов плазмообразования и филаментации при энергиях, не превышающих лучевую стойкость среды [4]. Достигая поверхности ZnS, плотность мощности лазерного излучения превышает порог абляции материала, наблюдает-

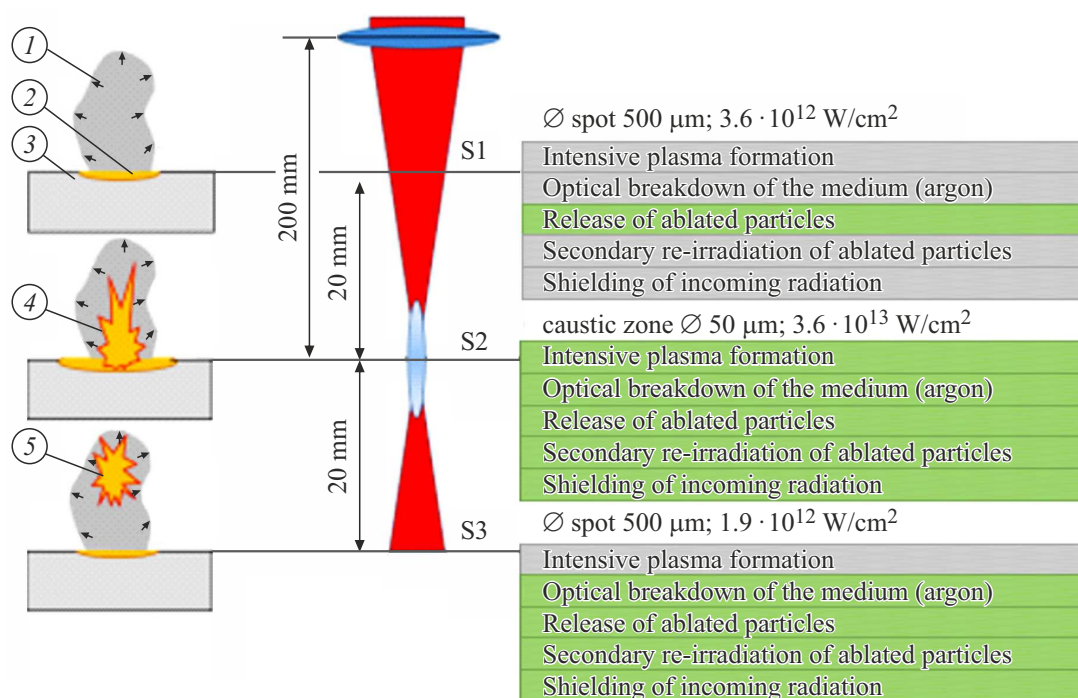


Рис. 1. Схема расположения поверхности облучаемого образца относительно каустики лазерного пучка.

ся выброс наночастиц без возникновения оптического пробоя среды и интенсивного плазмообразования, что позволяет избавиться от значительного экранирования луча и воздействия лазерного эрозионного факела на продукты абляции.

Обработка в плоскости S2 представляет собой фокусировку на поверхность образца непосредственно в области перетяжки пучка, в данной точке сосредоточено наибольшее количество энергии, $\sim 3.4 \text{ Дж/см}^2$. В данном положении наблюдается образование оптического пробоя и выраженный эрозионный факел в зоне воздействия лазерного излучения, что в совокупности приводит к экранированию лазерного луча, способствует снижению эффективности абляции. В плоскости S3 область перетяжки расположена выше поверхности образца, при этом оптический пробой/плазмообразование имеют место над поверхностью образца. Негативным эффектом является снижение мощности лазерного излучения, доходящего до поверхности образца через область оптического пробоя, происходит выраженное переоблучение при попадании аблированных наночастиц в область каустики. Таким образом, условия обработки в области S1 являются наиболее подходящими для повышения эффективности процесса абляции, так как позволяют избежать экранирования излучения вследствие образования плазмы, повторного переоблучения наночастиц, теплового воздействия плазмы. Основные процессы можно разделить на 4 стадии. Первая стадия соответствует времени передачи энергии фотонов электронной подсистеме, происходит процесс много-

фотонного поглощения [5–7]. Вторая стадия включает в себя процесс передачи энергии электронов ионам, характерные временные масштабы до 10^{-12} с [6,8]. Формирование парогазового облака и его расширение сопровождается фазовым взрывом, в среднем стадия длится до 10^{-10} с [5,9]. Процесс конденсации молекул из парогазового облака связан с образованием первоначальных частиц — зародышей, которые формируются до 10^{-9} с . Разлет продуктов абляции характеризуется взаимодействием частиц с буферным газом (столкновения с последующей потерей энергии) [6,9], в том числе при сохранении достаточной температуры поверхности возможна агрегация наночастиц.

Таким образом, в зависимости от положения фокуса будет меняться не только значения плотности энергии, но и физические процессы, протекающие во время воздействия.

3. Результаты и обсуждение

На основании полученных данных была получена зависимость количества удаляемого материала от положения фокуса лазерного луча (рис. 2). График, представленный на рис. 2, строился на основании данных по удаленному материалу. На рис. 2 можно заметить нелинейную зависимость, красной пунктирной линией отмечена область, соответствующая положению фокуса. Зеленые треугольники соответствовали результатам первого эксперимента, для оценки достоверности результатов были выборочно проведены дополнительные серии

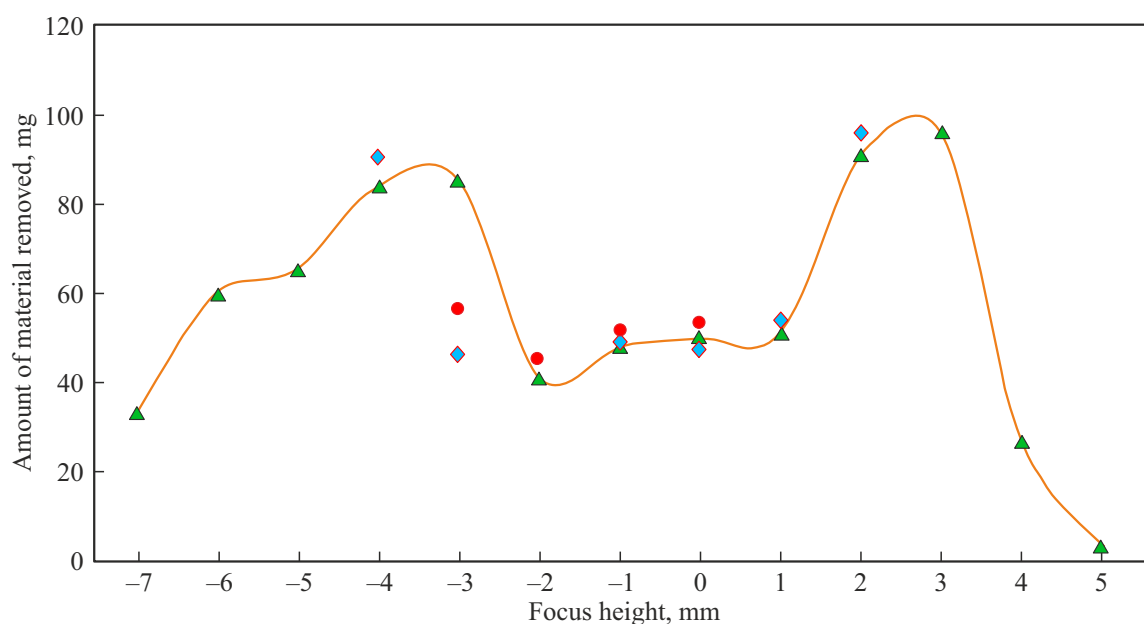


Рис. 2. Зависимость удаляемой массы от положения фокуса лазерного луча при абляции сульфида цинка.

экспериментов (отмечены синими ромбами и красными кружками). Учитывая их наложение друг на друга с минимальной погрешностью, можно говорить о воспроизводимости эксперимента. Наиболее эффективный режим абляции наблюдается в случае, когда фокус лазерного излучения находится в глубине образца. Данный факт можно объяснить следующим образом. При положении фокуса выше поверхности образца происходит оптический пробой среды, возникает плазменный факел, при этом энергии достаточно для запуска процесса абляции материала. Частицы, которые вылетают с поверхности, активно взаимодействуют с плазмой. Плазменный факел экранирует часть падающего лазерного излучения, что снижает эффективность процесса абляции. При фокусировании в глубине образца образование плазменного факела не наблюдается, что связано с недостаточностью энергии для пробоя среды, одновременно с этим энергии хватает на процесс абляции материала, вылетевшие частицы свободно покидают зону обработки, не препятствуя вновь поступающему лазерному импульсу, что позволяет сохранять высокую эффективность абляции во время полного цикла обработки.

Результаты эксперимента согласуются с научными результатами, описанными в статье [3], где авторы сообщают о том, что максимальные параметры абляции достигаются при размещении образца вне фокуса. В то же время [2] взаимодействие между плазменным факелом и пространственным распределением энергии лазера зависит от расстояний от фокальной точки до поверхности образца. Это расстояние оказывает важное влияние на динамику расширения и оптическое излучение плазменного факела, что является следующим

этапом исследований в рамках проводимой экспериментальной работы.

4. Заключение

Обработка с параметрами плотности мощности, превышающей порог абляции и не превышающей порог плазмообразования, позволяет эффективно синтезировать наночастицы. Помимо исключения воздействия эффектов, связанных с плазмообразованием, осуществляется эффективный выброс частиц в процессе абляции. Данное заключение подтверждается проведенными исследованиями и наглядно представлено в виде полученной зависимости. Наиболее эффективным режимом является фокусирование луча вглубь образца, достигается масса удаляемого материала 100 мг в течение 75 мин, что, как минимум, в 2 раза эффективнее обработки в фокусе.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 25-22-20075.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] K.A. Elsayed, H. Imam, M.A. Ahmede, R. Ramadan. Opt. Laser Techn., **45**, 495 (2013).
- [2] D. Zhang, A. Chen, Q. Wang, W. Xu, Y. Wang, S. Li, Yu. Jiang, M. Jin. Optik, **202**, 163511 (2020).

- [3] D. Sola, J.I. Peña. *Materials*, **11**, 5302 (2013).
- [4] Ю.П. Райзер. Соросовский образовательный журнал, **1**, 89 (1998).
- [5] J Xinxin Li, Yingchun Guan. *Nanotechnol. Precis. Eng.*, **3**, 105 (2020). DOI: 10.1016/j.npe.2020.08.001
- [6] M. Spellauge, C. Doñate-Buendía, S. Barcikowski, B. Gokse, H.P. Huber. *Light: Sci. Appl.*, **11** (1), 68 (2022). DOI: 10.1038/s41377-022-00751-6
- [7] A.Y. Petit, G. Papon, M. Richardson, Lionel Canioni. *Opt. Mater. Express*, **1**, 866 (2011). DOI: 10.1364/OME.1.000866.
- [8] A. Hu, Y. Zhou, W.W. Duley. *The Open Surface Sci. J.*, **3**, 42 (2011). DOI: 10.2174/1876531901103010042
- [9] B. Kim, H.-K. Nam, Y.-J. Kim, S.-W. Kim. *Metals*, **11**, 1586 (2011). DOI: 10.3390/met11101586

Редактор Г.А. Оганесян

Effect of the position of the sample surface relative to the focal plane of the optical system on the efficiency of the ZnS nanoparticle yield during laser ablation

A.V. Kharkova, D.A. Kochuev, A.A. Voznesenskaya, K.S. Khorkov

Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov,
600024 Vladimir, Russia

Abstract The process of synthesis of zinc sulfide nanoparticles at different positions of the treated surface relative to the focal plane of the optical system is investigating. The dependence of the ablation treatment performance is obtaining depending on the position of the focal plane of the optical system relative to the treated surface. The most effective ablation mode is observing in the case of the position of the focal plane below the treated surface of the sample, at which the mass of the removed material is 100 mg within 75 minutes, which is at least 2 times more effective than processing at the focus.