

УДК 535; 53.083  
EDN: PVXZSX

PACS: 79.20.Eb, 42.60.Jf



## Метод измерения плотности энергии сфокусированного пучка импульсного лазерного излучения

В. Ю. Железнов, Т. В. Малинский, С. И. Миколуцкий, В. Е. Рогалин, С. А. Филин

*Описан метод определения плотности энергии (мощности) импульсного лазерного излучения при введении эталонного материала в оптическую плоскость обработки, что позволяет исключить влияние физико-химических свойств исследуемых материалов. Параметры сфокусированного лазерного пучка определялись при измерении энергии, поглощенной эталоном, и площади пятна облучения, оставшегося на нем после взаимодействия с лазерным пучком. В случае разрушения исследуемого образца остается возможность определения плотности энергии (мощности) воздействующего лазерного излучения. Данный метод может быть применен в области исследования взаимодействия лазерного излучения с веществом, в частности, определения оптической стойкости (прочности) материалов.*

*Ключевые слова:* лазер, наносекундный импульс, площадь пятна облучения, плотность энергии лазерного излучения, оптическая стойкость.

DOI: 10.51368/1996-0948-2024-1-38-42

### Введение

Лазерные системы нашли широкое применение в самых разнообразных областях науки и техники, например, при исследовании взаимодействия лазерного излучения с веществом, в частности, при микро- и наноструктурировании поверхности металлов и полупроводников [1–3]. Размеры пятна облучения на обрабатываемом материале зависят не только от параметров лазерного луча (энергия

и расходимость) и характеристик фокусирующей линзы, но и от физико-химических свойств материала, на котором производится регистрация площади зоны воздействия. Несмотря на то, что измерению плотности энергии (мощности) излучения посредством определения диаметра лазерного пучка посвящено много работ, например, [4–6, 10], данная задача все равно является актуальной [11–16].

Существуют системы измерения пятна облучения с использованием ПЗС-матрицы [4, 5], которые позволяют измерять микропятна диаметром от 1 до 10 мкм. Однако существенная проблема таких систем состоит в том, что матрицы обладают высокой чувствительностью в видимой области и меньшей в УФ- и ИК-диапазонах, хотя при регистрации размеров пучка матрица быстрее реагирует на интенсивность излучения.

При проведении силовых воздействий на материалы, что необходимо при создании лазерных технологий их обработки сфокусированным излучением, проблемой таких систем

---

Железнов Вячеслав Юрьевич, н.с.  
Малинский Тарас Владимирович, зав. лаб., к.т.н.  
Миколуцкий Сергей Иванович, в.н.с., к.ф.-м.н.  
Рогалин Владимир Ефимович, зав. лаб., д.ф.-м.н.  
E-mail: v-rogalin@mail.ru  
Филин Сергей Александрович, в.н.с., к.т.н.  
Институт электрофизики и электроэнергетики РАН.  
Россия, 191186, Санкт-Петербург,  
Дворцовая набережная, 18.

Статья поступила в редакцию 8.11.2023

Принята к публикации 1.12.2023

Шифр научной специальности: 1.3.19.

---

© Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филин С. А., 2024

является их сложность, что не позволяет использовать их непосредственно во время эксперимента, так как крайне затруднительно поддерживать в одной плоскости поверхности измерителя пучка и исследуемого образца.

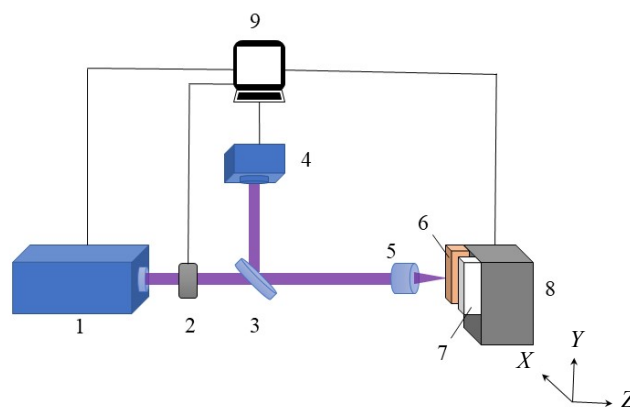
Часто, для измерения размера пятна используют фотографические методы, при которых размеры фокального пятна определяются путем измерения диаметра экспонируемого участка на фотобумаге или пленке. Однако эти методы не подходят для высокоинтенсивного излучения и малых пятен, размер которых порядка сотни и менее микрон [4].

Измерение размеров пятен различной плотности энергии, непосредственно, по площади пятна на поверхности исследованного образца, подвергшейся воздействию лазерного излучения, не во всех случаях целесообразно из-за возможного катастрофического разрушения образца (при превышении порога прочности соответствующего материала).

Недостатком вышеперечисленных методов является также погрешность измерения, обусловленная влиянием физико-химических свойств обрабатываемого материала на величину измеряемой площади пятна облучения. С целью повышения достоверности измерения плотности энергии лазерного излучения в настоящей работе предложена методика, исключающая указанные недостатки и повышающая достоверность сопоставления результатов воздействия интенсивного лазерного излучения на различные материалы.

### Методика эксперимента

На рисунке 1 представлена схема измерения плотности энергии импульсного лазерного излучения. Излучение лазера 1 проходит через затвор 2 и попадает на кварцевую светоделительную пластину 3, где, затем, отражаясь, одна часть пучка падает на счетчик энергии 4, а другая его часть посредством оптической системы 5 фокусируется на поверхности образца 6. Образец 6 и эталон 7 закреплены с помощью устройства крепления образцов на трёхкоординатной системе позиционирования 8. Все устройства управляются и обрабатываются компьютером 9.



*Рис. 1. Схема измерения плотности энергии импульсного лазерного излучения: 1 – лазер; 2 – затвор; 3 – светоделитель; 4 – счетчик энергии; 5 – оптическая система; 6 – образец; 7 – эталон; 8 – трехкоординатная система позиционирования; 9 – компьютер управления и обработки данных*

Устройство для крепления образцов представлено на рис. 2. Его задача – обеспечение расположения исследуемых поверхностей образца и эталона в одной плоскости. Это приспособление может выглядеть различным образом вследствие различия размеров исследуемых образцов и быть изготовлено из разных материалов (оптимальнее всего будет использование аддитивных технологий для печати устройства для крепления, так как при этом существует возможность создания крепления под конкретный образец и эталон). Основным элементом устройства является основание 1, которое крепится к автоматизированному трехкоординатному столику. Оно обеспечивает посадочную плоскость, к которой прижимаются исследуемый образец 2 и эталон 3. Образец 2 фиксируется на основании прижимной пластиной 4.

Благодаря тому, что обрабатываемые поверхности элементов 2 и 3 лежат в одной плоскости, измерения проводятся следующим образом:

- 1) обрабатываемый образец и пластина для калибровки помещаются на устройство для крепления образцов;
- 2) для заданных значений энергии лазерных импульсов проводится обработка эталона;
- 3) эталон снимается, на нем проводятся измерения пятен облучения от лазерной обработки, и по методике, представленной ниже, определяется характерный размер сечения лазерного пучка в плоскости образца;

4) при заданных плотностях энергии проводится обработка поверхности исследуемого образца.

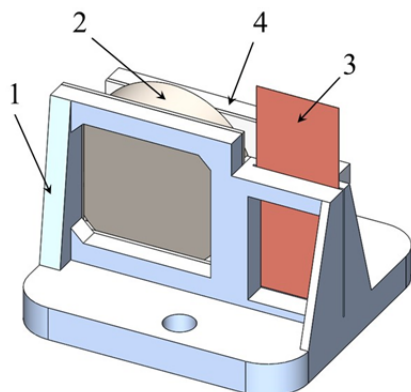


Рис. 2. Устройство крепления образцов: 1 – основание; 2 – исследуемый образец; 3 – эталон; 4 – прижим

### Методика измерения диаметра лазерного пучка

Для расчета размеров лазерного пучка по пятнам облучения используется методика, описанная в [8, 9]. Суть ее заключается в том, что распределение энергии  $E(r)$  в поперечном сечении пучка может быть описано следующим образом:

$$E(r) = E_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (1)$$

где  $E_0$  – энергия в центре лазерного пучка,  $r_0$  – радиус сечения лазерного пучка,  $r$  – расстояние от центра пучка. Для нескольких лазерных импульсов обе части уравнения (1) необходимо умножить на количество импульсов.

При воздействии излучения с энергией выше некоторого порогового уровня ( $E_{\text{пор}}$ ) на поверхности обрабатываемого материала остается след в виде пятна облучения, радиус которого будет определяться выражением:

$$E_{\text{пор}} = E_0 \exp\left(-\frac{r_{\text{пор}}^2}{r_0^2}\right), \quad (2)$$

где  $r_{\text{пор}}$  – радиус пятна облучения.

Как указано выше, в методике измерения сечения лазерного пучка требуется обработать эталонный материал для различных значений

энергии в импульсе  $E_i = E_1, E_2, \dots, E_n; i = 1, \dots, n$  и получить ряд пятен с размерами  $r_1, r_2, \dots, r_n$ . Для каждого пятна можно записать выражение:

$$E_i = E_0 \exp\left(-\frac{r_i^2}{r_0^2}\right). \quad (3)$$

Разделив обе части уравнения (3) на  $E_0$ , учитывая, что  $S_i = \pi r_i^2$  и  $S_0 = \pi r_0^2$ , путем несложных преобразований получаем:

$$S_i = S_0 \ln(E_0) - S_0 \ln(E_i). \quad (4)$$

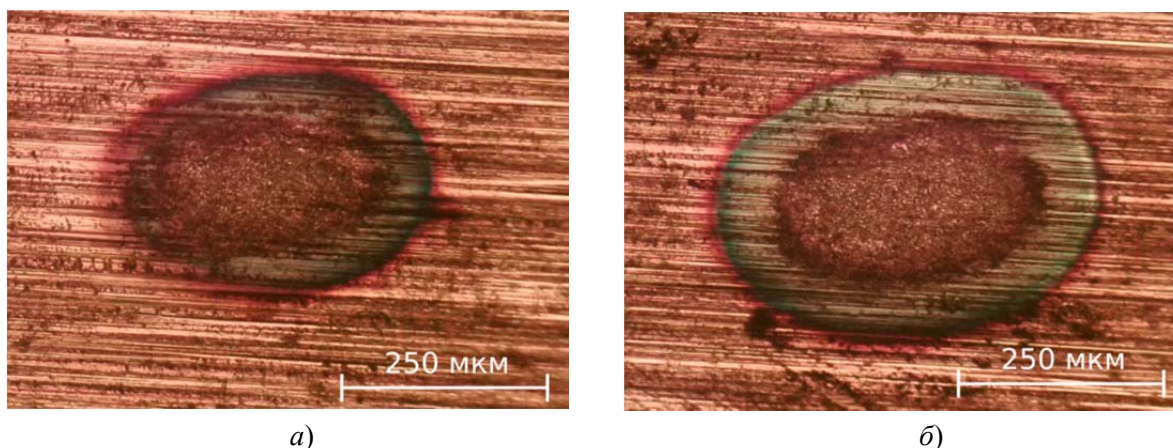
Если построить график зависимости площади пятен облучения от натуральных логарифмов энергии лазерного излучения, то его тангенс угла наклона будет равен отношению  $S_0$  и  $S_i$ . Таким образом, из выражения (4) по экспериментальным данным можно определить характерный размер лазерного пучка, рассчитав  $S_0$  и  $r_0$ . Зная характерный размер сечения лазерного пучка, можно рассчитать плотность энергии в импульсе, как  $q_0 = E_0/S_0$ .

После обработки эталонного материала с определенными энергиями в импульсе размеры пятен регистрируются с помощью оптического микроскопа с необходимым разрешением (рис. 3).

### Результаты измерения диаметра лазерного пучка

В данном, конкретном, случае эксперименты проводились при исследовании взаимодействия наносекундного УФ-лазера с поверхностями металлов и полупроводников [1, 2, 17, 18]. Однако мы считаем, что предложенная схема носит универсальный характер и может быть применена при использовании и других источников излучения.

В качестве примера приводится измерение сечения лазерного пучка твердотельного Nd:YAG лазера (третья гармоника, длина волны 355 нм) на эталонном материале – медной фольге толщиной 0,1 мм. На рис. 3 представлены изображения пятен облучения, полученные при плотности энергии 3,8 и 4,6 Дж/см<sup>2</sup> и количестве лазерных импульсов  $N = 30$ . В соответствии с формулой (4) площадь сечения лазерного пучка на поверхности образца оказалась равной  $S_0 = \pi r_0^2 \approx 0,0394 \text{ мм}^2$ ,  $r_0 \approx 112 \text{ мкм}$ .



**Рис. 3.** Изображения поверхности медной фольги после обработки 30 импульсами лазерного излучения с энергией 3,8 Дж/см<sup>2</sup> (а) и 4,6 Дж/см<sup>2</sup> (б), полученные на микроскопе через объектив с увеличением 8<sup>x</sup>

### Заключение

В работе сообщается о разработанном, изготовленном и испытанном устройстве для определения плотности энергии лазерного излучения путем измерения диаметра лазерного пучка при его воздействии на эталонный материал, при этом исключается повреждение и разрушение исследуемых образцов, а также влияние физико-химических свойств различных исследуемых материалов на измеряемую величину площади лазерного пятна.

Метод может быть применен в различных областях науки и техники, так как позволяет измерять плотность энергии и характерные размеры фокусного пятна у лазерных импульсов милли-, микро- или наносекундной длительности от ультрафиолетового диапазона длин волн до сверхвысоких частот.

*Результаты исследования были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России (Проект № 075-03-2022-056).*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филлин С. А., Хомич Ю. В., Ямщицков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И. / Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2020. Т. 23. № 3. С. 203–212.
2. Миколуцкий С. И., Хомич Ю. В. / Физика металлов и металловедение. 2021. Т. 122. № 2. С. 159–165.
3. Khotich Yu. V., Malinskiy T. V., Mikolutskiy S. I., Rogalin V. E., Yamshchikov V. A., Kaplunov I. A., Ivanova A. I. / Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1697. P. 012254.

4. Brannon P. J., Anthes J. P., Cano G. L., Powell J. E. / Journal of Applied Physics. 1975. Vol. 46. № 8. P. 3576–3579.
5. Liu X., Lu Z., Wang X., Ba D., Zhu C. / Optics & Laser Technology. 2015. Vol. 66. P. 58–62.
6. Lu Z. W., Liu X. Y., Wang X., Ba D. X., Jiang Z. H., Du P. Y., Zhu C. Y. / Laser and Particle Beams. 2013. Vol. 31. № 1. P. 177–183.
7. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Рогалин В. Е., Филлин С. А. / Прикладная физика. 2023. № 2. С. 90–96.
8. Liu J. M. / Optics letters. 1982. Vol. 7. № 5. P. 196–198.
9. Byskov-Nielsen J., Savolainen J. M., Christensen M. S., Balling P. / Applied Physics A. 2010. Vol. 101. P. 97–101.
10. Хурд Г. Измерение лазерных параметров. – М.: Мир, 1970.
11. Рузин М. В. / Фотоника. 2017. Т. 63. № 3. С. 48–53.
12. Борейшо А. С., Ивакин С. В. Лазеры: устройство и действие: учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2016.
13. Крутякова В. П., Смирнов В. Н. Способ определения радиуса эффективного пятна облучения. Авт. свидетельство № 1685146 (СССР). 1989.
14. ГОСТ Р ИСО 11146–1–2008 ЛАЗЕРЫ И ЛАЗЕРНЫЕ УСТАНОВКИ (СИСТЕМЫ). Методы измерений ширины, углов расходимости и коэффициентов распространения лазерных пучков. Часть 1.
15. Мацак И. С. Метод и экспериментальная установка для прецизионного измерения характеристик широкоапертурных пучков непрерывного лазерного излучения: Дисс. канд. техн. наук. – М.: МИФИ, 2019.
16. Климков Ю. М., Хорошев М. В. Лазерная техника: учебное пособие. – М.: МИИГАиК, 2014.
17. Малинский Т. В., Рогалин В. Е., Ямщицков В. А. / Физика металлов и металловедение. 2022. Т. 123. № 2. С. 192–199.
18. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филлин С. А., Хомич Ю. В., Ямщицков В. А., Каплунов И. А., Иванова А. И. / Письма в Журнал технической физики. 2021. Т. 47. № 14. С. 18–20.

## System for measuring the energy density (power) of a focused beam of pulsed laser radiation

*V. Yu. Zheleznov, T. V. Malinskiy, S. I. Mikolutskiy, V. E. Rogalin and S. A. Filin*

Institute for Electrophysics and Electric Power of Russian Academy of Sciences  
18 Dvortzovaya nab., St.-Petersburg, 191186, Russia  
E-mail: v-rogalin@mail.ru

*Received 8.11.2023; accepted 1.12.2023*

*A method is described for determining the energy density (power) of pulsed laser radiation when introducing a reference material into the optical processing plane, which makes it possible to eliminate the influence of the physicochemical properties of the materials under study. The parameters of the focused laser beam were determined by measuring the energy absorbed by the standard and the area of the irradiation spot remaining on it after interaction with the laser beam. In the event of destruction of the sample under study, it remains possible to determine the energy density (power) of the applied laser radiation. This method can be applied in the field of studying the interaction of laser radiation with matter, in particular, determining the optical resistance (strength) of materials.*

*Keywords:* laser, nanosecond pulse, irradiation spot area, laser radiation energy density, optical stability.

### REFERENCES

1. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Mikolutsky S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Khomich Yu. V., Yamshchikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *Russian Microelectronics* **50**, 649–656 (2021).
2. Mikolutskiy S. I. and Khomich Yu. V., *Physics of Metals and Metallography* **122** (2), 148–153 (2021).
3. Khomich Yu. V., Malinskiy T. V., Mikolutskiy S. I., Rogalin V. E., Yamshchikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *Journal of Physics: Conference Series* **1697**, 012254 (2020).
4. Brannon P. J., Anthes J. P., Cano G. L. and Powell J. E., *Journal of Applied Physics* **46** (8), 3576–3579 (1975).
5. Liu X., Lu Z., Wang X., Ba D. and Zhu C., *Optics & Laser Technology* **66**, 58–62 (2015).
6. Lu Z. W., Liu X. Y., Wang X., Ba D. X., Jiang Z. H., Du P. Y. and Zhu C. Y., *Laser and Particle Beams* **31** (1), 177–183 (2013).
7. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Rogalin V. E. and Filin S. A., *Applied Physics*, № 2, 90–96 (2023) [in Russian].
8. Liu J. M., *Optics letters* **7** (5), 196–198 (1982).
9. Byskov-Nielsen J., Savolainen J. M., Christensen M. S. and Balling P., *Applied Physics A* **101**, 97–101 (2010).
10. Kheerd G., *Measurement of laser parameters*, Moscow, Mir, 1970 [in Russian].
11. Ruzin M. V., *Photonics* **63** (3), 48–53 (2017).
12. Boreysho A. S. and Ivakin S. V., *Lasers: Device and Action: Study Guide*, Saint Petersburg, Publishing House «Lan'», 2016 [in Russian].
13. Krutyakova V. P. and Smirnov V. N. Method for determining the radius of the effective irradiation spot. Patent for invention № 1685146 (USSR). 1989 [in Russian].
14. GOST R ISO 11146–1–2008 LASERS AND LASER INSTALLATIONS (SYSTEMS). Methods for measuring widths, divergence angles and propagation coefficients of laser beams. Part 1 [in Russian].
15. Matsak I. S. Method and experimental setup for precision measurement of the characteristics of wide-aperture beams of continuous laser radiation: Diss. Candidate of Technical Sciences. Moscow, MEPhI, 2019 [in Russian].
16. Klimkov Yu. M. and Khoroshev M. V., *Laser technology: Study Guide*, Moscow, MIIGAiK, 2014 [in Russian].
17. Malinskii T. V., Rogalin V. E. and Yamshchikov V. A., *The Physics of Metals and Metallography* **123** (2), 178–185 (2022).
18. Zheleznov V. Yu., Malinskiy T. V., Mikolutskiy S. I., Rogalin V. E., Filin S. A., Khomich Y. V., Yamshchikov V. A., Kaplunov I. A. and Ivanova A. I., *Technical Physics Letters* **47** (14), 734–736 (2021).