

Измерение пространственных характеристик эрозионной лазерной плазмы кремния с помощью малогабаритных спектрометров высокого разрешения

Борис Алексеевич Лапшинов^{1✉}, Николай Иванович Тимченко²

^{1, 2} Научно-исследовательский институт перспективных материалов и технологий, Москва, Россия

¹lbaniipmt@mail.ru✉, ²njtim@mail.ru

Аннотация. Исследованы пространственные характеристики эрозионной лазерной плазмы. Рассмотрено применение малогабаритных спектрометров видимого и ультрафиолетового диапазонов для регистрации спектра излучения плазмы. Эрозионная лазерная плазма сформирована на поверхности кремниевой мишени под действием импульсного излучения лазера с длиной волны 1064 нм при нормальных атмосферных условиях. С использованием перемещаемой щелевой диафрагмы, ориентированной параллельно поверхности мишени, проведено сканирование лазерного плазменного факела. Излучение эрозионной лазерной плазмы зафиксировано с помощью малогабаритных спектрометров. На основании полученных спектров излучения плазмы выявлены зависимости интенсивности спектральных линий кремния от геометрического положения щелевой диафрагмы. Проведено сравнение интенсивностей спектральных линий кремния на полированной и шлифованной сторонах мишени.

Ключевые слова: эрозионная лазерная плазма, кремниевая мишень, спектр излучения, интенсивность спектральных линий

Для цитирования: Лапшинов Б. А., Тимченко Н. И. Измерение пространственных характеристик эрозионной лазерной плазмы кремния с помощью малогабаритных спектрометров высокого разрешения // Измерительная техника. 2021. № 1. С. 38–42. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-1-38-42>

Measurement of the spatial characteristics of an erosive silicon laser plasma using small-sized high-resolution spectrometers

Boris A. Lapshinov^{1✉}, Nikolay I. Timchenko²

^{1, 2} Research Institute of Advanced Materials and Technologies, Moscow, Russia

¹lbaniipmt@mail.ru✉, ²njtim@mail.ru

Abstract. The spatial characteristics of the erosion laser plasma are investigated. The application of small-sized spectrometers of the visible and ultraviolet ranges for recording the spectrum of plasma radiation is considered. Erosive laser plasma is formed on the surface of a silicon target under the action of pulsed laser radiation with a wavelength of 1064 nm under normal atmospheric conditions. The laser plasma torch was scanned using a movable slit diaphragm oriented parallel to the target surface. The emission of erosion laser plasma was recorded using small-size spectrometers. Based on the obtained plasma emission spectra, the dependences of the intensity of the spectral lines of silicon on the geometric position of the slit diaphragm are revealed. A comparison is made of the intensities of the spectral lines of silicon on the polished and grinded sides of the target.

Keywords: erosive laser plasma; silicon target; radiation spectrum; intensity of spectral lines

Введение. В результате взаимодействия лазерного излучения с различными твердыми мишенями происходят процессы нагрева, плавления и испарения материалов мишени, эмиссия заряженных частиц с их поверхности, возникновение приповерхностной лазерной плазмы и др. Характер протекания этих процессов зависит практически от всех характеристик лазерного излучения, теплофизических свойств мишени и состояния её поверхности. Исследование и реализация этих процессов проводятся

в широком диапазоне плотности потока лазерного излучения $P = 10^3 \dots 10^{15}$ Вт/см².

При плотности потока лазерного излучения P выше критического для данного вещества значения P_0 ($P > P_0$) поглощённая энергия превышает энергию связи атомов в веществе и энергию ионизации, в результате чего слой облучаемого вещества превращается в плазму. В дальнейшем сильно ионизованная плазма поглощает лазерное излучение, что приводит к её значительному разогреву.

Из-за большого градиента давления вещество выбрасывается с облучённой поверхности и происходит газодинамическое расширение плазменного факела.

Этот эффект имеет большое практическое значение в лазерно-плазменных технологиях. Применительно к обработке металлов он используется в таких процессах, как сварка, сверление отверстий, резка, упрочнение и др. В области микроэлектроники и нанофотоники происходит локальное испарение материалов при формировании тонкоплёночных структур, формирование плёнок нанометровой толщины [1, 2]. Такой эффект важен и при проведении лазерного спектрального анализа, который позволяет исследовать химический состав образцов с размерами порядка 15 мкм и массой около 1 мкг [3, 4]. Лазерные источники электронов и ионов, которые могут генерировать потоки заряженных частиц в течение короткого времени, разрабатываются для использования в процессах ионной имплантации, ускорительной технике и в других технологиях [5, 6].

Для всех вариантов применения лазерной плазмы необходимо выявить её оптимальные характеристики, которые зависят от плотности потока излучения, длины волны лазера, размера области облучения, внешних условий облучения, характеристик материала мишени и состояния её поверхности [7].

Исследования свойств лазерной плазмы и пространственного распределения её параметров проводят различными экспериментальными методами (спектроскопические, зондовые, фотографические и др.) [8–10] и методами математического моделирования. Экспериментальное исследование параметров лазерной плазмы является весьма сложной задачей из-за непродолжительного существования такого объекта и его малого размера. В случае математического моделирования для описания процессов, протекающих в плазме, требуется решать сложную систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных в двумерной (или трёхмерной) геометрии.

Согласно спектроскопическим исследованиям излучение плазмы обладает как сплошным (тепловым), так и линейчатым спектром. Сплошной спектр с наложенными на него линиями излучения материала мишени возникает вблизи её поверхности. Линейчатый спектр наблюдается на некотором расстоянии от поверхности и обусловлен наличием в плазме ионов различной кратности [11].

Использование малогабаритных спектрометров высокого разрешения на кремниевых приборах с зарядовой связью (ПЗС-линейках) позволяет за короткое время зарегистрировать спектр излучения объекта и сохранить эти данные в памяти компьютера. Диапазон чувствительности таких спектрометров включает ближнее ультрафиолетовое (УФ), видимое и ближнее инфракрасное излучение. Излучение от объекта в спектрометр передаётся по оптическому волокну, приёмный торец которого располагается на требуемом расстоянии от области излучения.

Цель данной работы – изучение пространственного распределения интенсивностей спектральных линий в лазерной плазме монокристаллического кремния с использованием малогабаритных спектрометров высокого разрешения.

Техника и условия эксперимента. В качестве мишени использовали пластину монокристаллического кремния, применяемого для изготовления микроэлектронных приборов. Толщина пластины составляла 400 мкм. С рабочей стороны пластина имела полированную поверхность, с нерабочей стороны – шлифованную.

Генерация плазменного факела мишени осуществлялась воздействием на её поверхность излучения Nd:YAG-лазера с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм. Использовался импульсный режим работы лазера с длительностью импульсов $\tau \approx 200$ мкс и частотой следования импульсов $F = 3$ кГц. При этом режиме была зафиксирована средняя плотность потока лазерного излучения на поверхности мишени $P_{\text{ср}} \approx 5,5 \cdot 10^7$ Вт/см².

Спектры излучения лазерной плазмы фиксировались двумя спектрометрами HR2000+ (Ocean Optics, США) – для области ближнего ультрафиолета (200–400 нм) и для видимой области (350–800 нм) спектра. Спектрометры управлялись программой «Spectral Pyrometry» (Тимченко Н. И. Программа для ЭВМ «Spectral Pyrometry», v. 3.1, номер гос. регистрации 2016661057 от 28.09.2016). Все измерения проводились при нормальных атмосферных условиях.

Схема эксперимента и структура лазерного факела описаны в [12]. С помощью щелевой диафрагмы размером 0,15×4 мм, ориентированной параллельно поверхности мишени, из плазменного факела вырезалась ограниченная его область, излучение этой области фиксировалось спектрометрами. Диафрагма располагалась на расстоянии 40 мм от приёмного торца оптического волокна диаметром 0,6 мм, расстояние от источника лазерной плазмы до диафрагмы составляло порядка 40 мм. С помощью винтовой пары диафрагму перемещали в вертикальном направлении с шагом 0,05 мм. Величина перемещения контролировалась индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Пошаговое перемещение диафрагмы производили от поверхности мишени до положения с нулевой интенсивностью

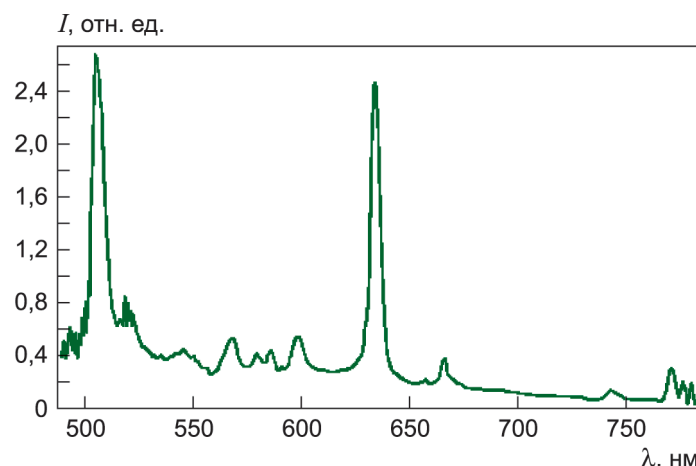


Рис. 1. Спектры излучения кремния в пределах тепловой зоны плазменного факела

Fig. 1. Silicon emission spectra within the thermal zone of a plasma torch

спектра излучения, т. е. через всю область плазменного факела. Спектры излучения вырезанного диафрагмой объёма лазерной плазмы фиксировались при каждом новом положении диафрагмы. Таким образом осуществлялось послойное сканирование плазменного факела в вертикальном направлении с шагом 0,05 мм. Время накопления сигнала спектрометром (время интеграции) составляло 100 мс. Для предотвращения образования глубокого кратера на поверхности

мишени и, как следствие, искажения пространственной формы плазменного факела, мишень перемещали с небольшой скоростью в горизонтальном направлении. Полученная таким способом серия спектров позволила определить зависимость интенсивности спектральных линий кремния в области ближнего УФ и видимой области спектра от положения диафрагмы относительно поверхности мишени.

Газодинамическое расширение плазменного факела в направлении, перпендикулярном поверхности мишени, происходило с большей скоростью, чем в направлении, параллельном ей. Как следствие, в вертикальном направлении спектральные линии фиксировались на большем расстоянии от поверхности мишени, чем в горизонтальном (при вертикальном расположении щелевой диафрагмы и её перемещении параллельно оси лазерного пучка).

Характеристики лазерной плазмы в значительной степени могут зависеть от состояния поверхности мишени. Любая поверхность не является идеальной из-за присутствия на ней различного рода физических и химических неоднородностей. Кроме этого, поверхность характеризуется качеством её обработки, шероховатостью, которая обуславливает различные значения коэффициента отражения излучения в разных точках.

В настоящей работе проведён сравнительный анализ интенсивностей спектральных линий, полученных при лазерном облучении полированной и шлифованной сторон кремниевой мишени.

За основу построения зависимостей интенсивностей спектральных линий кремния от положения щелевой диафрагмы взяты линии 385,601 нм и 413,089 нм в УФ-области и 505,598 нм и 634,71 нм в видимой области спектра [13]. Интенсивность спектральных линий определялась по их пиковому значению на полученных спектрах.

Результаты и обсуждение. В спектрах излучения вблизи поверхности мишени зафиксирована составляющая переменной интенсивности. Наличие такой составляющей обусловлено тепловым характером излучения данной области (рис. 1). В спектрах вне этой области присутствовали только спектральные линии материала мишени.

На рис. 2 представлены изменения интенсивностей спектральных линий в УФ-диапазоне спектра, а на рис. 3 – аналогичные кривые в видимом диапазоне.

В обоих случаях максимальная интенсивность спектральных линий отмечалась на расстоянии 0,25–0,3 мм над поверхностью мишени. Для полированной стороны мишени

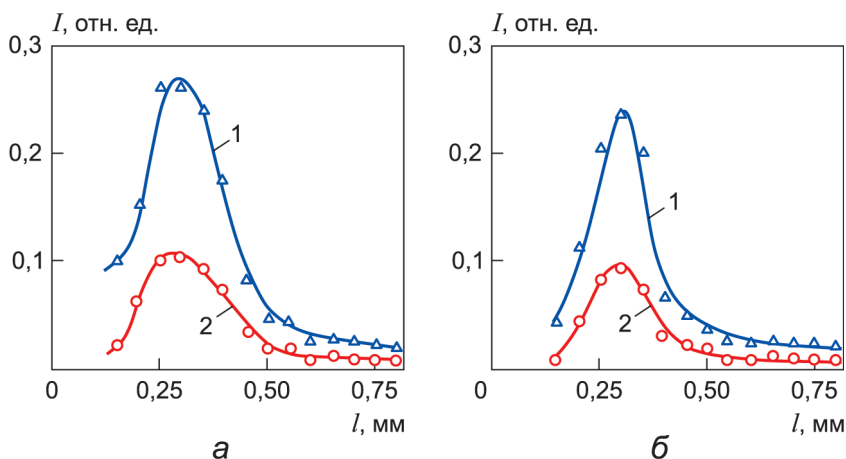


Рис. 2. Изменение интенсивности спектральных линий УФ диапазона при перемещении горизонтальной щелевой диафрагмы по вертикали на полированной (а) и шлифованной (б) сторонах:
1 – $\lambda = 413,089$ нм; 2 – $\lambda = 385,601$ нм

Fig. 2. Change in the intensity of spectral lines in the UV range when moving the horizontal slit diaphragm vertically on the polished (a) and grinded (b) sides:
1 – $\lambda = 413,089$ нм; 2 – $\lambda = 385,601$ нм

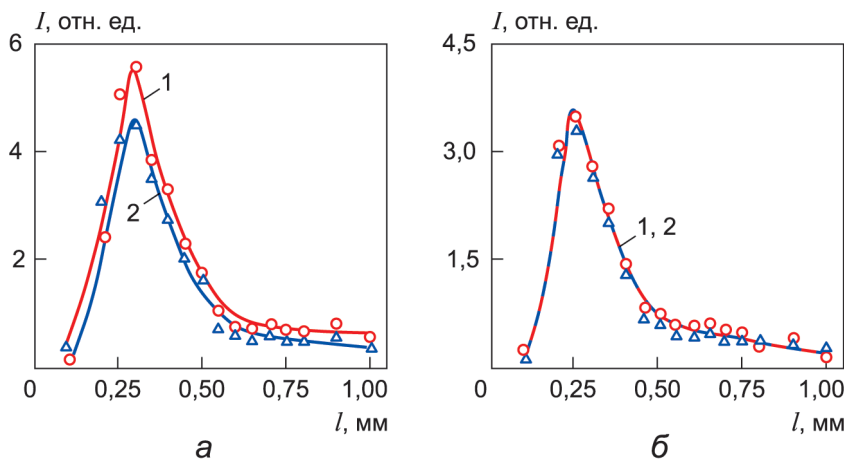


Рис. 3. Изменение интенсивности спектральных линий видимого диапазона при перемещении горизонтальной щелевой диафрагмы по вертикали на полированной (а) и шлифованной (б) сторонах:
1 – $\lambda = 634,71$ нм; 2 – $\lambda = 505,598$ нм

Fig. 3. Change in the intensity of spectral lines in the visible range when moving the horizontal slit diaphragm vertically on the polished (a) and grinded (b) sides:
1 – $\lambda = 634,71$ нм; 2 – $\lambda = 505,598$ нм

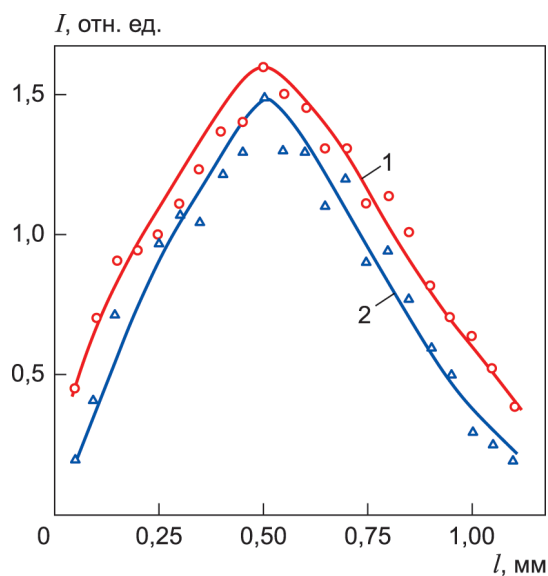


Рис. 4. Изменение интенсивности спектральной линии $\lambda = 634,71$ нм по оси лазерного луча: 1 – полированная сторона; 2 – шлифованная сторона

Fig. 4. Changing the intensity of the spectral line $\lambda = 634,71$ nm along the axis of the laser beam: 1 – polished side; 2 – grinded side

различие в интенсивностях спектральных линий в видимой области спектра было значительно меньше, чем в УФ-области. Для шлифованной стороны это различие практически не наблюдалось.

При замене щелевой диафрагмы на круглую диафрагму диаметром 0,15 мм (с сохранением геометрии системы) зафиксировано изменение интенсивности спектральной линии 634,71 нм по оси лазерного луча для полированной и шлифованной сторон мишени. Перемещение этой диафрагмы осуществлялось от координаты поверхности мишени с нулевой интенсивностью спектральной линии вверх с шагом 0,05 мм.

Измерения с круглой диафрагмой показали, что интенсивность спектральной линии 634,71 нм для полированной и шлифованной поверхностей изменялась от минимального значения вблизи поверхности мишени до максимума на расстоянии порядка 0,5 мм от её поверхности и затем уменьшалась по мере удаления диафрагмы от поверхности мишени (рис. 4). Минимальное значение интенсивности зафиксировано на расстоянии 1 мм для полированной и шлифованной сторон, интенсивность спектральной линии с полированной стороны несколько выше, чем со шлифованной.

Выводы. Использование малогабаритных спектрометров высокого разрешения позволило зафиксировать спектры излучения лазерной плазмы и определить интенсивности спектральных линий в ограниченных областях плазмы. С помощью щелевой диафрагмы проведено сканирование лазерного плазменного факела кремниевой мишени в направлении, перпендикулярном оси лазерного луча. Построены графики зависимости интенсивностей отдельных спектральных линий от геометрического

положения диафрагмы. Максимальная интенсивность спектральных линий зарегистрирована на расстоянии 0,25–0,3 мм над поверхностью мишени. Измерения показали влияние качества облучаемой лазером поверхности на характеристики спектра излучения. Для полированной поверхности кремния во всех случаях зафиксирована более высокая интенсивность спектральных линий, чем для шлифованной стороны.

Список литературы

1. Булаев С. А. Сущность импульсного лазерного напыления в вакууме как способа получения плёнок нанометровых толщин // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 18. С. 25–28.
2. Лукин Л. С., Лунина М. Л., Девицкий О. В., Сысоев И. А. Импульсное лазерное напыление тонких плёнок $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ и GaP на подложках Si для фотопреобразователей // Физика и техника полупроводников. 2017. Т. 51. № 3. С. 403–407.
<https://doi.org/10.21883/FTP.2017.03.44216.8299>
3. Сухов Л. Т. Лазерный спектральный анализ. Новосибирск: Наука, 1990. 143 с.
4. Harmon R. S., Lawley C. J. M., Watts J. et al., *Minerals*, 2019, vol. 9, iss. 12, 718. <https://doi.org/10.3390/min9120718>
5. Быковский Ю. А. Лазерно-плазменный источник ионов и ядер // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 9. С. 107–112.
6. Мордик С. Н., Ерёмченко В. М., Бугай А. Н. и др. Исследование лазерно-плазменного источника ионов с системой постоянных кольцевых магнитов // Журнал технической физики. 2017. Т. 87. № 5. С. 788–790.
<https://doi.org/10.21883/JTF.2017.05.44457.1748>
7. Воробьев В. С. Плазма, возникающая при взаимодействии лазерного излучения с твердыми мишенями // Успехи физических наук. 1993. Т. 163. № 12. С. 51–83.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0163.199312b.0051>
8. Рэди Дж. Действие мощного лазерного излучения: Пер. с англ. М.: Мир, 1974. 468 с.
9. Тимченко П. Е., Маринин В. Л. Измерение характеристик и спектрального состава лазерной плазмы // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва. 2010. № 4 (24). С. 142–147.
10. Хайдуков Е. В., Новодворский О. А., Лотин А. А. и др. Зондовые исследования лазерного эрозионного факела при абляции кремния в вакууме // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. № 4. С. 59–63.
11. Анисимов С. И., Имас Я. А., Романов Г. С., Ходыко Ю. В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. 272 с.
12. Лапишинов Б. А., Тимченко Н. И. Многоканальный измерительный комплекс на базе малогабаритных спектрометров высокого разрешения // Электроника: наука, технология, бизнес. 2019. № 186(5). С. 90–94.
<https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.186.5.90.94>

13. Стриганов А. Р., Свентицкий Н. С. Таблицы спектральных линий нейтральных и ионизованных атомов. М: Атомиздат, 1966. 899 с.

References

1. Bulayev S. A., *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2014, vol. 17, no. 18, pp. 25–28 (in Russian).
2. Lunin L. S., Lunina M. L., Devitsky O. V., Sysoev I. A., *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 3, pp. 387–391.
<https://doi.org/10.1134/S1063782617030174>
3. Sukhov L. T., *Lazernyy spektral'nyy analiz*, Novosibirsk, Nauka Publ., 1990, 143 p. (in Russian).
4. Harmon R. S., Lawley C. J. M., Watts J. et al., *Minerals*, 2019, vol. 9, iss. 12, 718. <https://doi.org/10.3390/min9120718>
5. Bykovskiy Yu. A., *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal*, 1996, no. 9, pp. 107–112 (in Russian).
6. Mordyk S. N., Eremenko V. M., Bugai A. N. et al., *Technical Physics*, 2017, vol. 62, pp. 807–809.
<https://doi.org/10.1134/S1063784217050206>
7. Vorob'ev V. S., *Physics-Uspexhi*, 1993, vol. 36, no. 12, pp. 1129–1157. <https://doi.org/10.1070/PU1993v036n12ABEH002209>

8. John Ready, *Effects of High-Power Laser Radiation*, New York, London, Academic Press, 1971, 448 p.

<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-583950-1.x5001-6>

9. Timchenko P. Ye., Marinin V. L., *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika S. P. Korolyova*, 2010, no. 4 (24), pp. 142–147 (in Russian).

10. Khaydukov Y. V., Novodvorskiy O. A., Lotin A. A. et al., *Technical Physics*, 2010, vol. 55, pp. 491–495.

<https://doi.org/10.1134/S1063784210040092>

11. Anisimov S. I., Imas Ya. A., Romanov G. S., Khodyko Yu. V., *Deystviye izlucheniya bol'shoy moshchnosti na metally*, Moscow, Nauka Publ., 1970, 272 p. (in Russian).

12. Lapshinov B. A., Timchenko N. I., *Electronics: Science, Technology, Business*, 2019, no. 186(5), pp. 90–94 (in Russian).

<https://doi.org/10.22184/1992-4178.2019.186.5.90.94>

13. Striganov A. R., Sventitskiy N. S. *Tablitsy spektral'nykh liniy neytral'nykh i ionizovannykh atomov*, Moscow, Atomizdat Publ., 1966, 899 p. (in Russian).

Статья поступила в редакцию 25.06.2020;

принята к публикации 02.07.2020.