

Влияние положения мишени на интенсивность спектральных линий лазерной эрозионной плазмы

А. А. Лискович

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь,
e-mail: L30041997@mail.ru*

На примерах металлов, сплавов и минерального сырья проведено исследование зависимости интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы, образованной на поверхностях этих веществ, вдвоенными наносекундными лазерными импульсами, от их расположения относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы. Определены допустимые диапазоны отклонений положения исследуемого объекта относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы при проведении количественного LIBS анализа.

Ключевые слова: лазерно-эмиссионная плазма, LIBS спектроскопия, интенсивность спектральной линии, вдвоенные лазерные импульсы, позиционирование объекта исследования.

The influence of target position on the intensity of spectral lines of laser erosion plasma

A. A. Liskovich

*Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno, Belarus,
e-mail: L30041997@mail.ru*

Using metals, alloys, and minerals as examples, a study was conducted to determine the dependence of the spectral line intensity of erosion plasma generated on the surfaces of these materials by dual nanosecond laser pulses on their position relative to the focus of the laser-focusing optical system. Acceptable ranges of deviations in the position of the studied object relative to the focus of the laser-focusing optical system during quantitative LIBS analysis were determined.

Keywords: laser emission plasma, LIBS spectroscopy, spectral line intensity, dual laser pulses, positioning of the research object.

Введение

Лазерно-эмиссионная спектроскопия LIBS является вариантом атомно-эмиссионного спектрального анализа, обладающим значительным потенциалом для применения в различных областях науки, техники и производства [1, 2]. Основными ее преимуществами являются возможность одновременного многоэлементного анализа химического состава вещества, а также возможность проведения экспресс-анализа. LIBS основана на воздействии сфокусированного импульсного лазерного излучения на поверхность исследуемого вещества. Это приводит к возникновению над ней эрозионного плазменного факела, спектр излучения которого регистрируется и расшифровывается для определения принадлежности спектральных линий химическим элементам и определения состава вещества.

Для повышения чувствительности и точности LIBS важным является увеличение интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы. Для этой цели применяются вдвоенные лазерные импульсы [3, 4], пространственное ограничение

зоны отбора излучения при регистрации спектров и использование стробов [5], использование дополнительных разрядов и УФ облучение мишени [6–8], использование наночастиц [9] и др. Важным также является выбор лазера для воздействия на вещество. Чаще всего применяют твердотельные лазеры, работающие на длине волны 1,064 мкм. Однако лазеры, генерирующие УФ излучение [10–11] формируют эрозионные плазменные факелы более эффективно. Также следует учитывать то, что в эрозионном факеле по мере его остывания синтезируются наночастицы подобно электровзрывной плазме [12].

Для практической LIBS спектроскопии стабильность интенсивности регистрируемых спектральных линий эрозионной плазмы является важным параметром, влияющим на определение концентрации элементного состава вещества. Важным является расположение исследуемого объекта на одном и том же расстоянии относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы. Однако это далеко не всегда удается реализовать. В этой связи является актуальным исследование влияния положения мишени относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы на интенсивность спектральных линий лазерной эрозионной плазмы и оценка величины допустимых отклонений.

Экспериментальная установка

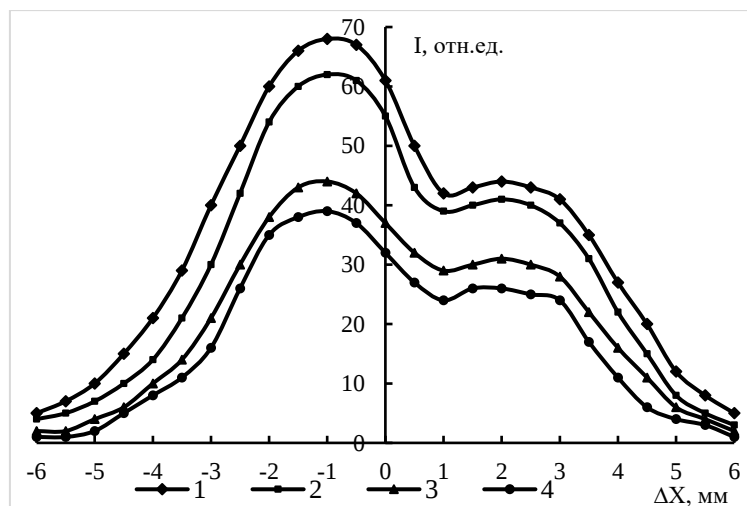
Исследования проводились на экспериментальной установке, описанной в [13]. В ее основу положен лазерно-эмиссионный спектрометр, разработанный в институте физики НАН Беларуси. Используемое лазерное излучение генерировалось YAG:Nd³⁺ лазером на длине волны 1,064 мкм как моноимпульсным режимом, так и в режиме сдвоенных импульсов с регулируемым в диапазоне 0–300 мкс временным интервалом между ними. Длительность лазерных импульсов составляла ~15 нс по полувысоте. Их энергия генерации могла изменяться от 5 мДж до 32 мДж. На мишень лазерное излучение фокусировалось оптической системой. Регистрация спектров осуществлялась с направления близкого к обратному по отношению к лазерному лучу. Излучение плазмы, собранное объективом, вводилось в световод и направлялось в монохроматор-спектрограф MS 2004i. Регистрация спектра эрозионного факела на выходе MS 2004i осуществлялась с помощью регистратора оптического излучения на базе ПЗС-линеек.

Объектами исследования являлись образцы таблетированной глины с добавкой NaCl, алюминия, меди, латуни. В качестве исследуемых спектральных линий были выбраны: для глины с NaCl – линии желтого дуплета натрия Na I 588,984 нм и Na I 589,591 нм, Ca I 393,522 нм, Si I 385,781 нм и Si I 288,158 нм; для алюминия – Al I 308,215 нм и Al I 309,271 нм; для меди Cu I 324,754 нм и Cu I 327,396 нм, для латуни – Cu I 324,754 нм, Cu I 327,396 нм, Zn I 330,259 нм и Zn I 334,502 нм. Исследуемый объект располагался на столике и имел возможность перемещаться вдоль лазерного луча при вращении микрометрического винта с шагом 0,5 мм. NaCl использовался для изменения концентрации натрия в глине. Для этого концентрированный раствор NaCl в дистиллированной воде добавлялся в сухую порошкообразную глину, которая в дальнейшем подвергалась сушке. Вода испарялась, а NaCl оставался. Зная концентрацию раствора и массу порошкообразной глины, можно было рассчитать концентрацию натрия.

Энергия лазерного импульса подбиралась для каждого объекта индивидуально. По объекту осуществлялось воздействие десятью импульсами. Зарегистрированные спектры обрабатывались программой Qsp Client, в которой проводилось их усреднение. Усреднение 10 спектров проводилось автоматически и позволяло снизить погрешность. Наличие самопоглощения не учитывалось. Считалось, что при используемых энергиях лазерных импульсов оно отсутствовало.

2. Результаты исследования и их обсуждение

На рисунке ниже представлены зависимости интенсивности спектральных линий желтого дуплета натрия: Na I 588,984 нм (кр. 1) и Na I 589,591 нм (кр. 2); кальция Ca I 393,522 нм (кр. 3) и кремния Si I 385,781 нм (кр. 4) от расстояния от фокуса фокусирующей системы до поверхности мишени (ΔX). В качестве исследуемой мишени в экспериментах использовались образцы высушенной и спрессованной в таблетку глины. Отрицательные значения ΔX соответствуют расположению мишени между фокусирующей системой и ее фокусом (на мишень падает сходящийся лазерный пучок). Положительные значения ΔX соответствуют расположению мишени за фокусом фокусирующей системы (на мишень падает расходящийся лазерный пучок). Как при отрицательных, так и при положительных ΔX больших 6 мм, интенсивность спектральных линий была близка к нулю.



Зависимости интенсивности спектральных линий желтого дуплета натрия Na I 588,984 нм (кр. 1), Na I 589,591 нм (кр. 2), кальция Ca I 393,522 нм (кр. 3) и кремния Si I 385,781 нм (кр. 4) в зависимости от расстояния от фокуса фокусирующей системы до поверхности мишени

Интенсивность спектральных линий увеличивалась с приближением мишени к фокусу фокусирующей лазерное излучение системы. Максимальной интенсивности спектральные линии достигали при $\Delta X = -1$ мм. При ΔX , равных +2 мм, появлялся ещё один более слабый максимум интенсивности спектральных линий. Размер лазерного пятна определяет плотность мощности лазерного излучения на поверхности мишени и зависит от ΔX . С ростом ΔX от -6 мм до 0 площадь лазерного пятна уменьшается, а плотность мощности лазерного излучения растет. Это приводит к росту интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы.

Интенсивность спектральных линий при расположении мишени в фокусе фокусирующей системы не является максимальной. Причинами этого являются нелинейные процессы, происходящие при взаимодействии излучения с мишенью. С ростом плотности мощности лазерного излучения увеличивается мощность тормозного и непрерывного (фоновое) излучения из-за интенсивных столкновений между заряженными частицами, особенно на начальных стадиях развития эрозионного факела. Это приводит к тому, что плазма излучает в континууме, а не в линейчатом спектре. Следует отметить также самопоглощение (поглощение собственного излучения самой плазмой). При воздействии лазерного излучения на мишень происходит образование очень плотной и горячей плазмы, которая может поглощать собственное излучение. К снижению интенсивности спектральных линий может также привести рассеяние энергии лазерного импульса приповерхностной плазмой, что снижает эффективность плазмообразования.

Наличие второго пика на зависимостях интенсивности спектральных линий от ΔX связано с оптическим пробоем воздуха перед мишенью. Это приводит не только к потере энергии лазерного импульса, но и к явлениям самофокусировки и самодифракции лазерного излучения, что равносильно увеличению фокусного расстояния фокусирующей системы и приближению фактического фокуса к поверхности исследуемого объекта. Наблюдается наличие двух разнесенных в пространстве плазменных образований. Первое – лазерная искра в воздухе на оси лазерного луча, второе – эрозионный факел на поверхности мишени. За счет взаимодействия плазменных образований формируется высокотемпературная плазма, расширяющаяся вдоль оптической оси лазерного луча. Это приводит к некоторому росту (замедлению снижения) интенсивности спектральных линий при $\Delta X \sim 2$ мм. При $\Delta X < 2$ мм лазерная искра и эрозионный факел на поверхности мишени сливаются и эффект от их взаимодействия плохо визуализируется.

Исследовано поведение интенсивности спектральных линий при различных концентрациях вещества в мишени в зависимости от ΔX . Для этого были проведены эксперименты с различными концентрациями NaCl в мишени и построены кривые аналогичные приведенным на рисунке выше. Получено, что в исследованном диапазоне изменений концентраций NaCl влияние ΔX на интенсивность спектральных линий дуплета натрия происходит практически одинаково.

Исследованы зависимости интенсивности спектральных линий алюминия, меди и латуни от ΔX . Полученные результаты подобны, описанным выше. Увеличение энергии лазерных импульсов приводило к росту интенсивности исследованных спектральных линий. Для целей практической спектроскопии лучшим вариантом является расположение исследуемого образца перед фокусом фокусирующей системы. Это позволяет избежать пробоя воздуха до того, как лазерный импульс достигнет поверхности образца.

Заключение

На примерах металлов, сплавов и минерального сырья проведено исследование зависимости интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы, образованной на поверхностях этих веществ, двукратными наносекундными лазерными импульсами, от их расположения относительно фокуса фокусирующей лазерное

излучение оптической системы. Показано, что интенсивности спектральных линий принимают максимальные значения при расположении этих объектов относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы на $\Delta X = -1,0$ мм. Расположение исследуемого объекта относительно фокуса фокусирующей лазерное излучение оптической системы при проведении количественного LIBS анализа должно находиться в диапазоне $\Delta X (-1,5 \text{ мм}) - (-0,5 \text{ мм})$.

Библиографические ссылки

1. Singh, J. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy / J. Singh, S. Thakur. – Amsterdam : Elsevier, 2007. 454 p.
2. Кремерс, Д. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия / Д. Кремерс, Л. Радиемски. – М. : Техносфера, 2009. 370 с.
3. Курьян, Н. Н. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины / Н. Н. Курьян, К. Ф. Зноско, В. В. Григуть // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2018. Т. 8, № 2. С. 101–110.
4. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа / С. С. Ануфрик [и др.] // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2016. Т. 6, № 2. С. 57–63.
5. Попов, А. М. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды / А. М. Попов, Т. А. Лабутин, Н. Б. Зоров // Вестник Московского университета. Серия 2. Химия. 2009. Т. 50, № 6. С. 453–467.
6. Зноско, К. Ф. Коаксиальные XeCl-эксилампы барьерного и емкостного разрядов / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2019. Т. 9, № 3. С. 74–85.
7. Зноско, К. Ф. Системы высокочастотного возбуждения XeCl-эксиламп барьерного и емкостного разрядов / К. Ф. Зноско, В. Ч. Белаш // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. 2019. Т. 9, № 1. С. 28–39.
8. Volodenkov, A. Modeling of emission characteristics of XeCl excilamps in pulse-periodic mode of work / A. Volodenkov, S. Anufrik, K. Znosko // High Temperature Material Processes. 2014. Vol. 18, No. 3. P. 181–196.
9. Enhancement of Analytical Signal of Laser Induced Breakdown Spectroscopy by Deposition of Gold Nanoparticles on Analyzed Sample / V. V. Kiris [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy. 2019. Vol. 86. P. 900–907.
10. Anufrik, S. S. Kinetic model for XeCl-lasers / S. S. Anufrik, A. P. Volodenkov, K. F. Znosko // LFNМ 2006 : proceedings of the 8th Int. conference on laser and fiber-optical networks modeling, Kharkiv, Ukraine, June 29 – July 1, 2006 / Kharkiv State University of Radio Electronics, ed. by I. A. Sukhoivanov. – [S. l.] : IEEE, 2006. – P. 80–83.
11. Anufrik, S. Simulation of active medium of XeCl lasers / S. Anufrik, A. Volodenkov, K. Znosko // Advanced Lasers and Systems 2007 : proceedings of the Int. conf. on lasers, applications, and technologies, Minsk, Belarus, May 28 – June 1, 2007 / Eds.: V. A. Orlovich, V. Panchenko, I. A. Scherbakov. – Minsk : Society of Photo Optical, 2007. – Art. 673106. (Proceedings of SPIE ; vol. 6731).
12. Зноско, К. Ф. Размерные характеристики наночастиц, синтезированных в плазме электро-взрывного разряда / К. Ф. Зноско // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2024. Т. 14, № 1. С. 81–92.
13. Зноско, К. Ф. Механизмы усиления интенсивности спектральных линий плазмы и роста выноса материала из эрозионного кратера при двухимпульсной лазерной абляции / К. Ф. Зноско // Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2023. Т. 13, № 1. С. 116–132.