

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ СИГНАЛА LIBS В СРЕДЕ ИНЕРТНОГО ГАЗА ГЕЛИЯ

А.А. Лискович

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы,
ул. Ожешко 22, Гродно 230023, Беларусь, L30041997@mail.ru

Представлены результаты исследования влияния состава окружающей газовой среды на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы, формируемой лазерным излучением на металлических мишениях. Установлено, что в атмосфере гелия интенсивность ряда спектральных линий алюминия и индия при одноимпульсном лазерном возбуждении возрастает в 2–3 раза по сравнению с воздушной средой. Данный эффект обусловлен снижением взаимодействия расширяющейся плазмы с атмосферными газами. В случае двухимпульсного лазерного воздействия в гелиевой среде прирост интенсивности спектральных линий выражен не так существенно. Это связано с тем, что первый лазерный импульс формирует плазменное облако, которое эффективно вытесняет окружающий воздух, создавая локальную инертную зону перед поверхностью мишени. Плазменный факел, сформированный вторым лазерным импульсом, распространяется внутрь первого, в область, практически не содержащую воздуха. Таким образом исключается взаимодействие второго плазменного факела с атмосферными газами, что приводит к росту интенсивности спектральных линий за счет действия второго лазерного импульса.

Ключевые слова: лазерно-эмиссионная плазма; LIBS спектроскопия; спектральная линия; интенсивность спектральной линии; сдвоенные лазерные импульсы.

EXPERIMENTAL STUDY OF LIBS SIGNAL AMPLIFICATION IN INERT HELIUM GAS ENVIRONMENT

A.A. Liskovich

*Yanka Kupala State University of Grodno,
22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, L30041997@mail.ru*

The article presents the results of studying the influence of the surrounding gas medium composition on the intensity of spectral lines of laser-emission plasma formed by laser radiation on metal targets. It has been established that in a helium atmosphere the intensity of some spectral lines of aluminum and indium increases by 2–3 times under single-pulse laser excitation compared to an air medium. This effect is due to a decrease in the interaction of the expanding plasma with atmospheric gases. In the case of two-pulse laser action in a helium medium the increase in the intensity of spectral lines is not so significant. This is due to the fact that the first laser pulse forms a plasma cloud that effectively displaces the surrounding air, creating a local inert zone in front of the target surface. The plasma torch formed by the second laser pulse propagates inside the first one, into an area that is practically free of air. This eliminates the interaction of the second plasma torch with atmospheric gases, which leads to an increase in the intensity of spectral lines due to the action of the second laser pulse.

Keywords: laser-emission plasma; LIBS spectroscopy; spectral line; spectral line intensity; double laser pulses.

Введение

Неразрушающий контроль элементного состава веществ и изделий на различных этапах технологических процессов является неотъемлемой частью современного производства. В последнее время особую популярность и развитие получила LIBS-спектроскопия [1, 2]. При воздействии лазерного излучения на поверхность исследуемого образца формируется эрозионный кратер, а слой вещества толщиной в

несколько микрон испаряется, образуя над кратером светящийся плазменный факел, спектр излучения которого состоит из характерных атомных и ионных эмиссионных линий, накладывающихся на фон непрерывного спектра [3, 4]. Анализ этих спектральных линий позволяет определить химический состав материалов.

Ключевым преимуществом методов LIBS являются отсутствие необходимости в пробоотборе, бесконтактность измере-

ний (возможность дистанционного анализа), высокая скорость получения результатов [5, 6]. LIBS-спектроскопия делает возможным оперативный контроль состава вещества прямо в ходе технологических процессов, обеспечивая возможность своевременной корректировки для поддержания заданного химического состава материала в требуемых пределах.

Для получения максимально достоверных результатов LIBS анализа применяют методы усиления регистрируемого сигнала (интенсивности спектральных линий) [7, 8]. Лучшие успехи в этом достигнуты применением для формирования плазмы сдвоенных лазерных импульсов [9, 10].

Экспрессность LIBS анализа и функционированием производственных процессов в среде воздушной атмосферы обуславливают необходимость проведения его в воздушной среде при комнатной температуре и естественном давлении воздуха. Однако среда оказывает определенное влияние на процессы, происходящие при этом. Это влияние обусловлено тем, что лазерно-эмиссионная плазма, распространяясь в воздушную среду, взаимодействует с ее молекулами, в первую очередь с молекулами кислорода и азота. Это оказывает нелинейное влияние на трансформацию энергии в лазерно-эмиссионном факеле и искажает результаты количественного анализа [9, 10].

Экспериментальная установка

Исследования проводились на установке, описанной в [11, 12]. В ее основе лежал лазерно-эмиссионный спектрометр, разработанный в Институте физики НАН Беларуси. Лазерное излучение с длительностью импульса ~ 15 нс генерировалось YAG:Nd³⁺ лазером на основной гармонике (1.06 мкм) как одноимпульсном режиме, так и в режиме сдвоенных импульсов. Второй импульс генерировался с временной задержкой относительно первого, которая могла изменяться от 0 до 300 мкс. Энергия генерации лазерных импульсов могла изменяться в диапазоне 5 - 32 мДж.

Результаты и их обсуждение

Исследовалось усиление интенсивности спектральных линий алюминия и индия в среде гелия по отношению к воздуху в интервале длин волн 260-370 нм. Анализ спектров, показывает, что при формировании плазмы одиночными лазерными импульсами на поверхности алюминия в среде гелия интенсивность ее основных спектральных линий значительно возрастает по сравнению с интенсивностью спектральных линий, полученных в среде воздуха. Наибольший рост показывает линия 358.7 нм. Ее интенсивность в среде гелия возрастает в 2.5 раза.

Линии 358.7 нм, 360.16 нм и 361.24 нм являются ионными. В среде воздуха они сильно тушатся, по всей видимости, за счет столкновительной безизлучательной релаксации. При переходе в среду гелия исчезает канал тушения, что и приводит к росту их интенсивности.

Наблюдается рост интенсивности спектральных линий и при формировании лазерно-эмиссионной плазмы на поверхности мишени из алюминия сдвоенными лазерными импульсами в среде воздуха, однако, рост их интенсивности меньший, в том числе и у линии 358.7 нм (1.8 раз).

Переход к формированию лазерно-эмиссионной плазмы сдвоенными импульсами в среде гелия слабо влияет на интенсивность спектральных линий. Прирост их интенсивности составляет до 10 %. Это означает, что в среде гелия взаимодействие плазмы с окружающей средой более слабое по сравнению с воздухом.

При формировании лазерно-эмиссионной плазмы на мишени из индия одиночными лазерными импульсами переход от воздуха к гелию также приводит к значительному росту (~3 раз) интенсивности ряда спектральных линий. Линии 289 нм, 294.1 нм, 298.3 нм и 300.8 нм являются также ионными. В среде воздуха они также, по-видимому, сильно тушатся, за счет столкновений с атомами и молекулами атмосферных газов. Наблюдался также рост интенсивности спектральных

линий и при формировании плазмы на поверхности индия сдвоенными лазерными импульсами. Он составлял ~ 1.5 раза.

Переход к формированию плазмы на мишени из индия сдвоенными лазерными импульсами в среде воздуха привел к росту интенсивность практически всех спектральных линий в 2.5-3 раза. Более всего выросла интенсивность у спектральной линии 300.8 нм – в 3.5 раза.

При переходе к формированию плазмы сдвоенными лазерными импульсами в среде гелия прирост интенсивности линий находится на уровне 70 %. У слабых линий 315.8 нм и 319 нм он составлял 120 %.

Плазменный факел, сформированный сфокусированным лазерным импульсом на поверхности мишени, распространяется в газовую среду, ее окружающую. Газовая среда отбрасывается от мишени эрозионной плазмой. При этом на границе плазма – газовая среда происходит интенсивное перемешивание, протекают плазмохимические реакции. Это приводит к образованию различного рода соединений, которые впоследствии распадаются или конденсируются в наноразмерную фазу и распыляются в окружающую среду. Так как гелий является инертным газом, то взаимодействуя с лазерно-эмиссионной плазмой, он не образует устойчивых соединений, в отличие от атмосферных газов. Этим объясняется рост интенсивности спектральных линий плазмы алюминия и индия при замене воздуха на гелий.

Заключение

Таким образом, замена воздушной среды на гелий приводит к росту аналитического LIBS-сигнала в 2-3 раза. Это обусловлено инертностью гелия при взаимодействии горячей плазмы с окружающей ее средой. Можно предположить, что подобное будет наблюдаться и при использовании других инертных сред.

Библиографические ссылки

1. Singh J., Thakur S. *Laser-Induced breakdown spectroscopy*. Amsterdam: Elsevier; 2007. 454 p.

2. Кремерс Д., Л. Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. М.: Техносфера; 2009. 370 с
3. Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Григуть В.В. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.2. Матэматыка. Фіз. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2018; 8(2): 101–110.
4. Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Ермалицкий Ф.А. Измерение временных зависимостей эмиссионных спектров сплавов при двухимпульсной лазерной аблации. *ЖПС* 2019; 86(2): 83–89.
5. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курьян Н.Н. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэмат. Фіз. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2015; (3): 83–92.
6. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Анучин С.Н. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэмат. Фіз. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2016; 6(2): 57–63.
7. Зноско К.Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фіз. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне* 2021; 11(1): 94–106.
8. Kiris V.V., Tarasenko N.V., Nevar E.A., Nedelko M.I., Ershov-Pavlov E.A., Kuzmanović M. [et al.]. Enhancement of Analytical Signal of Laser Induced Breakdown Spectroscopy by Deposition of Gold Nanoparticles on Analyzed Sample. *Journal of Applied Spectroscopy* 2019; 86(5): 900–907.
9. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2020; 10(2): 103–115.
10. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне* 2020; 10(3): 100–113.
11. Зноско, К.Ф. Механизмы усиления интенсивности спектральных линий плазмы и роста выноса материала из эрозионного кратера при двухимпульсной лазерной аблации. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Сер.2. Матэм. Фіз. Інфармат., выліч.тэхніка і кір.* 2023; 13(1): 116–132.
12. Зноско К.Ф., Лещик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной аблации цветных металлов. *Веснік ГрДУ імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка* 2021; 11(1): 45–58.