

УДК 535.33; 533.9; 543.423.1

## УПРАВЛЕНИЕ ПЛОТНОСТЬЮ МОЩНОСТИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ МЕТАЛЛОВ

Ермалицкая К.Ф.

*Белорусский государственный университет  
Минск, Республика Беларусь*

**Аннотация.** Разработан метод управления плотностью мощности лазерного излучения при двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии металлов, позволяющих проводить послойный анализ функциональных и защитных покрытий с субмикронным разрешением слоя. Данный метод основывается на расфокусировке лазерного луча относительно поверхности образца, при этом за счет увеличения площади лазерной абляции в плазму поступает достаточное количество атомов для того, чтобы при дополнительном возбуждении их вторым импульсом из сдвоенных аналитический сигнал значительно превышал уровень шумов.

**Ключевые слова:** лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, одноимпульсная и двухимпульсная лазерная абляция, послойный анализ покрытий.

## POWER DENSITY CONTROL OF LASER RADIATION IN DOUBLE PULSE LASER ABLATION OF METALS

Ermalitskaia K.

*Belarussian State University  
Minsk, Belarus*

**Abstract.** A method has been developed for controlling the power density of laser radiation in double pulse laser atomic emission spectroscopy of metals, which allows for layer-by-layer analysis of functional and protective coatings with a submicron layer resolution. This method is based on the defocusing of the laser beam relative to the sample surface, while due to the increase in the laser ablation area, a sufficient number of atoms enter the plasma so that, upon their additional excitation by the second pulse from the doubled ones, the analytical signal significantly exceeds the noise level.

**Key words:** laser atomic emission spectroscopy, single-pulse and double-pulse laser ablation, layer-by-layer analysis of coatings.

*Адрес для переписки: Ермалицкая К.Ф., пр. Независимости, 70, комн. 144, г. Минск 220113, Республика Беларусь, e-mail: ermалitskaia@gmail.com*

**Введение.** Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия (ЛАЭС) обеспечивает высокую чувствительность, оперативность и возможность проведения исследования образцов с пространственным разрешением, лимитируемым размером сфокусированного лазерного пучка на образце. ЛАЭС позволяет быстро определить основные компоненты сырья и готовых изделий (например, для контроля и анализа поверхностных слоев, анализа бронзовых и медных сплавов). В настоящее время ЛАЭС развивается в связи с возможностью проводить многокомпонентный анализ с высоким пространственным разрешением по поверхности, причем деструкция образца не велика (диаметр кратера на поверхности до 1 мм, глубина – несколько десятков мкм), без какой-либо пробоподготовки (химической и механической), с небольшим количеством вещества необходимого для анализа (~10-10-10-11 г).

ЛАЭС преимущественно используется для элементного анализа массивных образцов, когда не предъявляется строгих требований к минимизации деструкции поверхности и снижению толщины испаряемого слоя при послойном анализе. Однако, в ряде случаев, необходимо существен-

но снизить толщину испаряемого слоя (вплоть до субмикронного диапазона). Одним из наиболее подходящих для этой цели подходов является снижение плотности мощности лазерного излучения на поверхности образца.

При управлении плотностью мощности необходимо контролировать аналитический сигнал (отношение сигнал/шум для зарегистрированных относительных интенсивностей спектральных линий по сравнению с фоном), как для основных компонентов сплавов, так и для «третьих» элементов, концентрация которых в образце, и в абляционной плазме не превышает единицы – десятые доли процента.

Одиночные лазерные импульсы используются как источники возбуждения эмиссионных спектров при качественном и количественном анализе. Для повышения чувствительности анализа и снижения погрешности применяется в качестве источника возбуждения спектра сдвоенные лазерные импульсы (СЛИ), сдвинутые относительно друг друга во времени.

**Лазерный спектрометр ЛАЭМС.** Исследования проводились на лазерном двухимпульсном атомно-эмиссионном спектрометре ЛАЭМС

(производства кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета БГУ) [1]. Основные параметры ЛАЭМС:

- Источник возбуждения плазмы – двухимпульсный Nd:YAG-лазер с диодной накачкой, с частотой повторения импульсов  $f_l = 10$  Гц и длиной волны  $\lambda = 1064$  нм.

- Длительность импульсов  $t_l \approx 10$  нс.

- Межимпульсный интервал  $\Delta t = 0-100$  мкс (шаг 1 мкс).

- Диапазон анализируемых длин волн  $\Delta\lambda = 260-760$  нм.

- Энергия лазерного импульса  $E_{\text{имп}} = 10-100$  мДж.

Количество испаряемого вещества определяется плотностью потока излучения  $q$  на поверхности образца. Величину  $q$  находят следующим образом:  $q \approx E_{\text{имп}}/\tau S$ , где  $E_{\text{имп}}$  и  $\tau$  – энергия и длительность лазерного импульса на полувысоте соответственно,  $S$  – площадь лазерного пятна.

Управление плотностью мощности, т.е. изменение  $q$  может проводиться тремя способами:

- уменьшение энергии импульса – при этом снижается температура, плотность и коэффициент поглощения излучения плазмой, что приводит к увеличению степени деструкции поверхности;

- основанный на использовании оптических светофильтров с различными коэффициентами поглощения лазерного излучения;

- метод расфокусировки лазерного луча – фокусировки на некотором расстоянии  $\Delta f$  от поверхности образца.

Использование светофильтров позволяет уменьшить плотность потока на поверхности образца без изменения площади пятна. При этом значительно снижается количество испаренного вещества и падает интенсивность спектральных линий элементов до уровня фона, что не позволяет использовать данный способ для управления плотностью мощности в аналитических целях.

При расфокусировке лазерного луча в плазму поступает больше вещества, чем при аналогичной плотности потока с использованием светофильтров, из-за увеличения площади испарения. Значение  $q$  изменялось путем увеличения диаметра лазерного пятна на поверхности объекта, т.е. в результате расфокусировки  $\Delta f$  лазерного луча при фиксированной мощности лазерного импульса. Расфокусировка осуществлялась с помощью поворота микровинта с шагом 1,0 мм. В зависимости от положения образца относительно точки фокуса лазерного луча выделяются три типа расфокусировки: нулевая ( $\Delta f = 0$ ), положительная ( $\Delta f > 0$ ) и отрицательная ( $\Delta f < 0$ ) (рис. 1).

Для определения оптимального значения параметра расфокусировки  $\Delta f$  была исследована зависимость относительных интенсивностей наиболее сильной спектральной линии цинка, алюминия и свинца образцов чистых металлов от расфокусировки лазерного луча на поверхности объекта (рис. 2).

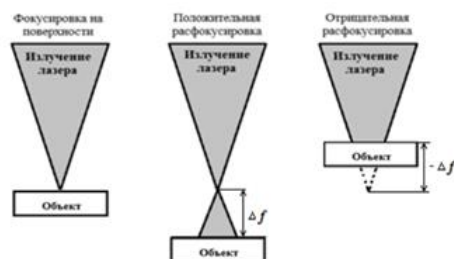


Рисунок 1 – Схематическое изображение различных схем фокусировки лазерного луча относительно поверхности объекта

Увеличение аналитического сигнала при расфокусировке лазерного излучения  $\pm 1-15$ , мм от поверхности, связано с уменьшением экранировки лазерного излучения передним фронтом распространяющейся плазмы из-за снижения ее плотности. Большее увеличение интенсивности при положительной расфокусировке объясняется тем, что распространяющаяся абляция плазма будет испытывать дополнительное возбуждение при пролете через точку фокуса лазерного луча.

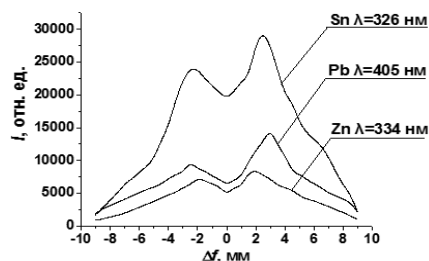


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности спектральных линий цинка, свинца и олова от параметра расфокусировки  $\Delta f$  при лазерной абляции двоекными лазерными импульсами с  $\Delta t = 10$  мкс

**Выводы.** Использование метода расфокусировки лазерного излучения позволяет снижать толщину испаряемого лазерными импульсами слоя вещества путем снижения плотности мощности лазерного излучения.

#### Литература

1. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай [и др.] // ЖПС. – 2021. – Т. 88, № 3. – С. 486–492.