

УДК 533.09.082, 533.922, 533.924, 535.243.2

Управление плотностью мощности лазерного излучения для элементного анализа покрытий и тонких слоев металла

У. К. Щерба,
К. Ф. Ермалицкая

Учреждение образования «Белорусский государственный
университет», г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, основанная на эффективном испарении малого количества образца (10^{-10-11} г), атомизации и одновременном возбуждении эмиссионных спектров всех компонентов является очень популярным методом экспресс-анализа многокомпонентных сплавов, позволяя проводить исследование без предварительной химической и механической подготовки поверхности. В большинстве работ по данной тематике игнорируется процесс выбора спектральных линий элементов для расчетов, отдается предпочтение наиболее интенсивным линиям в исследуемом спектральном диапазоне. Однако, не редко возможна ситуация, когда у основного компонента (содержание которого может находиться в пределах 60–99 %), в рассматриваемом регионе присутствуют только резонансные линии, для которых свойственно самопоглощение, выражающееся в искажении контура линии и появлении «провала» на центральной длине волны. Снижение регистрируемой интенсивности резонансных линий, путем управления параметрами лазерного излучения зачастую приводит к падению до уровня фона интенсивности спектральных линии примесей, концентрация, которых менее 1 %. В качестве объекта исследования был выбран «максимально сложный объект» – тонкое покрытие легкоплавкого галлия на подложке из тугоплавкого вольфрама. Методика качественного анализа, позволяющая одновременно регистрировать резонансные линии галлия и «слабые линии» подложки вольфрама, заключалась в лазерной абляции поверхности образца сдвоенными лазерными импульсами (варьирование межимпульсного интервала дает возможность управлять процессами дополнительного возбуждения эмиссионных спектров в первичной плазме) и управления плотностью мощности путем расфокусировки лазерного луча относительно поверхности.

Ключевые слова: лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия, лазерная абляция, сдвоенные импульсы, самопоглощение, управление плотностью мощности.

Laser Power Density Control for Elementary Analysis of Coatings and Thin Metal Layers

Ulyana K. Shcherba,
Ksenia F. Ermalitskaya

Educational institution "Belarussian State University",
Minsk, Republic of Belarus

Abstract. Laser atomic emission spectroscopy, based on the efficient evaporation of a small sample amount (10^{-10-11} g), atomization, and simultaneous excitation of emission spectra of all components, is a highly popular method for rapid analysis of multicomponent alloys. It enables analysis without prior chemical or mechanical surface preparation. In most studies on this topic, the process of selecting spectral lines of elements for calculations is overlooked, with preference given to the most intense lines in the studied spectral range. However, a common scenario is that the main component (with a concentration ranging from 60–99 %) may only have resonance lines in the considered region, which are prone to self-absorption. This manifests as line contour distortion and the appearance of a "dip" at the central wavelength. Reducing the recorded intensity of resonance lines by adjusting laser radiation parameters often leads to a drop in the intensity of spectral lines from impurities (with concentrations below 1 %) to the background level. The study focused on a "maximally complex object" – a thin coating of low-melting

gallium on a refractory tungsten substrate. The qualitative analysis technique, enabling simultaneous detection of gallium's resonance lines and the "weak lines" of the tungsten substrate, involved laser ablation of the sample surface with double laser pulses (varying the interpulse interval allows control over additional excitation processes in the primary plasma) and power density adjustment through laser beam defocusing relative to the surface.

Keywords: laser induced breakdown spectroscopy, laser ablation, double laser pulses, direct microanalysis, self-absorption, technique for controlling the power density.

ВВЕДЕНИЕ

Лазерная атомно-эмиссионная спектроскопия – это методика сверхбыстрого элементного анализа вещества, основанная на явлении лазерной абляции. Лазерные лучи, сфокусированные в одну точку на поверхности образца, нагревают образец и инициируют образование плазмы. Детектор спектрометра (ПЗС-линейка) считывает излучение абляционной плазмы и передает на компьютер, который в свою очередь строит по этим данным так называемый спектр образца – график зависимости интенсивности света от его длины волны. Каждый химический элемент имеет свой характерный набор линий в спектре. Проведя анализ полученного в ходе лазерной абляции спектра возможно с большой точностью узнать элементарный состав образца, а также в каких пропорциях находятся составляющие образец вещества. [1]

Изначально было предложено использовать метод одноимпульсной лазерной абляции (SP-LIBS). В данном подходе предполагается одновременное испускание двух лазерных излучений из двухимпульсного лазера, при этом оптически лучи распространяются по одному пути и воздействуют на одну точку поверхности. Однако было обнаружено, что при малых концентрациях примесей и большом загрязнении поверхности образца интенсивности спектральных линий примесей находятся на уровне фона, и не могут быть зарегистрированы. Для получения более точных результатов был предложен метод двухимпульсной лазерной абляции (DP-LIBS), в котором между двумя лазерными импульсами можно задать микросекундный временной интервал, при этом вблизи поверхности еще сохраняется горячее парогазовое облако, состоящее из атомов и ионов исходного образца, таким образом энергия второго импульса расходуется преимущественно не на абляцию, а на дополнительное возбуждение абляционной плазмы. Регистрация эмиссионных спектров проводится через 1 мкс после завершения второго лазерного импульса, что соответствует времени, за которое плазма остывает от 1 000 000 К до 3000–7000 К – оптимальной температуры для регистрации эмиссионных спектров отдельных атомов. Было замечено, что при использованных сдвоенных лазерных импульсах интенсивности линий примесей значительно (до 10 раз в зависимости от массы и теплофизических параметров вещества) возрастают (рис. 1) [2].

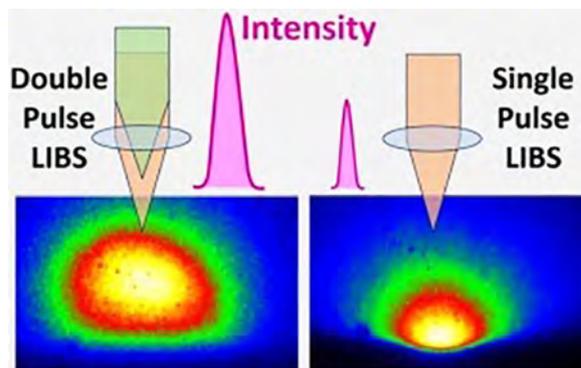


Рисунок 1 – Схематическое изображение процессов одноимпульсной SP-LIBS и двухимпульсной лазерной абляции DP-LIBS [2]

Figure 1 – Comparison of line intensities using SP-LIBS and DP-LIBS [2]

Возрастание интенсивности объясняется тем, что при использовании сдвоенных лазерных импульсов энергия второго лазерного импульса идет в основном на дополнительный нагрев плазмы, полученной при первом импульсе, и возбуждение уже присутствующих в плазме атомов компонентов образца. При этом суммарная энергия и мощность двух лазерных импульсов при одно- и двухимпульсной лазерной абляции одинаковы. Однако, помимо интенсивности возрастает и деструкция образца, но несущественно (от 1,2 до 1,7 раз при росте сигнала от 3 до 10 раз) [3].

При использовании DP-LIBS для получения необходимых результатов исследователь может изменять временной межимпульсный интервал, а также геометрию падения сдвоенных лазерных импульсов: коллинеарная, перекрестная, ортогональная с повторным нагревом, ортогональная с предварительной абляцией (рис. 2) [4].

В исследовании [5] авторы сравнили увеличение интенсивности линии серебра при использовании различной геометрии DP-LIBS (рис. 3). В работе использовался Nd:YAG лазер с диодной накачкой, длина волны 1064 нм, в качестве второго лазерного луча использовалась вторая гармоника Nd:YAG лазера с длиной волны 532 нм. Из [5] следует, что при использовании коллинеарной геометрии интенсив-

ность линии возросла в 6 раз (рис. 3 а), при использовании ортогональной геометрии с предварительной

абляцией интенсивность линии возрастает в 18 раз по сравнению с SP-LIBS (рис. 3 б).

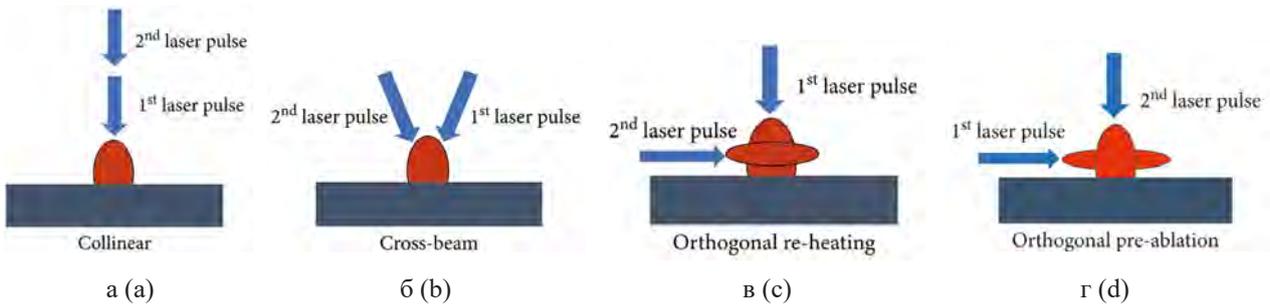


Рисунок 2 – Геометрия сдвоенных лазерных импульсов:
 а – коллинеарная; б – перекрестная; в – ортогональная с повторным нагревом;
 г – ортогональная, предварительной абляции [4]

Figure 2 – Geometry of double laser pulses:
 a – collinear; b – cross; c – orthogonal with repeated heating; d – orthogonal, pre-ablation [4]

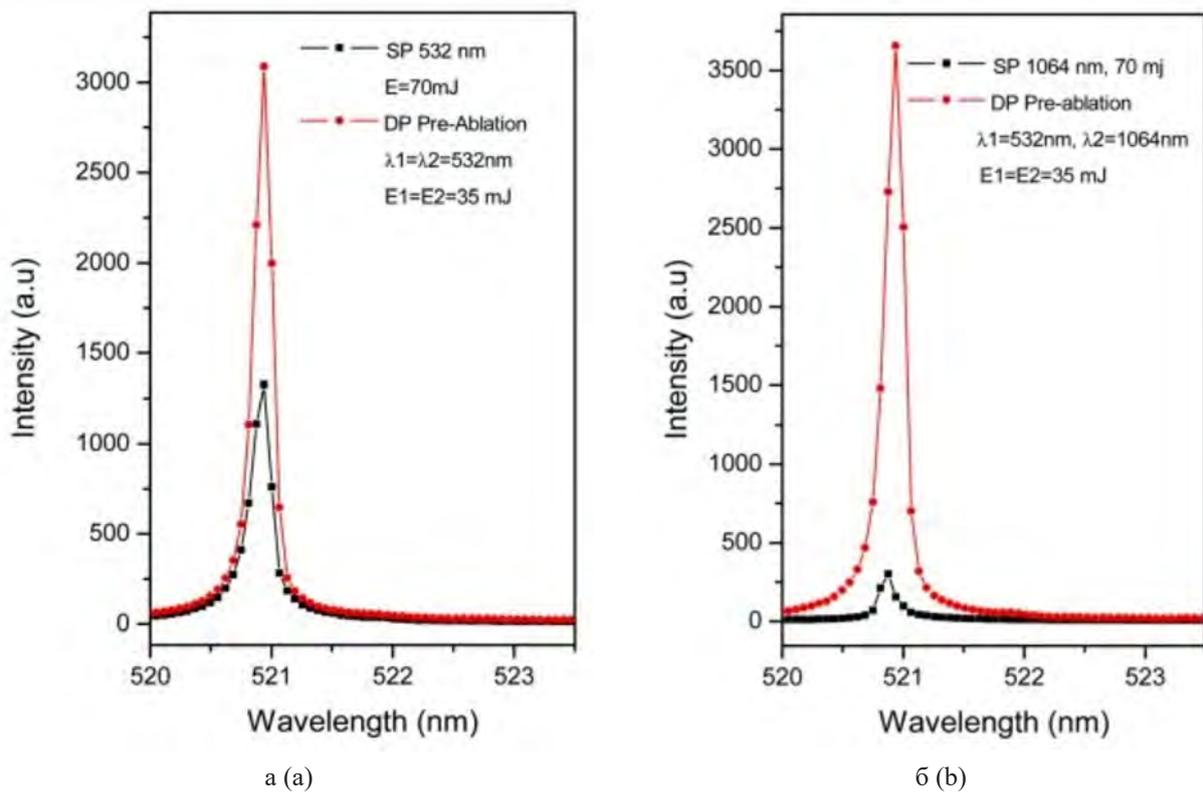


Рисунок 3 – Сравнение интенсивности линии серебра при одно- и двухимпульсной лазерной абляции:
 а – коллинеарная геометрия;
 б – ортогональная геометрия с предварительной абляцией сдвоенных лазерных импульсов [5]

Figure 3 – Comparison of the intensity of the silver line during single- and double-pulse laser ablation:
 а – collinear geometry; б – orthogonal geometry with pre-ablation of double laser pulses [5]

Из [5] можно сделать вывод, что интенсивность линии при ортогональной геометрии предварительной абляции увеличивается во много раз больше, чем при использовании коллинеарной геометрии. Однако осуществление ортогональной геометрии технически намного сложнее чем коллинеарной. Для увеличения интенсивности линии при стандартных измерениях достаточно будет усиления при коллинеарной геометрии.

Методика LIBS за счёт большого ряда преимуществ имеет широкое распространение в различных видах исследования: металлургия, археология, искусствоведение, медицина и так далее. Так, например, в [6] проводят исследование плазменной активности наночастиц меди, полученных с помощью LIBS из «чистых» и «грязных» образцов. Состав образцов из которых получены наночастицы проводился так же с использованием LIBS. Исследование [7] направлено на изучение влияния различных параметров лазерного сканирования образца на выполнение объемной лазерной абляции бронзового образца. В статье [8] представлено получение оксида

графена из кожуры банана, манго и мандарина с помощью лазерной абляции. Полученные наночастицы обладают люминесцентными, химическими и электрическими свойствами, позволяющими реализовать их в медицинских, биологических и оптоэлектронных устройствах. А в [9] предлагается новый подход к паллиативному лечению рака эндометрия у неоперабельных больных основанный на явлении лазерной абляции. В [10] исследователи проводят оценку толщины папины на археологических образцах 5–8 века н.э. найденных на территории Беларуси.

Цель нашего исследования – разработка методики проведения элементного анализа образцов с сильным влиянием самопоглощения. Объектом исследования была капля легкоплавкого галлия нанесенная на тугоплавкую вольфрамовую пластину.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Оборудование. Для осуществления лазерной абляции и получения спектра в нашей работе использовался ЛАЭМС спектрометр (рис. 4). Оптическая схема прибора – рисунок 5.



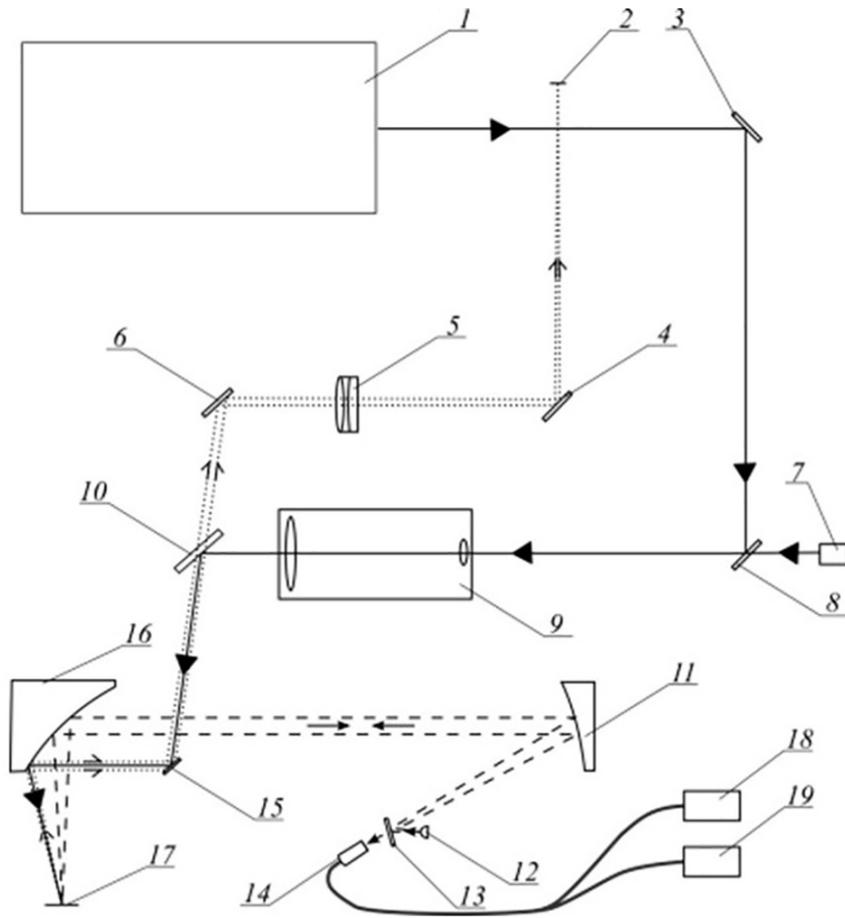
а (a)



б (b)

Рисунок 4 – Строение и внешний вид рабочей установки:
а – внешний вид спектрометра; б – внутреннее строение спектрометра

Figure 4 – Structure and appearance of the working installation:
а – appearance of the spectrometer; б – the internal structure of the spectrometer



1 – двухимпульсный лазер; 2 – видеокамера; 3, 4, 6, 15 – неселективные плоские зеркала;
 5 – изображающий объектив (наблюдательный канал); 7 – прицельный лазер;
 8 – селективное плоское зеркало; 9 – телескоп; 10 – полупрозрачное плоское зеркало;
 11 – параболическое зеркало (внеосевой угол 30°); 12 – светодиод подсветки;
 13 – плоское зеркало (нормально убрано, ставится при необходимости подсветки объекта);
 14 – вход оптоволокну (к спектрометру); 16 – параболическое зеркало (внеосевой угол 90°); 17 – объект;
 18, 19 – спектрометры [11]

1 – two-pulse laser; 2 – video camera; 3, 4, 6, 15 – non-selective flat mirrors;
 5 – imaging lens (observation channel); 7 – aiming laser; 8 – selective flat mirror; 9 – telescope;
 10 – translucent flat mirror; 11 – parabolic mirror (off-axis angle of 30°); 12 – LED backlight;
 13 – flat mirror (normally removed, placed if necessary to illuminate the object);
 14 – fiber optic input (to the spectrometer); 16 – parabolic mirror (off-axis angle of 90°); 17 – object;
 18, 19 – spectrometers [11]

Рисунок 5 – Оптическая схема спектрометра

Figure 5 – Optical scheme of the spectrometer

Описание исследования. Объект исследования – капля галлия (размером 2×3 мм, нанесенная на тугоплавкую вольфрамовую подложку и под-

вергнутая воздействию низких температур (жидкого азота) для улучшения сцепления с подложкой) (рис. 6).



Рисунок 6 – Объект исследования: капля тугоплавкого галлия (размером 2×3 мм, нанесенная на тугоплавкую вольфрамовую подложку и подвергнутая воздействию низких температур (жидкого азота) для улучшения сцепления с подложкой)

Figure 6 – The object of the study: a drop of refractory gallium (2×3 mm in size, deposited on a refractory tungsten substrate and exposed to low temperatures (liquid nitrogen) to improve adhesion to the substrate)

Экспериментально была доказана возможность проведения прямого микроанализа легкоплавкого галлия в атмосфере воздуха при атмосферном давлении методом лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии. Однако, в рассматриваемом спектральном диапазоне, выбранном таким образом, чтобы была возможность одновременно зарегистрировать, как линии вольфрама, так и линии галлия, у последнего могут быть зарегистрированы только резонансные линии (рис. 7).

Наблюдаемый провал в центре спектральной линии высокой интенсивности связан с явлением самопоглощения – из-за значительной концентрации в образце, и как в следствии, в абляционной плазме основного компонента, испущенные фотоны, относящиеся к резонансным линиям (переходы с ближайших возбужденных уровней на основной) с большей вероятностью будут поглощены соседними атомами галлия в плазме, и не дадут вклад в регистрируемый спектрометром сигнал. Из-за самопоглощения невозможно определить реальную пиковую интенсивность линий галлия и, следовательно, провести элементный анализ.

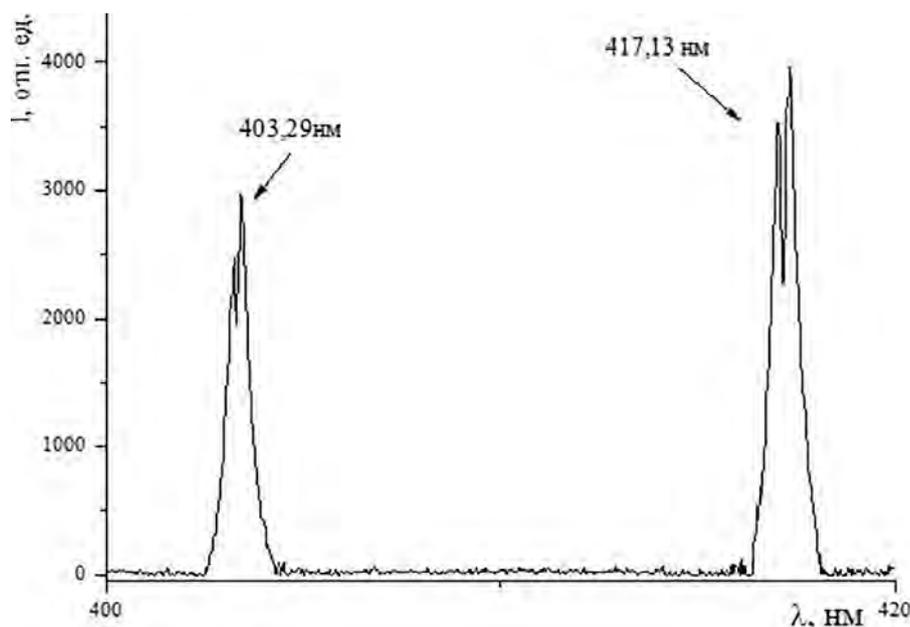


Рисунок 7 – Фрагмент спектр галлия при двухимпульсной лазерной абляции образца сфокусированным излучением

Figure 7 – Fragment of the spectrum of gallium during two-pulse laser ablation of a sample with focused radiation

Стандартные подходы (снижение энергии лазерных импульсов с 50 до 10 мДж) по снижению количества атомов галлия в плазме приводят к уменьшению содержания примесей и «третьих» элементов,

из-за чего спектральные линии последних снижаются до уровня фона. Нами предложен метод управления плотностью мощности лазерного излучения, который исключает полное исчезновение линий при-

месей в регистрируемых спектрах.

При стандартных процедуре лазерной абляции в рамках лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии лазерное излучение с помощью встроенной в спектрометр web-камеры фокусируется на поверхность. Диаметр пятна на образце при этом составляет порядка 100 мкм, что обеспечивает эффективную абляцию (из-за высокой плотности мощности практически отсутствует плавление металла, и на поверхности не формируется жидкая фаза), при этом атомы из твердого состояния напрямую переходят в плазму. При перемещении образца навстречу (отрицательная расфокусировка) или от (положительная) точки фокуса лазерного луча, за счет увели-

чения площади лазерного пятна на образце снижается плотность мощности, уменьшается и количество вещества попадающего в плазму, одновременно растет и площадь поперечного сечения плазмы, а плотность ее снижается. При этом падает и вероятность самопоглощения испущенного резонансного фотона атомами галлия, однако интенсивность спектральных линий вольфрама не снижается до уровня фона, так как при расфокусировке увеличивается площадь образца, с которой происходит испарение, а также снижается влияние основного компонента плазмы (галлия) на процесс поступления в парогазовое облако атомов вольфрама и их возбуждение (рис. 8).

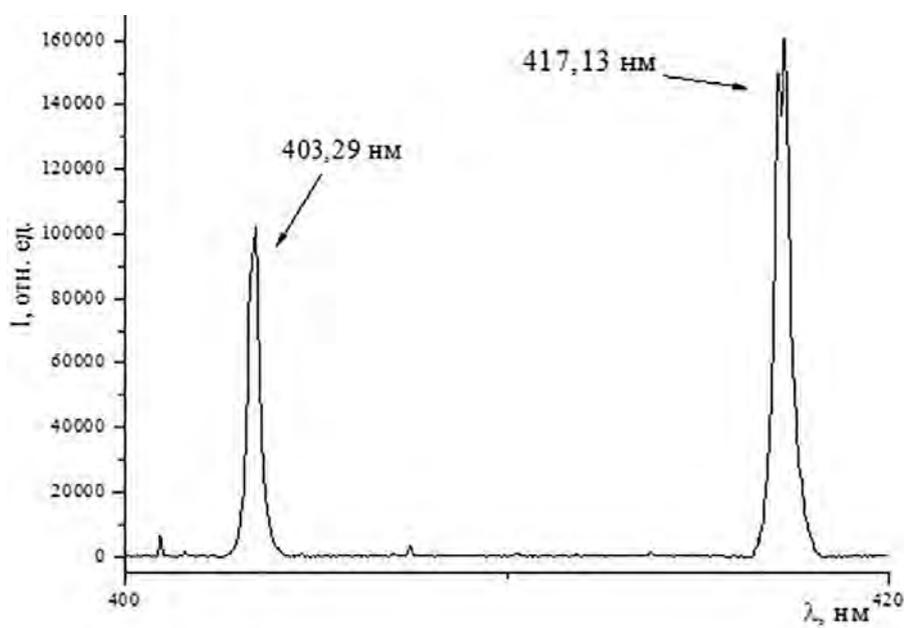


Рисунок 8 – Спектр капли галлия при расфокусировке 8 мм

Figure 8 – Spectrum of a gallium drop with 8 mm defocusing

Экспериментально были определены оптимальные параметры лазерного излучения для проведения элементного анализа – энергия лазерных импульсов, обеспечивающая максимальную интенсивность спектральных линий, составила 50 мДж, временной интервал между двумя сдвоенными лазерными импульсами – 10 мкс, соответствующий наибольшему сигналу, как для вольфрама, так и для галлия. Для выбора оптимального расстояния расфокусировки от точки фокуса лазерного луча до поверхности образца, был проведен ряд экспериментов, в которых анализировалась динамика интенсивности спектральных линий галлия и вольфрама при последовательной двухимпульсной лазерной абляции образца 70 сдво-

енными лазерными импульсами. Критерием выбора оптимального расстояния расфокусировки было превышение интенсивности спектральных линий обоих компонентов по крайней мере в 2 раза уровня фона при максимальном расстоянии. Экспериментально было определено, что такое расстояние составляет 8 мм от точки фокуса, при дальнейшем увеличении расстояние расфокусировки интенсивность спектральных линий вольфрама падает до уровня фона, что делает невозможным проведение элементного анализа. Нормированное на максимальную концентрацию (100 %, для галлия – это верхний слой, для вольфрама – слой, когда интенсивность галлия упала снизилась до уровня фона) приведена на рисунке 9.

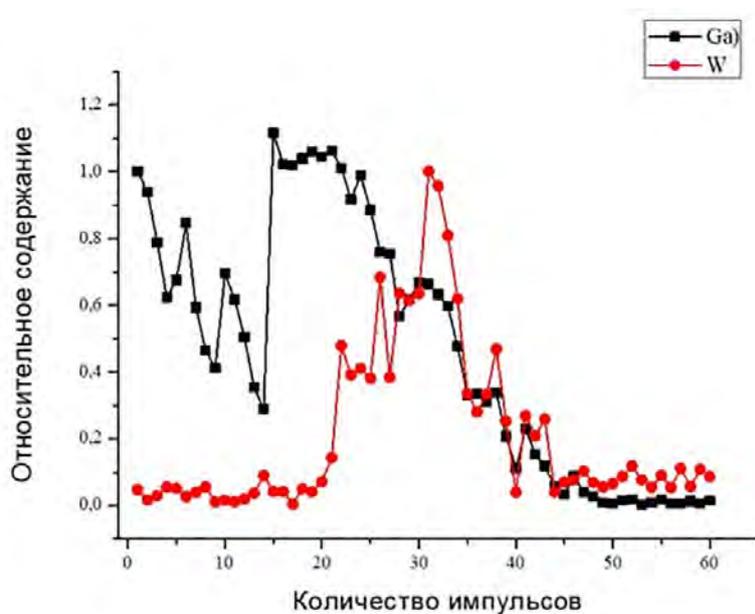


Рисунок 9 – Зависимость относительного содержания галлия и вольфрама от количества двоек лазерных импульсов произведенных в одну точку при расфокусировке 8 мм

Figure 9 – Dependence of the relative gallium and wolfram content on the number of double laser pulses produced at one point with 8 mm defocusing

Из рисунка 9 видно резкое возрастание относительного содержания галлия на 15 импульсе, что говорит о пробитии лазерным лучом загрязнений поверхности и прохождению к «чистому» галлию. Далее относительное содержание галлия на протяжении 10 импульсов остается постоянным и после 25 импульса начинает падать. Одновременно с этим начинает возрастать относительное содержание вольфрама. Падение относительного содержания галлия и рост вольфрама указывает на приближении лазерных лучей к вольфрамовой подложке. После 40 импульса значения относительного содержания обоих элементов выравнивается и выходит на постоянное значения, что говорит нам о том, что мы пробиты подложку образца.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования была экспериментально доказана возможность проведения прямого микроанализа галлия в атмосфере воздуха при стандартном давлении. При проведении прямого микроанализа капли галлия, нанесенной на вольфрамовую подложку, были замечены провалы в центре сильных спектральных линий галлия. Наблюдаемые провалы связаны с явлением самопоглощения. Для его корректировки был предложен метод управления плотностью мощности. Замечено выпрямление спектральных линий галлия при положительной расфокусировке 8 мм. Исследованы зависимости относительных содержаний галлия и вольфрама от количества двоек лазерных импульсов, произведенных в одну точку при расфокусировке 8 мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Miziolek, AW Laser Induced Breakdown Spectroscopy / AW Miziolek, V Palleschi, I Schechter. – Cambridge: Cambridge University Press; 2006. – 620 p.
2. Rizwan, M. Double Pulse laser-induced breakdown spectroscopy (DP-LIBS): A Comprehensive technique Review [Electronic resource] / M. Rizwan, M.-S. Afgan, S. Saleem, K. Kou, Z. Hou, Z. Wang // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2025. – Vol. 227. – 107168. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2025.107168>.

org/10.1016/j.sab.2025.107168. Accessed: 1 May 2025. DOI: 10.1016/j.sab.2025.107168

3. Victor Ulises Lev Contreras Loera. Double-Pulse and Calibration-Free Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) on quantitative analysis. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Leon: Centro de Investigaciones en Óptica A. C. – 2013. – 116 p. <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/>

bitstream/1002/314/1/15622.pdf.

4. Diwakar, P.K. Role of laser pre-pulse wavelength and inter-pulse delay on signal enhancement in collinear double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy / P. K. Diwakar, S. S. Harilal, J. R. Freeman, A. Hassanein // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. – 2013. – Vol. 87. – Pp. 65–73. DOI: 10.1016/j.sab.2013.05.015

5. Rashid, B. A comparative study of single and double pulse of laser induced breakdown spectroscopy of silver [Electronic resource] / B. Rashid, R. Ahmed, R. Ali // *Physics of Plasma*. – 2011. – Vol. 18. – 073301. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.3599591>. Accessed: 1 May 2025. DOI: 10.1063/1.3599591.

6. Pò, C. L. Pulsed Laser Ablation of Recycled Copper in Methanol: A new route toward sustainable plasmonic and catalytic nanostructures [Electronic resource] / C. L. Pò, S. Boscarino, S. Scalese, S. Boninelli, M. G. Grimaldi, F. Ruffino // *Applied Surface Science Advances*. – 2025. – Vol. 26. – 100712. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100712>. Accessed: 1 May 2025. DOI: 10.1016/j.apsadv.2025.100712.

7. Zahrani, E. G. Investigation of scanning strategies on performance of nanosecond and picosecond laser volume ablation of bronze [Electronic resource] / E. G. Zahrani, B. Azarhoushang // *Optics and Laser Technology*. – 2024. – Vol. 178. – 111226. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111226>. Accessed: 1 May 2025. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111226.

8. Carrillo, F. S. Study of properties of graphene oxide nanoparticles obtained by laser ablation from banana, mango, and tangerine peels [Electronic resource]

/ F. S. Carrillo, A.O. Díaz, O. Z. Moran, O. S. Sánchez, J. F. Méndez, J-A. G. Cervantes // *Nano Trends*. – 2025. – Vol. 9. – 100091. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025.100091>. Accessed: 1 May 2025. DOI: 10.1016/j.nwnano.2025.100091.

9. Lavie, M. Hysteroscopic endometrial laser ablation – A novel approach for palliative management of endometrial cancer in inoperable patients [Electronic resource] / M. Lavie, G. Rattan, D. Englander, S. Ram, N. Solomon, N. Michaan, D. Grisaru, I. Laskov // *Gynecologic Oncology Reports*. – 2025. – Vol. 58. – 101728. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.gore.2025.101728>. Accessed: 1 May 2025. DOI: 10.1016/j.gore.2025.101728.

10. Воропай, Е. С. Применение двухимпульсной лазерной атомно-эмиссионной спектроскопии в археологических исследованиях / Е. С. Воропай, К. Ф. Ермалицкая, А. В. Марковская, У. К. Щерба // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики, аэрокосмических технологий и физики конденсированного состояния : материалы VIII Международ. науч.-практ. конференции, 22–23 мая 2025 г. Минск. – Минск : «СтройМедиаПроект», 2025. – С. 136–138.

11. Воропай, Е. С. Лазерный атомно-эмиссионный спектрометр с ахроматической оптической системой / Е. С. Воропай, И. М. Гулис, Д. С. Тарасов, К. Ф. Ермалицкая, М. П. Самцов, А. Е. Радько, А. П. Зажогин, К. А. Шевченко, А. А. Кирсанов // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2021. – Том 88. – №3. – С. 485–492. <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/832/0>.

REFERENCES

1. Miziolek AW, Palleschi V, Schechter I. Laser Induced Breakdown Spectroscopy. Cambridge: Cambridge University Press; 2006:620.

2. Rizwan M, Afgan M-S, Saleem S, Kou K., Hou Z, Wang Z. Double Pulse laser-induced breakdown spectroscopy (DP-LIBS): A Comprehensive technique Review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2025;227:107168. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.sab.2025.107168> [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1016/j.sab.2025.107168

3. Victor Ulises Lev Contreras Loera. Double-Pulse and Calibration-Free Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) on quantitative analysis. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy. Leon: Centro de Investigaciones en Óptica A.C.; 2013:116. <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/314/1/15622.pdf>

4. Diwakar PK, Harilal SS, Freeman JR, Hassanein A. Role of laser pre-pulse wavelength and inter-pulse delay on signal enhancement in collinear double-pulse laser-induced breakdown spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2013;87:65–73. [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1016/j.sab.2013.05.015

5. Rashid B, Ahmed R, Ali R. A comparative study of single and double pulse of laser induced breakdown spectroscopy of silver. *Physics of Plasma*. 2011;18:073301. Available from: <https://doi.org/10.1063/1.3599591> [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1063/1.3599591

6. Pò CL, Boscarino S, Scalese S, Boninelli S, Grimaldi MG, Ruffino F. Pulsed Laser Ablation of Recycled Copper in Methanol: A new route toward sustainable plasmonic and catalytic nanostructures. *Applied Surface Science Advances*. 2025;26:100712.

Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apsadv.2025.100712> [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1016/j.apsadv.2025.100712

7. Zahrani EG, Azarhoushang B. Investigation of scanning strategies on performance of nanosecond and picosecond laser volume ablation of bronze. *Optics and Laser Technology*. 2024;178:111226. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111226> [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1016/j.optlastec.2024.111226

8. Carrillo FS, Díaz AO, Moran OZ, Sánchez OS, Méndez JF, Cervantes J-AG. Study of properties of graphene oxide nanoparticles obtained by laser ablation from banana, mango, and tangerine peels. *Nano Trends*. 2025;9:100091. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.nwnano.2025.100091> [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1016/j.nwnano.2025.100091

9. Michael Lavie, Gilad Rattan, Dana Englander, Shai Ram, Neta Solomon, Nadav Michaan, Dan Grisaru, Ido Laskov. Hysteroscopic endometrial laser ablation – A novel approach for palliative management of endometrial cancer in inoperable patients. *Gynecologic Oncology Reports*. 2025;58:101728. Available from:

<https://doi.org/10.1016/j.gore.2025.101728> [Accessed 1 May 2025]. DOI: 10.1016/j.gore.2025.101728

10. Voropai ES, Ermalitskaya KF, Markovskaya AV, Shcherba UK. Application of double-pulse laser atomic emission spectroscopy in archaeological research. In: *Prikladnye problemy optiki, informatiki, radiofiziki, aerokosmicheskikh tekhnologiy i fiziki kondensirovannogo sostoyaniya : materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konferentsii = Applied problems of optics, computer science, radiophysics, aerospace technologies and condensed matter physics: Proceedings of the VIII International scientific-practical conference, May 22-23, 2025, Minsk*. Minsk: «StroyMediaProekt»; 2025:136–138. (In Russ.)

11. Voropay ES, Gulis IM, Tarasov DS, Ermalitskaya KF, Samtsov MP, Rad'ko AE, Zazhogin AP, Shevchenko, KA, Kirsanov AA. Laser atomic emission spectrometer with an achromatic optical system. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii = Journal of applied spectroscopy*. 2021;88(3):485–492. <https://zhps.ejournal.by/jour/article/view/832/0>. (In Russ.)

Сведения об авторах

Щерба Ульяна Константиновна

Студентка 4 курса кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета учреждения образования «Белорусский государственный университет», г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: ulshch04@gmail.com

Ермалицкая Ксения Федоровна

Доцент кафедры лазерной физики и спектроскопии физического факультета учреждения образования «Белорусский государственный университет», г. Минск, Республика Беларусь

E-mail: ermalitskaia@gmail.com

Information about the authors

Ulyana K. Shcherba

4th year student of the Department of Laser Physics and Spectroscopy of the Faculty of Physics at Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

E-mail: ulshch04@gmail.com

Ksenia F. Ermalitskaia

Cand. Sc. in Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Associate Professor of the Department of Laser Physics and Spectroscopy, Faculty of Physics, Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

E-mail: ermalitskaia@gmail.com

Статья поступила в редакцию 27.05.2025.