

# Влияние задержки между парными лазерными импульсами на излучение эрозионной плазмы латуни

А. А. Лискович

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно, Беларусь;  
e-mail: anushkevich.1997@mail.ru*

Представлены результаты исследования влияния задержки между парными лазерными импульсами на излучение эрозионной плазмы латуни. Экспериментально показано существенное влияние задержки между парными лазерными импульсами на излучение эрозионной плазмы латуни. Наибольшей интенсивности достигают как отдельные спектральные линии, так и интегральное свечение эрозионных факелов при задержках в единицы микросекунд. Увеличение задержки второго лазерного импульса, относительно первого, приводит к уменьшению геометрических размеров эрозионных плазменных факелов, интенсивности ее спектральных линий и интегрального свечения.

**Ключевые слова:** лазерно-эмиссионная плазма, эрозионный плазменный факел, интенсивность спектральной линии, парные лазерные импульсы, интегральное свечение.

## Введение

Лазерные технологии в настоящее время широко используются во многих областях науки, техники и производства [1, 2]. Дальнейшее их развитие возможно при четком понимании процессов, происходящих при взаимодействии интенсивного лазерного излучения с веществом. При взаимодействии лазерного излучения высокой интенсивности с твердым телом на его поверхности образуется эрозионный кратер, а в окружающее пространство происходит выброс сгустка плазмы в виде плазменного факела. Управляя процессом взаимодействия лазерного излучения с веществом можно осуществлять обработку материалов, производить тонкопленочные покрытия, наноструктурировать материалы, исследовать химический и элементный состав вещества. В этой связи исследование динамики излучения лазерно-эмиссионной плазмы представляет интерес для ряда практических применений [3–5].

Кроме применения лазерного излучения для обработки материалов [4, 6, 7] и наноразмерного диспергирования материалов [8] лазерно-эмиссионная плазма нашла широкое применение в спектральном анализе [2, 5]. Использование для формирования плазмы парных лазерных импульсов привело к существенному росту эффективности абляции вещества [6, 7] и увеличению интенсивности излучения спектральных линий химических элементов [9]. Значительное увеличение эффективности взаимодействия парных лазерных импульсов с веществом объяснялось различными физическими механизмами.

В работе [10] описан механизм взаимодействия парных лазерных импульсов с веществом, объясняющий рост интенсивности излучения лазерно-эмиссионной плазмы и рост абляции материала из эрозионного кратера. Первый лазерный импульс формирует плазменный факел, состоящий из паров вещества, на которое было оказано лазерное воздействие и остаточных атмосферных газов. Плазменный факел, сформированный первым лазерным импульсом, за счет высокого начального давления вытесняет атмосферные газы, из области своей локализации. Воздействие на поверхность вторым лазерным импульсом приводит к более эффективному взаимодействию его с поверхностью. Он распространяется в парогазовую среду продуктов абляции, образованную первым лазерным импульсом, что приводит к росту интенсивности и контрастности спектральных линий и росту абляции материала.

В работах [6, 7] показано, что увеличение эффективности действия второго лазерного импульса по сравнению с первым обусловлено высокой температурой кратера,

сформированного первым лазерным импульсом, которая тем выше, чем меньше межимпульсный интервал. В работе [11] экспериментами по абляции нагретого до высокой температуры никель-хромового сплава подтверждено значительное влияние температуры кратера, сформированного первым лазерным импульсом, на эффективность лазерной абляции парными лазерными импульсами и интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы.

### **Экспериментальная установка**

Исследования проводились на модернизированной установке, описанной в [12]. Излучение YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера с длительностью импульсов ~15 нс фокусирующей системой направлялось на поверхность образца латуни, расположенный в ее фокусе. Радиус сфокусированного лазерного пятна составлял ~0,1 мм. Под воздействием лазерного излучения на исследуемом образце образовывалась лазерно-эмиссионная плазма. Регистрация спектров излучения плазмы осуществлялось в направлении близком к обратному по отношению к лазерному лучу. Излучение плазмы, собранное объективом с помощью оптико-механического блока фокусировки и сбора излучения, вводилось в световод и направлялось в монохроматор-спектрограф MS 2004i, где происходило выделение исследуемых спектральных линий. Фокусное расстояние объектива, собирающего излучение плазмы, составляло 35 мм, а его диаметр - 30 мм. Регистрация эмиссионного спектра лазерной плазмы на выходе монохроматора-спектрографа осуществлялось с помощью регистратора оптического излучения UC-16N10420-1106 на базе ПЗС-линеек с размером светочувствительной зоны 28.672×0.896 мм. Все эксперименты проводились в воздушной среде. Полученные данные обрабатывались, усреднялись и отображались в виде спектра в компьютерной программе Qsp Client автоматически.

### **Полученные результаты**

Исследовалась зависимость интенсивности спектральных линий латуни от задержки второго лазерного импульса относительно первого. Так как основными составляющими латуни являются медь и цинк, то для исследования были взяты спектральные линии именно этих элементов. Суммарная энергии парных лазерных импульсов составляла 43 мДж. На сплав латуни производилось воздействие серией парных лазерных импульсов. На рис. 1 представлены зависимости интенсивности спектральных линий CuI (324,75 нм – красная линия), CuI (327,4 нм – черная линия), ZnI (334,6 нм – синяя линия) и ZnI (330,6 нм – желтая линия) лазерно-эмиссионной плазмы латуни от задержки второго лазерного импульса относительно первого. Из рис. 1 видно, что при двухимпульсном формировании интенсивность спектральных линий высокая при малых значениях задержках. Максимального значения интенсивности спектральных линий достигали при задержках второго лазерного импульса относительно первого в паре составляющих единицы микросекунд.

Такое поведение интенсивности спектральных линий вытекает из физического механизма взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с мишенью. Первый лазерный импульс разогревает зону взаимодействия, а второй лазерный импульс испаряет вещество мишени, более эффективно взаимодействуя с ней. При этом нелинейно увеличивается вынос массы вещества, происходит нагрев и повторное испарение продуктов абляции образованных первым лазерным импульсом.

С ростом значений задержки второго лазерного импульса относительно первого интенсивность спектральных линий резко падала. При задержках ~50 мкс интенсивность этих линий меди уменьшалась вдвое, а цинка втрое. При дальнейшем росте величины задержки интенсивности спектральных линий плавно уменьшались.

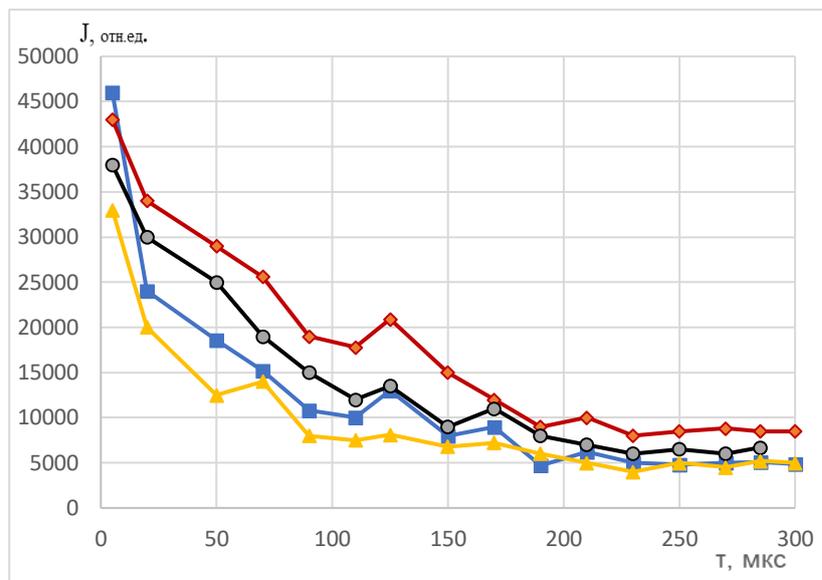


Рис. 1. – Зависимости интенсивности спектральных линий CuI 324,75 нм (красная), CuI 327,4 нм (черная), ZnI 334,6 нм (синяя) и ZnI 330,6 нм (желтая) эрозионной плазмы латуни от задержки второго лазерного импульса относительно первого.

На рис. 2 представлены фотографии свечения эрозионных лазерных факелов образованных на образце латуни (образец расположен справа от факелов), полученные без светофильтра (*а*) и при использовании светофильтров ослабляющих интенсивность свечения в 10 (*б*), 50 (*в*) и 100 раз (*г*) соответственно. Фотографии свечения плазмы эрозионных лазерных факелов получены при воздействии парных лазерных импульсов с энергией 43 мДж и задержкой между ними в 5 мкс.

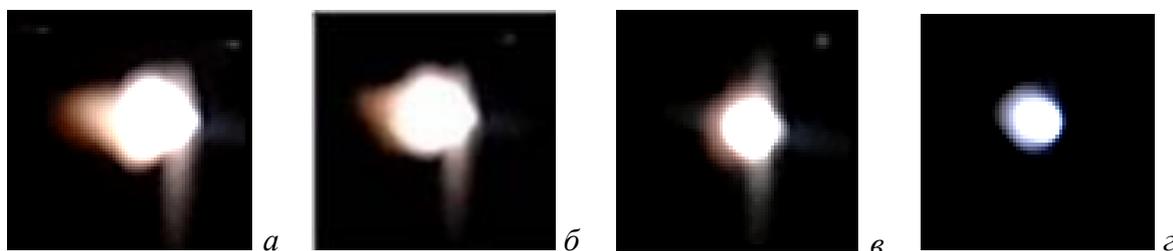


Рис. 2. – Фотографии эрозионных плазменных факелов латуни (*а*), при использовании светофильтров ослабляющих интенсивность свечения в 10 (*б*), 50 (*в*) и 100 (*г*) раз.

Как видно, эрозионные факелы распространяются во внешнюю среду перпендикулярно поверхности исследуемого образца, т.е. вдоль оси излучения лазера. Применение светофильтров позволяет оценить светимость различных частей эрозионного факела. При отсутствии светофильтра, высота и диаметр плазменного факела составляет ~7 мм. При ослаблении потока излучения в 10 раз размеры факела уменьшаются незначительно. В этом случае ослабляется свечение внешней оболочки факела. При ослаблении потока излучения в 50 раз, высота и диаметр факела уменьшаются примерно в полтора раза, а при ослаблении в 100 раз они уменьшаются в ~1,7 раза. Это означает, что при ослаблении потока излучения в 50–100 раз, регистрируется излучение, исходящее из горячей области эрозионного факела, которая наиболее интенсивно излучает и является относительно стабильной от импульса к импульсу. В этом случае регистрируется излучение только ядра эрозионного факела, которое образовано преимущественно веществом исследуемого образца, испаренным вторым лазерным импульсом, так как атмосферный воздух из этой зоны отброшен

фронтом плазменного факела первого лазерного импульса. Слабосветящаяся внешняя оболочка плазменного факела образована за счет проникновения и взаимодействия горячей плазмы с окружающей факел воздушной средой. Это оболочка нестабильна. Она изменяет свою форму от импульса к импульсу. Ее светимость не высокая и при ослаблении потока падающего излучения она не регистрируется.

На рис. 3 приведены фотографии свечения эрозионных лазерных факелов латуни образованных под действием парных лазерных импульсов с суммарной энергией в 43 мДж задержками между ними в 5 мкс (1), 20 мкс (2), 50 мкс (3), и 150 мкс (4). Исследуемый образец расположен справа от факелов. Форма плазменных факелов при различных значениях задержки несколько различается. При задержках между импульсами в 5 мкс размеры плазменных факелов максимальны. Плазменный факел, образованный вторым лазерным импульсом, распространяется во внутрь еще горячего плазменного факела образованного первым лазерным импульсом, дополнительно его возбуждает, что и приводит к высокой его интегральной светимости.

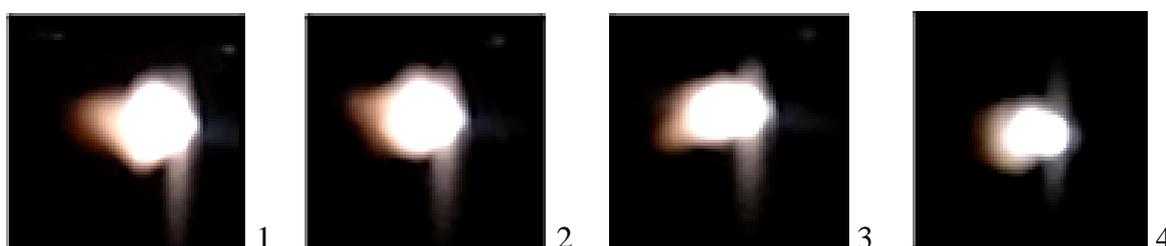


Рис. 3. – Фотографии эрозионных лазерных факелов латуни, образованных парными лазерными импульсами с задержками между ними равными 5 мкс (1), 20 мкс (2), 50 мкс (3), и 150 мкс (4).

При задержках между импульсами в 20 мкс и 50 мкс ситуация несколько меняется. Плазменный факел, образованный вторым лазерным импульсом, распространяется во внутрь остывающего плазменного факела, образованного первым лазерным импульсом, что приводит к затягиванию во времени импульса свечения плазменного факела и одновременному уменьшению его размеров. Из рис. 3 видно, что размеры плазменных факелов при задержках в 100 мкс значительно меньше, так как в этом случае мы имеем дело с фактически идущими друг за другом двумя независимыми факелами.

### **Заключение**

Таким образом, экспериментально показано, существенное влияние задержки между парными лазерными импульсами на излучение эрозионной плазмы латуни. Наибольшей интенсивности достигают как отдельные спектральные линии, так и интегральное свечение эрозионных факелов при задержках в единицы микросекунд. Увеличение задержки второго лазерного импульса относительно первого приводит к уменьшению геометрических размеров плазменных факелов, интенсивности ее спектральных линий и интегрального свечения.

### **Литература**

1. Скворцов Л. А. Лазерные методы дистанционного обнаружения химических соединений на поверхности тел. М., 2015.
2. Кремерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. М., 2009.
3. Ануфрик С. С., Курьян Н. Н., Жукова И. И., Зноско К. Ф. Модификация химического состава и повышение износостойкости полужиритовой глазури напольной

- керамической плитки путем добавления плавленного корунда. Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2017. № 2. С. 83–94.
4. Зажогин А. П., Фадаиян А. Р. Динамика процессов абляции и развития приповерхностной лазерной плазмы сплавов алюминия сдвоенными лазерными импульсами. Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. 2008. № 3. С. 15–18.
  5. Ануфрик С. С., Курьян Н. Н., Жукова И. И., Зноско К. Ф., Бельков М. М. Исследование химического состава глазурей керамических плиток. Журнал прикладной спектроскопии. 2016. Т. 83, № 5. С. 724–730.
  6. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd<sup>3+</sup>-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2020. Т. 10, № 3. С. 100–113.
  7. Зноско К. Ф., Лецик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка. 2021. Т. 11, № 1. С. 45–58.
  8. Гончаров В. К., Козадаев К. В. Формирование конденсированной фазы металлов при воздействии на них субмикросекундных лазерных импульсов. Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83, № 1. С. 80–84.
  9. Зноско К. Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Сер. 2, Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2020. Т. 10, № 2. С. 103–115.
  10. Першин С. М. Нелинейный рост эффективности взаимодействия второго импульса с мишенью при возбуждении плазмы цугом импульсов Nd:YAG-лазера. Квантовая электроника. 2009. Т. 39, № 1. С. 63–67.
  11. Зноско К. Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне. 2021. Т. 11, № 1. С. 94–106.
  12. Ануфрик С. С., Курьян Н. Н., Зноско К. Ф., Бельков М. М. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы глины. Журнал прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85, № 2. С. 285–292.

## **The effect of the delay between paired laser pulses on the radiation of erosive plasma of brass**

A. A. Liskovich

*Yanka Kupala State University of Grodno, Belarus;  
e-mail: anushkevich.1997@mail.ru*

The results of the study of the effect of the delay between paired laser pulses on the radiation of erosive plasma of brass are presented. The significant effect of the delay between paired laser pulses on the radiation of the erosive plasma of brass has been experimentally shown. The greatest intensity is achieved by both individual spectral lines and the integral glow of erosion torches with delays in units of microseconds. An increase in the delay of the second laser pulse, relative to the first, leads to a decrease in the geometric dimensions of erosive plasma torches, the intensity of its spectral lines and integral glow.

**Keywords:** laser-emission plasma, erosive plasma torch, spectral line intensity, paired laser pulses, integral glow.