

ТЕМПЕРАТУРА И КОНЦЕНТРАЦИЯ ЭЛЕКТРОНОВ ЭРОЗИОННОЙ ПЛАЗМЫ ЛАТУНИ ПРИ ЕЕ ФОРМИРОВАНИИ СДВОЕННЫМИ ЛАЗЕРНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ

К.Ф. Зноско

*Гродненский государственный университет им. Янки Купалы,
ул. Ожешко 22, 230023 Гродно, Беларусь, znosko@rambler.ru*

Показано, что для эффективного взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с латунным сплавом необходимо, чтобы межимпульсный интервал составлял ~ 1 мкс. Тогда второй лазерный импульс взаимодействует с «горячим» кратером, образованным первым импульсом. Это приводит к росту выноса вещества из кратера, интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы, ее электронной температуры и концентрации электронов в ней. В этом случае наноструктурная конденсация вещества в пламенном факеле, образованном первым лазерным импульсом, будет в начальной стадии, и процесс повторного его испарения будет идти эффективно. При межимпульсных интервалах больших 20 мкс электронная температура плазмы, концентрация электронов в ней и интенсивность ее спектральных линий практически не зависят от него.

Ключевые слова: электронная температура плазмы; концентрация электронов в плазме; эрозионная плазма; плазменный факел; сдвоенные лазерные импульсы; межимпульсный интервал.

THE TEMPERATURE AND ELECTRON CONCENTRATION OF THE EROSION PLASMA OF BRASS DURING ITS FORMATION BY DOUBLE LASER PULSES

K.F. Znosko

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

The mechanism of interaction of two-pulse laser radiation with matter is described. The intensity of the spectral lines of the erosive plasma, its electron temperature and the electron concentration in it take maximum values at the inter-pulse interval of ~ 1 μ s. Then the electronic temperature of the erosion plasma of brass is $\sim (18-19)$ thousands of degrees, and the electron concentration $\sim (6-7) 10^{17}$ cm^{-3} . It is shown that for the effective interaction of double laser pulses with a brass alloy, it is necessary that the inter-pulse interval is small, equal to units of microseconds. Then the first laser pulse forms an erosion crater, and the second laser pulse interacts with the "hot" crater. This leads to an increase in the removal of matter from the crater, the intensity of the spectral lines of the erosive plasma, its electron temperature and the concentration of electrons in it. In this case, the nanostructured condensation of the substance in the flame torch formed by the first laser pulse will be in the initial stage, and the process of its re-evaporation will be effective. At inter-pulse intervals greater than 20 microseconds, the electron temperature of the plasma, the electron concentration in it, and the intensity of its spectral lines are practically independent of it.

Keywords: electron plasma temperature; electron concentration in plasma; erosive plasma; plasma torch; double laser pulses, inter-pulse interval.

Введение

Под воздействием лазерного излучения высокой интенсивности на поверхности твердого тела формируется эрозионный кратер, из которого прорастает яркосветящийся плазменный факел, который выносит и распыляет в окружающее пространство аблированное вещество. Лазерно-плазменные технологии, базирующиеся на взаимодействии мощного лазерного

излучения с веществом, широко используются во многих областях науки, техники и производства [1-3].

На данный момент установлен и исследован ряд механизмов взаимодействия лазерного излучения с веществом. Они определяются параметрами лазерного излучения, свойствами вещества, а также свойствами среды, в которой происходит процесс взаимодействия. На первом этапе

развития лазерно-плазменных технологий использовались одиночные лазерные импульсы, однако их возможности значительно расширились при использовании сдвоенных лазерных импульсов и цугов лазерных импульсов [4-5].

Достоинством применения сдвоенных лазерных импульсов является значительное увеличение массы аблированного вещества и интенсивности спектральных линий излучения эрозионной плазмы по сравнению с моноимпульсным ее формированием [6-7]. Хотя в ряде работ были сделаны попытки объяснить такой рост, однако его причины до конца не изучены.

Исследование процессов, происходящих при формировании эрозионной плазмы, в частности, знание температуры и концентрации электронов даст возможность контролировать плазмо-химические процессы, протекающие в ней. Изменяя внешние параметры, можно будет целенаправленно управлять процессом взаимодействия лазерного излучения с веществом и тем самым достичь заданных результатов. Все это будет способствовать дальнейшему развитию лазерно-плазменных технологий и их возможностей.

Целью настоящей работы является определение температуры и концентрации электронов эрозионной плазмы образованной на поверхности латуни под действием потока сфокусированного лазерного излучения спектральными методами.

Методика исследований

Определение электронной температуры эрозионной плазмы и концентрации электронов в ней осуществляется различными методами. Наиболее интересны дистанционные спектральные методы, в частности, метод относительных интенсивностей спектральных линий. Суть метода, расчетные формулы и практика его применения для определения параметров разрядной плазмы приведены в [8]. Для определения электронной температуры необходимо экспериментально измерить отношение интенсивностей двух спектральных

линий, излучаемых одним и тем же химическим элементом в плазме, причем измерения должны проводиться в одних и тех же условиях и одним и тем же прибором. Это позволяет нивелировать ошибки, возникшие в процессе измерений.

Измерение интенсивностей спектральных линий проводилось на установке, подробно описанной в [9-10]. Использовался YAG:Nd³⁺-лазер, который мог генерировать как одиночные, так и сдвоенные импульсы длительностью ~15 нс по полувысоте и энергией 5-60 мДж, разделенные регулируемым в диапазоне 1-300 мкс временным интервалом. Концентрация электронов в эрозионной плазме определялась на основании уравнения Саха-Ленгмюра.

Объектом исследования являлась эрозионная плазма, созданная на поверхности латунного сплава путем воздействия на него сдвоенными лазерными импульсами.

Результаты и их обсуждение

Основными составляющими латуни являются медь и цинк. Для диагностики эрозионной плазмы брались спектральные линии обоих элементов. Суммарная энергия сдвоенных импульсов составляла 46 мДж. На рисунке 1 представлены зависимости интенсивности атомных линий меди CuI 324.754 нм и CuI 327.396 нм и цинка ZnI 330.6 нм и ZnI 334.6 нм от межимпульсного интервала (τ) соответственно.

Поведение этих спектральных линий (а также других) в зависимости от τ подобное. Максимальная их интенсивность наблюдалась при $\tau \sim 1$ мкс. С ростом величины τ их интенсивность уменьшается. При $\tau \sim 50$ мкс их интенсивность уменьшается в 2-3 раза. При $\tau > 100$ мкс их интенсивность приближалась к уровню интенсивностей, наблюдаемых при моноимпульсном формировании плазмы.

Зависимости электронной температуры эрозионной плазмы латуни от τ , рассчитанные по методике [8] представлены на рис. 2. Расчеты были проведены как с использованием интенсивностей спектральных линий меди - CuI 324.754 нм и

CuI 327.396 нм, так и цинка - ZnI 330.6 нм и ZnI 334.6 нм. Видно, что электронные температуры отличаются не более чем на 1000 К, что вполне объясняется погрешностью экспериментальных измерений и расчетов. Для обоих расчетов максимальная электронная температура плазмы наблюдалась при $\tau \sim 1$ мкс. При $\tau > 20$ мкс электронная температура плазмы стабилизировалась на одном уровне и была в ~ 2 раза ниже максимальной не зависимо от τ , а при $\tau > 150$ мкс медленно уменьшалась.

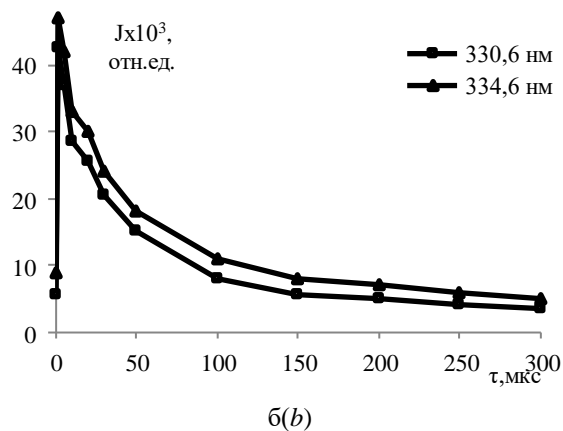
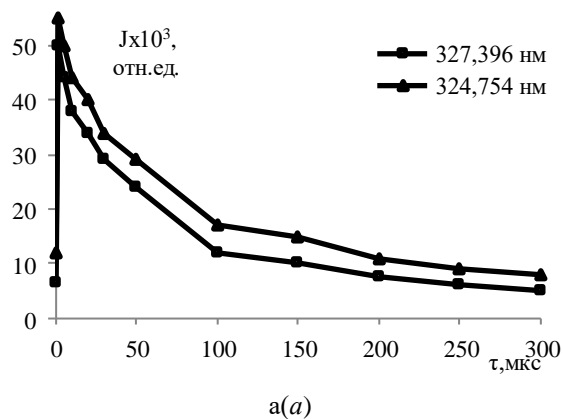


Рис. 1. Зависимости интенсивности спектральных линий CuI 324.754 нм и CuI 327.396 нм (a) и ZnI 330.6 нм и ZnI 334.6 нм латуни от межимпульсного интервала
 Fig. 1. Dependences of the intensity of the spectral lines CuI 324.754 nm and CuI 327.396 nm (a) and ZnI 330.6 nm and ZnI 334.6 nm (b) of brass on the inter-pulse interval

Концентрации электронов в плазме определялись также по методике [8]. Для расчета степени ионизации плазмы данные по электронной температуре плазмы брались из рисунка 2 с обеих кривых.

Из рис. 3 видно, что концентрация электронов в плазме сильно зависит от задержки второго лазерного импульса относительно первого в течение первых 20 мкс. При $\tau > 30$ мкс концентрация электронов в плазме стабилизируется на уровне моноимпульсного ее формирования. Также видно, что концентрации электронов в плазме, рассчитанные как по линиям меди, так и по линиям цинка, отличаются не существенно.

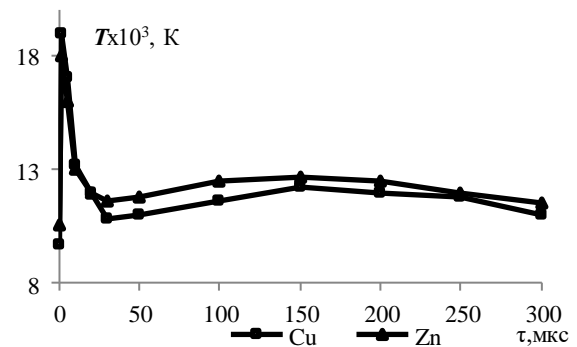


Рис. 2. Зависимости электронной температуры эрозионной плазмы латуни от межимпульсного интервала
 Fig. 2. Dependences of the electronic temperature of the erosion plasma of brass on the inter-pulse interval

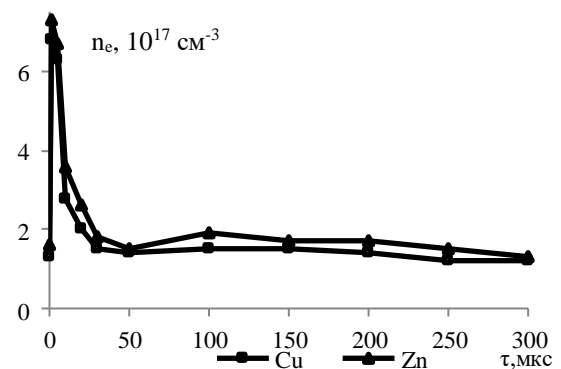


Рис. 3. Зависимости концентрации электронов в лазерно-эмиссионной плазме латуни от межимпульсного интервала
 Fig. 3. Dependences of the electron concentration in the laser-emission plasma of brass on the inter-pulse interval

Плазменный факел, образованный первым лазерным импульсом, расширяясь за счет высокого начального внутреннего давления, достигает своей максимальной величины за единицы микросекунд. Расширяясь, он остывает и излучает.

При малых τ (~ 1 мкс) второй лазерный импульс проникает сквозь первый плазменный факел и взаимодействует с «горячей» поверхностью кратера. Он формирует второй, более мощный, плазменный факел, который выносит из кратера значительно большее количество вещества, чем первый [6-7]. Второй плазменный факел распространяется внутрь первого, в котором уже начались процессы наноструктурной конденсации вещества, вынесенного первым лазерным факелом.

Инжекция горячей плазмы, образованной вторым лазерным импульсом, внутрь первого плазменного факела, приводит к быстрому перемешиванию «горячей» и «остывающей» плазмы, активации плазмохимических реакций на элементарном уровне. Энергия, аккумулированная во втором плазменном факеле, идет на повторное испарение, ионизацию и возбуждение частиц «остывающей» плазмы, а не высвечивается в виде коротковолнового излучения на его фронте. Электронная температура плазмы и концентрация электронов в ней, интенсивность селективного излучения скачкообразно возрастают, что и подтверждают рисунки 1-3.

При больших τ (>30 мкс) происходящие процессы аналогичны. Однако, чем позже приходит второй лазерный импульс, тем он:

- воздействует на более холодный кратер, образованный первым импульсом, и тем меньше выносит из него вещества;

- больше рассеивается и поглощается, проходя через облако наноразмерных частиц, сконденсировавшихся из плазмы, созданной первым лазерным импульсом, и тем больше расфокусируется;

- в меньшей степени повторно диспергирует эти наноструктуры на атомы и ионы, так как они становятся более крупными, холодными и устойчивыми.

При значительных τ (>100 мкс) плазменные факелы практически не влияют друг на друга, а регистрируемый результат действия сдвоенных лазерных им-

пульсов является суммой действий двух независимых лазерных импульсов.

Заключение

Таким образом, рассмотрен механизм взаимодействия двухимпульсного лазерного излучения с латуной. Показано, что для эффективного протекания процесса взаимодействия двухимпульсного лазерного излучения с веществом необходимо, чтобы τ был малым, составлял единицы микросекунд. Из проведенных исследований следует, что интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы, ее электронная температура и концентрация электронов в ней принимают максимальные значения $\tau \sim 1$ мкс. Увеличение τ приводит к их резкому падению, а при $\tau > 20$ мкс интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы, ее электронная температура и концентрация электронов в ней практически не зависят от него.

Это обусловлено тем, что при малых τ происходит взаимодействие плазменных факелов, образованных последовательно идущими лазерными импульсами, происходит повторное возбуждение плазмы, сформированной первым лазерным импульсом вторым плазменным факелом изнутри. При больших τ мы регистрируем свечение двух практически независимых друг от друга следующих один за другим плазменных факелов.

Библиографические ссылки

1. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И., Зноско К.Ф., Бельков М.В. Исследование химического состава глазурей керамических плиток. *Журн. прикл. спект.* 2016; 83(5): 724-730.
2. Попов А.М., Лабутин Т.А., Зоров Н.Б. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды. *Вестник Московского университета. Серия 2. Химия* 2009; 50(6): 453-467.
3. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Жукова И.И. Модификация химического состава и повышение износостойкости полуфриттовой глазури напольной керамической плитки путем добавления плавящего корунда. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика* 2017; (2): 83-94.

4. Кремерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. Москва: Техносфера; 2009. 370 с.
5. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. Chemical Composition of Ceramic Tile Glazes. *Journal of Applied Spectroscopy* 2016; 83(5): 764–770.
6. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(3): 100-113.
7. Зноско К.Ф., Лещик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка* 2021; 11(1): 45-58.
8. Белаш В.Ч., Зноско К.Ф. Температура и концентрация электронов импульсного разряда в смеси паров ртути с аргоном. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2018; 8(3): 83–92.
9. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(2): 103-115.
10. Зноско К.Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2021; 11(1): 94-106.
- pol'noi keramicheskoi plitki putem dobavleniia pravlennogo korunda. [Modification of the chemical composition and increase of wear resistance of semifrit glazed ceramic floor tiles by adding corrected corundum]. *Zhurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika* 2017; (2): 83-94. (In Russian).
4. Kremers D., Radiemski L. Lazerno-iskrovaia emissionnaia spektroskopiiia [Laser-Induced Breakdown Spectroscopy]. Moscow: Tekhnosfera; 2009. 370 p. (In Russian).
5. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. Chemical Composition of Ceramic Tile Glazes. *Journal of Applied Spectroscopy* 2016; 83(5): 764-770.
6. Znosko K.F. Rost effektivnosti vzaimodey-stviya sdvoennykh impul'sov YAG:Nd³⁺-lazera s Al mishen'yu pri umen'shenii mezhimpul'snogo intervala. [Increasing the efficiency of interaction of double pulses of YAG:Nd³⁺-laser with Al target when the pulse interval decreases]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2020; 10(3): 100-113. (In Russian).
7. Znosko K.F., Leshchik S.D. Optimizatsiya dvukhimpul'snogo rezhima lazernoy ablyatsii tsvetnykh metallov. [Optimization of the two-pulse mode of laser ablation of non-ferrous metals]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 6. Tekhnika* 2021; 11(1): 45-58. (In Russian).
8. Belash V.Ch., Znosko K.F. Temperatura i kontsentratsiya elektronov impul'snogo razryada v smesi parov rtuti s argonom. [Temperature and concentration of pulsed-discharge electrons in a mixture of mercury vapors with argon]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2018; 8(3): 83-92.
9. Znosko K.F. Usilenie intensivnosti spektral'nykh linii lazerno-emissionnoi plazmy pri ee formirovaniі sdvoennymi lazernymi impul'sami. [Increasing the intensity of spectral lines of laser-emission plasma when it is formed by double laser pulses]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2020; 10(2): 103-115. (In Russian).
10. Znosko K.F. Vliyanie temperatury misheni na intensivnost' spektral'nykh liniy lazerno-emissionnoi plazmy. [Effect of target temperature on the intensity of spectral lines of laser-emission plasma]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhaynaga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2021; 11(1): 94-106. (In Russian).

References

1. Anufrik S.S., Kurian N.N., Zhukova I.I., Znosko K.F., Belkov M.V. Issledovanie khimicheskogo sostava glazurei keramicheskikh plitok. [The study of the chemical composition of glazes of ceramic tiles]. *Zhurnal prikladnoy spektroskopii* 2016; 83(5): 724-730. (In Russian).
2. Popov A.M., Labutin T.A., Zorov N.B. Ispol'zovanie lazerno-iskrovoy emissionnoy spektroskopii dlya analiza konstruksionnykh materialov i ob"ektov okruzhayushchey sredy. [Use of laser-spark emission spectroscopy for analysis of structural materials and environmental objects]. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 2. Khimiya* 2009; 50(6): 453-467. (In Russian).
3. Anufrik S.S., Kurian N.N., Znosko K.F., Zhukova I.I. Modifikatsiia khimicheskogo sostava i povyshenie iznosostoičnosti polufrittovoi glazuri na-