

РОСТ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СДВОЕННЫХ ИМПУЛЬСОВ YAG:Nd³⁺-ЛАЗЕРА С НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛЬЮ ПРИ УМЕНЬШЕНИИ МЕЖИМПУЛЬСНОГО ИНТЕРВАЛА

К.Ф. Зноско

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

Представлены результаты экспериментального исследования эффективности взаимодействия наносекундных сдвоенных лазерных импульсов с пластинкой из нержавеющей стали 12X18H9ТЛ в зависимости от межимпульсного интервала. Показано, что эффективность взаимодействия второго лазерного импульса с мишенью, по сравнению с первым лазерным импульсом в паре, в ~7.5 раз выше при уменьшении межимпульсного интервала до ~1 мкс. Это проявляется в росте абляции вещества мишени в ~4 раз по сравнению с моноимпульсным лазерным воздействием в расчете на единицу затраченной энергии. Установлено, что рост абляции вещества мишени обусловлен высокой остаточной температурой кратера, образованного первым лазерным импульсом, которая тем выше, чем меньше межимпульсный интервал.

Ключевые слова: лазерная абляция; двухимпульсная абляция; межимпульсный интервал; вынос материала; эрозионный плазменный факел; лазерно-эмиссионная плазма; сдвоенные лазерные импульсы.

INCREASING THE EFFECTIVENESS OF THE INTERACTION OF THE DUAL YAG:Nd³⁺-LASER PULSES WITH STAINLESS STEEL WITH A DECREASE IN THE INTER-PULSE INTERVAL

K.F. Znosko

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

The results of an experimental study of the efficiency of interaction of nanosecond double laser pulses with a 12X18H9TL stainless steel plate depending on the inter-pulse interval are presented. It is shown that the efficiency of the interaction of the second laser pulse with the target, compared to the first laser pulse in a pair, is ~7.5 times higher when the inter-pulse interval is reduced to ~1 microsecond. This is manifested in an increase in the ablation of the target substance by ~4 times compared to monopulse laser exposure per unit of energy expended. It is established that the increase in ablation of the target substance is due to the high residual temperature of the crater formed by the first laser pulse, which is higher the smaller the inter-pulse interval.

It is experimentally shown that the increase in the ablation of the stainless steel plate substance and the increase in the intensity of the spectral lines of the erosive plasma, with a decrease in the inter-pulse interval to ~1 μs, are due to the high residual temperature of the crater formed by the first laser pulse, which is higher the smaller the inter-pulse interval.

The results obtained can be used in technological processes based on the interaction of laser radiation with matter, since the transition to a two-pulse effect on materials with a small inter-pulse interval between them can significantly increase the ablation of the material.

Keywords: laser ablation; two-pulse ablation; inter-pulse interval; material removal; erosion plasma flare; laser-emission plasma; dual laser pulses.

Введение

Воздействие лазерного излучения на вещество широко используется в науке, технике, производстве [1-4]. В работе [1] указывалось, что использование цугов лазерных импульсов значительно увеличивает скорость лазерной резки и сверления отверстий, по сравнению с использованием

моноимпульсов. В [2-3] было показано, что двухимпульсный режим воздействия на объект приводит к росту интенсивности излучения лазерной плазмы, повышает контрастность ее спектральных линий. Это повышает чувствительность лазерно-эмиссионного анализа и снижает порог обнаружения химических элементов [4].

В работах [2, 5] было показано увеличение массы аблированного вещества при применении сдвоенных лазерных импульсов, приходящих с задержкой друг относительно друга. В работе [5] приведены результаты исследования эффективности лазерного пробоя отверстий в алюминиевой пластинке цугами импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с энергией 25 мДж и длительностью 10 нс, разделенных временным интервалом в 15-20 мкс. Обнаружено нелинейное, 6-кратное увеличение эффективности взаимодействия второго импульса в цуге по сравнению с первым с Al-пластинкой. Под эффективностью взаимодействия понимался вынос массы вещества пластинки (мишени).

Автором [5] предложен физический механизм взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с Al-пластинкой, объясняющий нелинейный рост аблированной массы и интенсивности свечения эрозионных факелов. Первый лазерный импульс разогревает зону взаимодействия и формирует эрозионный плазменный факел, состоящий из паров материала мишени. Сформированный эрозионный факел за счет высокого начального давления вытесняет атмосферный воздух и тем самым снижает его концентрацию в области своей локализации. Второй лазерный импульс более эффективно взаимодействует с мишенью, а сформированный им эрозионный факел распространяется в среду продуктов эрозии, образованную первым лазерным импульсом с низкой плотностью воздуха, нелинейно увеличивая вынос аблированной массы, нагревает, испаряет и ионизирует продукты эрозии в атмосферном воздухе пониженной плотности. Конкретных причин более эффективного взаимодействия второго лазерного импульса с мишенью указано не было.

В работе [6] наблюдался рост интенсивности свечения эрозионных факелов с уменьшением межимпульсного интервала (τ). Инжекция горячей плазмы, образованной вторым лазерным импульсом, внутрь эрозионного факела, образованно-

го первым лазерным импульсом, приводит к повторному испарению кластерных и наноразмерных структур, конденсирующихся из аблированного вещества, вынесенного первым лазерным импульсом. Это приводит к росту концентрации возбужденных и ионизированных атомов и в конечном итоге к скачкообразному росту интенсивности линий эрозионной плазмы.

В [7-8] наблюдалось практически 10-кратное увеличение эффективности взаимодействия второго лазерного импульса по сравнению с первым при двухимпульсном формировании эрозионной плазмы на Al- и Cu-мишенях наносекундными импульсами при сокращении τ до ~ 1 мкс. Показано, что рост выноса вещества мишени и интенсивности спектральных линий эрозионной плазмы, обусловлены высокой остаточной температурой кратера, сформированного первым лазерным импульсом, которая тем выше, чем меньше τ .

В работе [9] экспериментами по абляции нагретого до высокой температуры никель-хромового сплава (600-1200°C) показана значительная роль остаточной температурой кратера, сформированного первым лазерным импульсом, на эффективность абляции сдвоенными лазерными импульсами и интенсивность спектральных линий эрозионной плазмы.

Целью настоящей работы является определение эффективности взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с термостойкими сплавами на примере нержавеющей стали 12X18H9ТЛ.

Результаты и их обсуждение

Исследования проводились на модернизированной экспериментальной установке, описанной в работах [7, 8, 10]. Использовался YAG:Nd³⁺-лазер, с длительностью импульсов ~ 15 нс по полувысоте. Лазер позволял генерировать как одиночные, так и сдвоенные (парные) импульсы, разделенные регулируемым в диапазоне 1-300 мкс временным интервалом. Объектом исследования являлась пластинка из жаростойкой аустенитной нержавеющей

стали 12Х18Н9ТЛ. Излучение лазера фокусирующей системой направлялось на пластинку толщиной 0.2 мм расположенную в ее фокусе. Характерный размер пятна сфокусированного лазерного излучения на мишени составлял ~0.3 мм.

На рис. 1 видно, что кратеры и пробитые отверстия окружает область отожженного металла. Видны кольцеобразные цвета побежалости, что свидетельствует о том, что пластинки были подвержены действию высокой температуры, которая привела к изменению структуры металла и образованию на них окислов.

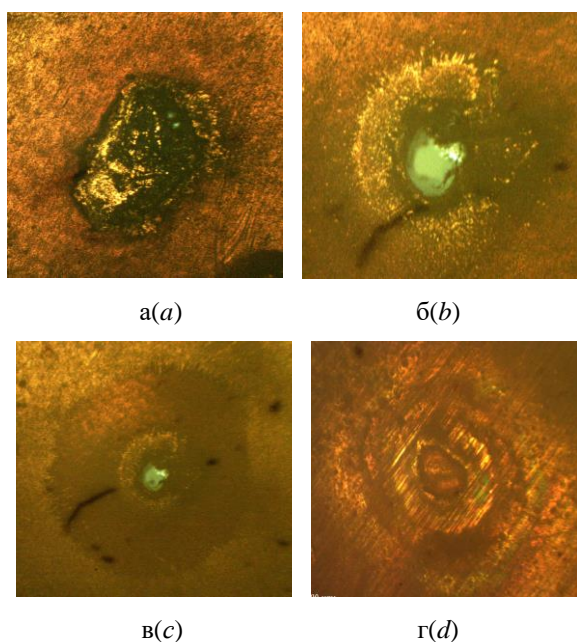


Рис. 1. Фотографии лазерного кратера (а), пробитого отверстия (б), отверстия и отожженной зоны (в) в пластине из нержавеющей стали и кратера и отожженной области на медной пластине (г)
 Fig. 1. Photographs of laser crater (a), punched hole (b), hole and annealed area (c) in stainless steel and crater plate and annealed area on copper plate (d)

Также видно наличие слабого бруствера, окружающего кратер, образованного выбросом микрокапель расплавленного металла, что говорит о том, что удаление вещества из кратера происходит как испарением, так и вытеснением расплава давлением самих паров. С учетом этого характерный (приведенный) размер кратера составлял ~0.5 мм при плотности мощности лазерного излучения около 10^9 Вт/см².

На рис. 2 приведены зависимости числа пар лазерных импульсов необходимых для пробоя отверстия в пластинке от величины τ . Видно, что уменьшение τ приводит к снижению числа сдвоенных лазерных импульсов необходимых для пробоя отверстия. Наименьшее число пар лазерных импульсов необходимых для пробоя отверстия в пластинке при $\tau \sim 1$ мкс составляло 100 и 120 при энергии в каждом импульсе 15 и 25 мДж соответственно. При $\tau \sim 5$ мкс кривые практически выходили на насыщение. Для пробоя отверстия одиночными импульсами с энергией 25 мДж необходимо было их ~1000.

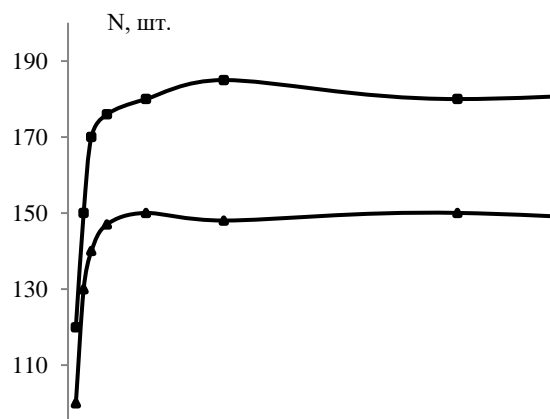


Рис. 2. Зависимости числа сдвоенных лазерных импульсов необходимых для пробоя пластинки от межимпульсного интервала τ
 Fig. 2. Dependence of the number of double laser pulses required for plate breakdown on the inter-pulse interval τ

Увеличение числа сдвоенных лазерных импульсов необходимых для пробоя пластинки с увеличением энергии обусловлено экранировкой излучения плазмой. Чем больше энергия в импульсе, тем выше температура и плотность плазмы, образованной первым импульсом в паре, и, соответственно, тем интенсивнее поглощается, рассеивается и расфокусируется излучение второго импульса в паре, особенно при малых τ . На рис. 3 приведена зависимость числа пар лазерных импульсов необходимых для пробоя пластинки от величины их энергии. Видно наличие оптимального значения энергии импульсов, при которых абляция материала протекает наиболее эффективно.

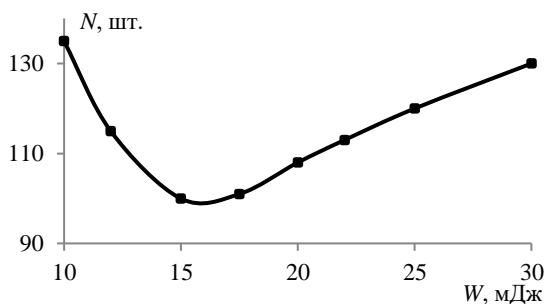


Рис. 3. Зависимость числа пар лазерных импульсов необходимых для пробоя пластинки от их энергии
 Fig. 3. Dependence of the number of pairs of laser pulses required for plate breakdown on their energy

Усредненная скорость выноса материала составляла ~ 2 мкм за один сдвоенный импульс при $\tau \sim 1$ мкс. С увеличением τ наблюдается резкое падение скорости выноса материала, которая стабилизируется на уровне ~ 1 мкм за импульс. Скорость выноса материала при пробое пластинки моноимпульсами составляла ~ 0.2 микрон за один импульс, что на порядок меньше чем при двухимпульсном пробое.

По методике [6-8] была проведена оценка эффективности действия второго лазерного импульса относительно первого в паре при $\tau \sim 1$ мкс и $\tau \sim 20$ мкс. Последний межимпульсный интервал использовался в работе [6].

$$N_1 h_1 = N_2 (\Delta h_1 + \Delta h_2) = d,$$

где N_1 и N_2 - число импульсов необходимых для пробоя отверстия при одно- и двухимпульсном воздействии, h_1 скорость выноса материала при одноимпульсном воздействии, Δh_1 и Δh_2 - скорость выноса материала первым и вторым импульсом при двухимпульсном воздействии, d толщина пластинки. Эффективность действия второго лазерного импульса относительно первого в паре на пластинку k есть отношение скорости абляции материала вторым импульсом к скорости абляции первым $k = \Delta h_2 / \Delta h_1 = N_1 / N_2 - 1$.

Расчитанная по этой формуле эффективность действия второго лазерного импульса относительно первого на пластинку из нержавеющей стали составила ~ 7.5 при $\tau \sim 1$ мкс. Это означает, что второй лазерный импульс при $\tau \sim 1$ мкс обеспечивает

абляцию материала в ~ 7.5 раз большую, чем первый. При $\tau \sim 20$ мкс эффективность действия второго лазерного импульса составляла ~ 4.5 .

Рост выноса материала при малых τ обусловлен сохранением высокой температуры в кратере. Чем меньше временной интервал между импульсами, тем выше температура кратера, в который фокусируется лазерное излучение второго лазерного импульса. Воздействие лазерного излучения второго импульса на горячую поверхность приводит к снижению затрат энергии на ее нагрев. Это приводит к тому, что большая доля энергии второго лазерного импульса идет на плавление, испарение и ионизацию материала пластинки, что в конечном итоге приводит к увеличению эффективности взаимодействия лазерного излучения с ней и росту порции аблированного вещества.

Заключение

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что использование двухимпульсного режима абляции нержавеющей стали повышает эффективность взаимодействия лазерного излучения с ней и увеличивает вынос материала эрозионным факелом.

Использование межимпульсного интервала ~ 1 мкс приводит к росту эффективности абляции сдвоенными лазерными импульсами в ~ 4 раза в расчете на единицу затраченной энергии.

Эффективность абляции вторым лазерным импульсом в паре по сравнению с первым нелинейно возрастает с уменьшением межимпульсного интервала до ~ 1 мкс, достигая максимума, равного ~ 7.5 .

Библиографические ссылки

1. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску Й. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. Москва: Наука; 1988. 538 с.
2. Кремерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. Москва: Техносфера; 2009. 370 с.
3. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Жукова И.И., Зноско К.Ф., Бельков М.В. Исследование химического состава глазурей керамических пли-

- ток. *Журнал прикладной спектроскопии* 2016; 83(5): 724-730.
4. 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.
 5. Першин С.М. Нелинейный рост эффективности взаимодействия второго импульса с мишенью при возбуждении плазмы цугом импульсов Nd:YAG-лазера. *Квантовая электроника* 2009; 39(1): 63-67.
 6. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сведенными лазерными импульсами. *Вестник Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(2): 103-115.
 7. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сведенных 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.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
- References**
1. Prokhorov A.M., Konov V.I., Ursu I., Mikhaylesku Y. Vzaimodeistvie lazernogo izlucheniia s metallami [Interaction of laser radiation with metals]. Moscow: Nauka; 1988. 538 p. (In Russian).
 2. Kremers D., Radiemski L. Lazerno-iskrovaia emissionnaia spektroskopiiia [Laser-Induced Breakdown Spectroscopy]. Moscow: Tekhnosfera; 2009. 370 p. (In Russian).
 3. 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).
 4. Anufrik S.S., Kurian N.N., Znosko K.F., Zhukova I.I. Modifikatsiia khimicheskogo sostava i povyshenie iznosostoikosti polufrittvoi glazuri napol'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).
 5. Pershin S.M. Nelineynyy rost effektivnosti vzaimodeystviya vtorogo impul'sa s mishen'yu pri vzbuzhdenii plazmy tsugom impul'sov Nd:YAG-lazera. [Nonlinear increase in the efficiency of interaction of the second pulse with the target when the plasma is excited by the Zug of Nd:YAG-laser pulses]. *Kvantovaya elektronika* 2009; 39(1): 63-67. (In Russian).
 6. Znosko K.F. Usilenie intensivnosti spektral'nykh linii lazerno-emissionnoi plazmy pri ee formirovani s dvoennymi lazernymi impul'sami. [Increasing the intensity of spectral lines of laser-emission plasma when it is formed by double laser pulses]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhay'naga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2020; 10(2): 103-115. (In Russian).
 7. Znosko K.F. Rost effektivnosti vzaimodeystviya dvoennykh 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 dzyarzhay'naga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2020; 10(3): 100-113. (In Russian).
 8. 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 dzyarzhay'naga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 6. Tekhnika* 2021; 11(1): 45-58. (In Russian).
 9. Znosko K.F. Vliyanie temperatury misheni na intensivnost' spektral'nykh linii lazerno-emissionnoi plazmy. [Effect of target temperature on the intensity of spectral lines of laser-emission plasma]. *Vesnik Grodzenskaga dzyarzhay'naga yuniversiteta imya Yanki Kupaly. Seryya 2. Matematyka. Fizika. Infarmatyka, vylichal'naya tekhnika i kiravanne* 2021; 11(1): 94-106. (In Russian).
 10. 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.