ФАКТОРЫ РОСТА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СДВОЕННЫХ ЛАЗЕРНЫХ ИМПУЛЬСОВ С ВЕЩЕСТВОМ

К.Ф. Зноско, А.А. Лискович
Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
ул. Ожешко 22, Гродно 230023, Беларусь, znosko@rambler.ru

Представлены результаты экспериментального исследования причин роста эффективности взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом приводящие к росту абляционного выноса материала из эрозионного кратера, росту интенсивности излучения лазерно-эмиссионной плазмы и росту контрастности спектральных линий ее химических элементов. Показано, что высокая температура эрозионного кратера, оставшаяся после действия первого лазерного импульса, увеличение поглощательной способности «горячего кратера» лазерного излучения и взаимодействие плазменных факелов, сопровождающееся перераспределением их энергий в плазменном факеле, приводят к росту эффективности взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом. Часть энергии лазерного излучения, которая шла на нагрев «холодной» области в которую оно фокусировалось, а также на отражение, попадая на «горячую» поверхность - поглощается. Это приводит к дополнительному росту выноса материала и интенсивности спектральных линий.

Ключевые слова: лазерно-эмиссионная плазма; плазменный факел; эрозионный кратер; вынос материала; интенсивность спектральной линии; сдвоенные лазерные импульсы.

FACTORS OF GROWTH IN THE EFFICIENCY OF INTERACTION OF DUAL LASER PULSES WITH SUBSTANCE

K.F. Znosko, A.A. Liskovich
Yanka Kupala State University of Grodno,
22 Ozheshko Str., 230023 Grodno, Belarus, znosko@rambler.ru

The results of a study of the reasons for the increase in the efficiency of the interaction of dual laser pulses with matter are presented. The dependences of the intensity of the spectral lines of an erosive aluminum plasma and the removal of material from a crater on an A1 plate (the thickness of the ablated material layer in one double pulse) on the interval between pulses are experimentally studied. It is shown that the intensities of the spectral lines and the removal of material from the erosion crater increase with a decrease in the interpulse interval to 1 μs. The main factor leading to an increase in the removal of material from the erosion crater and an increase in the intensity of the spectral lines of plasma torches during a two-pulse laser impact on a substance is the high temperature of the crater remaining after the action of the first laser pulse. An estimate of the temperature in the erosion crater showed that 1 μs after the action of the first laser pulse with a two-pulse effect on the substance, it is about 600–700 °C.

The second factor influencing the increase in the efficiency of interaction of laser radiation with a "hot surface" is that it has a higher absorption capacity of laser radiation. That part of the laser radiation, which was reflected, in this case is absorbed. This leads to an additional increase in the removal of material and the intensity of spectral lines under two-pulse laser action on the substance.

Keywords: laser emission plasma; plasma torch; erosion crater; material removal; spectral line intensity; dual laser pulses.

Введение

Лазерное излучение широко применяется в науке, технике, производстве. Однако процессы, происходящие при взаимодействии лазерного излучения с веществом, до конца еще не изучены. Воздействие интенсивного лазерного излучения на вещество приводит к образованию эрозионного кратера, выносу вещества из него в окружающее пространство излучающим паро-плазменным факелом. Механизмы взаимодействия интенсивного лазерного излучения с веществом зависят как от параметров лазерного излучения, так и от свойств вещества, структуры его поверхности, окружающей его среды.

Воздействие на вещество сдвоенными лазерными импульсами (их цугами) приво-

дит к росту выноса вещества из кратера, значительному росту интенсивности излучения пароплазменного факела [1-5].

Было предпринято ряд попыток объяснить указанные выше эффекты, например, самофокусировкой луча второго лазерного импульса в плазме; поглощением второго импульса в плазменном факеле; поступлением атомов, испарившихся под действием второго лазерного импульса, в плазму; увеличением абляции за счет разогрева поверхности мишени первым лазерным импульсом; наличием ударной волны расширяющейся плазмы и др. [3-7].

Целью настоящей работы является установление факторов роста эффективности взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом, приводящих к росту интенсивности спектральных линий плазменных факелов и росту выноса материала из эрозионного кратера.

Результаты и их обсуждение

Экспериментальная установка подробно описана в [8-10]. Она базировалась на YAG:Nd^{3+} лазере, работающем на длине волны 1.06 мкм как в режиме одиночных, так и в режиме сдвоенных импульсов излучения длительностью по ~15 нс. Межимпульсный интервал (τ) мог изменяться в диапазоне 1-300 мкс. Энергия лазерных импульсов составляла 25 мДж.

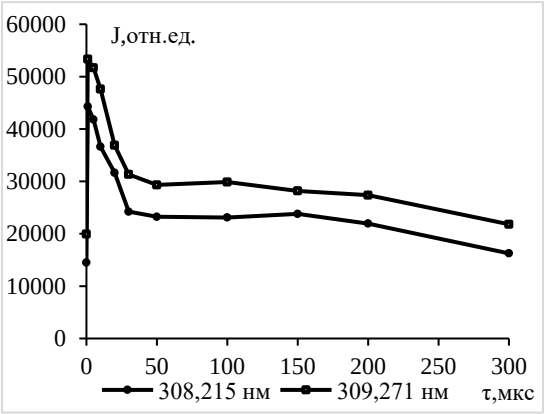


Рис. 1. Зависимости интенсивности линий плазмы алюминия от межимпульсного интервала

На рис. 1 приведены зависимости интенсивности линий Al I 308.215 нм и Al I 309.271 нм от τ. Интенсивности спектральных линий растут с уменьшением τ и достигают максимума при τ~1-5 мкс.

На рис. 2 представлена зависимость выноса материала из кратера на A1 пластинке (толщины слоя аблированного материала за один сдвоенный импульс) от τ. Вынос материала растет с уменьшением τ и достигает максимума при τ~1 мкс.

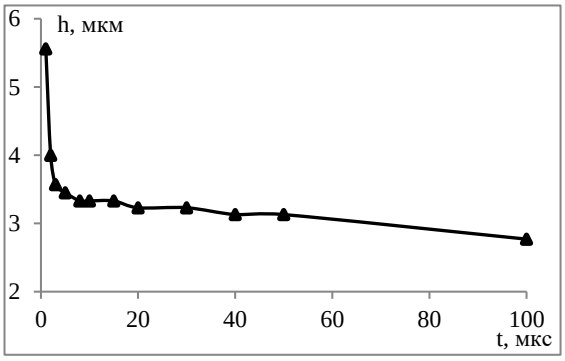
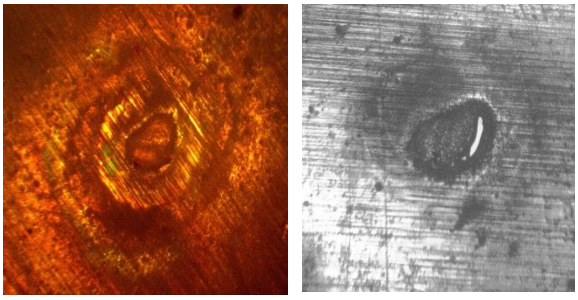


Рис. 2. Вынос материала кратера на A1 пластинке в зависимости от межимпульсного интервала

На рис. 3 представлены фотографии лазерных кратеров на медной (А) и алюминиевой (В) пластинках. Видны области отожженного металла вокруг кратеров. Это значит, что они были подвергнуты действию высоких температур.



(а) (б)

Рис. 3. Фотографии лазерного кратера на медной (а) и алюминиевой (б) пластинках

Из анализа представленных результатов следует, что основным фактором, приводящим к росту выноса материала из эрозионного кратера и росту интенсивности спектральных линий плазменных факелов при двухимпульсном лазерном воздействии на вещество, является высокая температура кратера, оставшаяся после действия первого лазерного импульса. Чем меньше τ, тем эффективнее происходит взаимодей-

ствие лазерного излучения с «горячей поверхностью» кратера.

Оценка температуры в эрозионном кратере, проведенная по методике [10-11], показала, что через 1 мкс после действия первого лазерного импульса, при двухимпульсном воздействии на вещество, она составляет порядка 600-700 °С.

Вторым фактором, влияющим на рост эффективности взаимодействия лазерного излучения с «горячей поверхностью», является то, что она более эффективно поглощает лазерное излучение. Та его часть, которая отражалась, в этом случае поглощается. Это приводит к дополнительному росту выноса материала и интенсивности спектральных линий при двухимпульсном лазерном воздействии на вещество.

Фактором, приводящим к росту интенсивности спектральных линий плазменных факелов при двухимпульсном лазерном воздействии на вещество, является взаимодействие второго плазменного факела, который выносит из кратера значительно большее количество вещества с охлаждающейся плазмой первого плазменного факела. Это приводит к тому, что за счет плазмохимических реакций значительная часть энергии, аккумулированной в плазме второго факела, передается охлажденному веществу первого факела. Эта энергия идет на диспергирование конденсирующегося вещества на отдельные атомы, их возбуждение и ионизацию. Т.е. она излучается не в виде непрерывного фонового излучения плазмой, а в виде селективного излучения атомов и ионов.

Заключение

Таким образом, высокая температура эрозионного кратера, оставшаяся после действия первого лазерного импульса, увеличение поглощательной способности «горячей поверхности» лазерного излучения и взаимодействие плазменных факелов, сопровождающееся перераспределением их энергий, приводит к росту эффективности взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом.

Библиографические ссылки

1. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску Й. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. Москва: Наука; 1988. 538 с.
2. Арумов Г.П., Бухаров А.Ю. Каменская О.В., Котянин С.Ю., Кривощеков В.А., Ляш А.Н и др. Влияние режима облучения на поверхности на спектр свечения лазерной плазмы. *Письма в ЖТФ* 1987; 13(14): 870-874.
3. Singh J., Thakur S. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Amsterdam: Elsevier; 2007. 454 p.
4. 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.
5. Зажогин, А.П., Фадаиян А.Р. Динамика процессов абляции и развития приповерхностной лазерной плазмы сплавов алюминия сдвоенными лазерными импульсами. *Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Мат-ка. Инфор-ка.* 2008; (3): 15-18.
6. 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.
7. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Бельков М.В. Влияние плотности мощности лазерного излучения на интенсивность спектральных линий основных компонентов лазерной плазмы. *ЖПС* 2018; 85(2): 285-292.
8. Зноско К.Ф., Лещик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 6. Тэхніка* 2021; 11(1): 45-58.
9. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(2): 103-115.
10. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd^{3+}-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. *Веснік Гродзенскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя Янкі Купалы. Серыя 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, вылічальная тэхніка і кіраванне* 2020; 10(3): 100-113.
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, выліч. тэхніка і кіраванне* 2021; 11(1): 94-106.