

ОЦЕНКА ТЕМПЕРАТУРЫ В КРАТЕРЕ, ОБРАЗОВАННОМ НАНОСЕКУНДНЫМ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

К.Ф. Зноско, А.А. Лискович, А.А. Казьмин

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

Представлены результаты экспериментального определения температуры в эрозионном кратере, образованном лазерным излучением наносекундной длительности, на поверхности Ni-Cr сплава. Путем сравнения интенсивностей спектральных линий Ni, Cr и их ионов плазмы, образованной одиночными лазерным импульсом на нагретом до высокой температуры (до 1200 °C) образце Ni-Cr сплава, с интенсивностями этих же линий плазмы, образованной сдвоенными лазерными импульсами на том же самом образце, находящемся при комнатной температуре. Предварительный нагрев образца Ni-Cr сплава заменял его нагрев первым лазерным импульсом. Находя одинаковые значения интенсивностей спектральных линий, оценивалась температура эрозионного кратера после действия первого лазерного импульса. Получено, что температура эрозионного кратера через 1 мкс после воздействия лазерного импульса находится в диапазоне 600-700 °C.

Ключевые слова: эрозионный кратер; эрозионная плазма; температура в кратере; межимпульсный интервал; лазерная абляция; сдвоенные лазерные импульсы.

ESTIMATION OF THE TEMPERATURE IN THE CRATER FORMED NANOSECOND LASER RADIATION

K.F. Znosko, A.A. Liskovich, A.A. Kazmin

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

The results of experimental determination of the temperature in an erosion crater formed by nanosecond laser radiation on the surface of a Ni-Cr alloy are presented. By comparing the intensities of the spectral lines of Ni, Cr and their ions of plasma formed by single laser pulses on a sample of Ni-Cr alloy heated to a high temperature (up to 1200 °C), with the intensities of the same lines of plasma formed by double laser pulses on the same sample, located at room temperature. The preliminary heating of the Ni-Cr alloy sample by electric current replaced its heating with the first laser pulse. Finding equal intensities of the spectral lines, we estimated the temperature of the erosion crater after the action of the first laser pulse. It has been found that the temperature of the erosion crater 1 μs after exposure to a laser pulse is in the range of 600–700 °C. At temperatures close to the melting point of the Ni-Cr alloy (>1000 °C), a decrease in the intensity of the spectral lines was observed. This is due to an increase in the microdroplet removal of material from the erosion crater, due to the pressure of the vapor-plasma cloud, which leads to a decrease in the mass of the Ni-Cr alloy material that turns into plasma, and, accordingly, to a decrease in its luminosity. This is confirmed by the presence of a parapet that surrounds the crater, as well as the presence of hardened microdrops around it.

Keywords: erosion crater; erosion plasma; temperature in the crater; interpulse interval; laser ablation; dual laser pulses.

Введение

Интерес к исследованиям взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов и их цугов с веществом связан с технологическим прорывом в разработке лазеров этого типа. Лазеры, генерирующие сдвоенные импульсы (цуги импульсов), стали выпускаться промышленностью. Их применение в лазерных технологиях обеспечивает значительные преимущества по сравнению с моноимпульсными лазерами. При исполь-

зовании сдвоенных лазерных импульсов происходит рост выноса вещества из эрозионного кратера [1-2] и рост интенсивности излучения эрозионной плазмы [3-4]. Эти эффекты объяснялись поступлением атомов, испарившихся под действием второго лазерного импульса, в плазму, увеличением абляции за счет разогрева поверхности объекта первым лазерным импульсом, наличием ударной волны в плотной плазме и т.д. [5-6]. В этой связи исследова-

ние взаимодействия сдвоенных лазерных импульсов с веществом приобрели новую актуальность.

В работах [3, 7, 8] указывалось, что первый лазерный импульс разогревает область взаимодействия, а второй импульс значительно более эффективно взаимодействует с «разогретой» поверхностью. В [9, 10] показана значимая роль температуры кратера, оставшейся после действия первого лазерного импульса, на эффективность взаимодействия второго лазерного импульса с мишенью.

Целью настоящей работы является оценка температуры в кратере, образованном лазерным импульсом на поверхности мишени.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка описана в [11-12]. Использовался YAG:Nd³⁺ лазер, генерирующий на длине волны 1.06 мкм как одиночные, так и сдвоенные импульсы излучения длительностью по ~15 нс. Межимпульсный интервал изменялся от 1 мкс до 300 мкс. Энергия лазерных импульсов составляла 25 мДж. Излучение лазера фокусировалось на поверхность Ni-Cr сплава, нагретого до высокой температуры под действием электрического тока. Плотность мощности падающего излучения ~10⁹ Вт/см². Температура мишени измерялась с помощью оптического измерителя температуры ИТ-3СМ.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1-4 представлены зависимости интенсивности спектральных линий атомов Ni, Cr и их ионов, от температуры исследуемого образца при воздействии на него одиночными (красные) и сдвоенными (синие) лазерными импульсами. В обоих случаях рост температуры мишени приводит к росту интенсивности линий.

При моноимпульсном воздействии максимум интенсивности спектральных линий приходится на 900°C, а при воздействии сдвоенными лазерными импульсами на 700 °C. Это связано с тем, что первый ла-

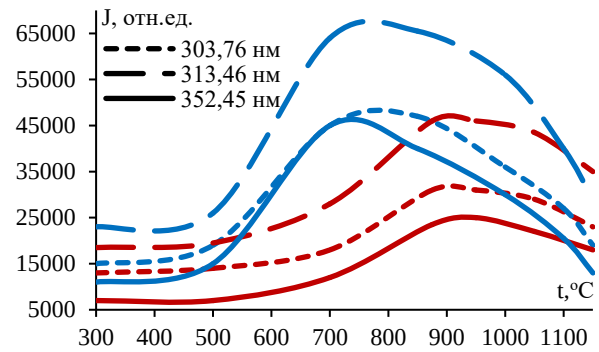


Рис. 1. Зависимости интенсивности линий атомов никеля от температуры исследуемого образца

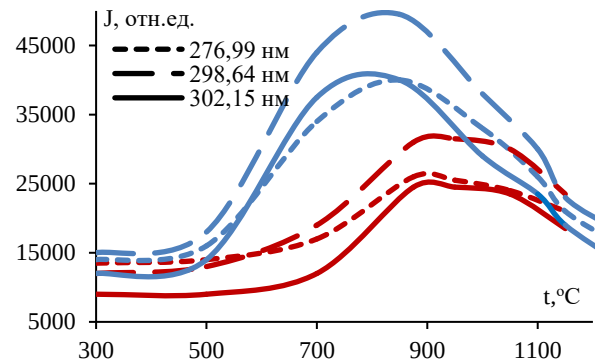


Рис. 2 Зависимости интенсивности линий атомов хрома от температуры исследуемого образца

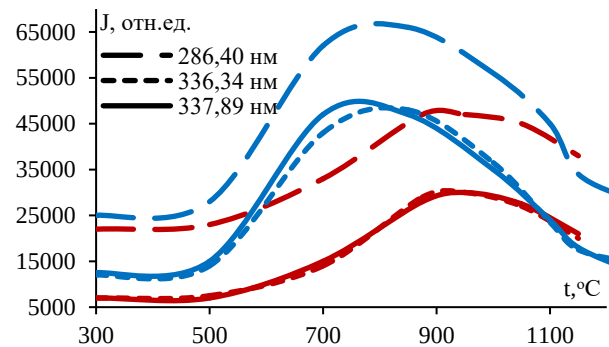


Рис. 3. Зависимости интенсивности линий ионов никеля от температуры исследуемого образца

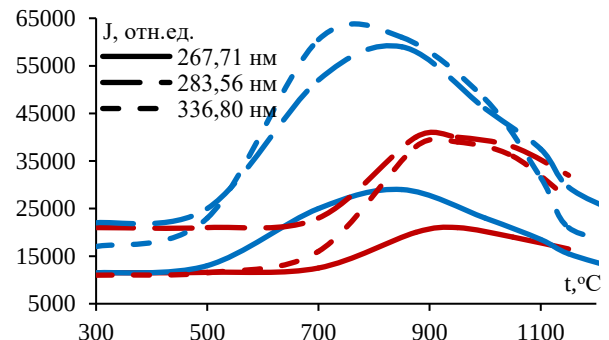


Рис. 4. Зависимости интенсивности линий ионов хрома от температуры исследуемого образца

зерный импульс дополнительно догревает кратер. Интенсивности их возрастают в обоих случаях в 2.5-3.5 раза.

Оценка температуры в эрозионном кратере проводилась путем сравнения интенсивностей спектральных линий Ni, Cr и их ионов, при моноимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы на нагретом до высокой температуры образце Ni-Cr сплава, с интенсивностями этих же линий при формировании лазерно-эмиссионной плазмы сдвоенными лазерными импульсами на том же самом образце, находящемся при комнатной температуре. Предварительный нагрев образца электрическим током в этом случае заменял его нагрев первым лазерным импульсом. Находя одинаковые значения интенсивностей линий проводилась оценка температуры эрозионного кратера. Получено, что температура эрозионного кратера через 1 мкс после воздействия первого лазерного импульса, при двухимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы, составляет 600-700 °C.

Снижение интенсивности спектральных линий при температурах больших 1000 °C связано с ростом микрокапельного выноса материала из эрозионного кратера, обусловленного давлением пароплазменного облака, который приводит к уменьшению массы материала мишени, превращающейся в плазму, а соответственно и к уменьшению её светимости.

Заключение

Показано, что после действия лазерного импульса на поверхности мишени образуется кратер, температура в котором через 1 мкс составляет 600-700 °C. Температура эрозионного кратера, обусловленная действием первого лазерного импульса, является основным фактором роста выноса материала и увеличения интенсивности спектральных линий при двухимпульсном лазерном воздействии на вещество.

Библиографические ссылки

1. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску Й. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. Москва: Наука; 1988. 538 с.
2. Sattman R., Sturm V., Noll R. Laser-induced breakdown spectroscopy of steel samples using multiple Q-switch ND-YAG laser-pulses. *J. of Phys. D: Appl. Physics* 1995; 28(10): 2181-2187.
3. 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.
4. Кремерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. Москва: Техносфера; 2009. 370 с.
5. Corsi M., Cristoforetti G., Giuffrida M., Hidalgo M., Legnaioli S., Palleschi V. [et al.] Three-dimensional analysis of laser induced plasmas in single and double pulse configuration. *Spectrochimica Acta, Part B* 2004; 59(5): 723-735.
6. Вейко В.П., Либенсон М.Н., Червяков Г.Г., Яковлев Е.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом. Силовая оптика. Под ред. В. И. Ковнова. М.: Физматлит; 2008. 312 с.
7. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd³⁺-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.
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. 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.
10. 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.
11. 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. *ЖЛС* 2018; 85(2): 285-292.
12. 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.