

МЕХАНИЗМЫ РОСТА ВЫНОСА ВЕЩЕСТВА ИЗ ЭРОЗИОННОГО КРАТЕРА ПРИ ДВУХИМПУЛЬСНОЙ ЛАЗЕРНОЙ АБЛЯЦИИ

К.Ф. Зноско

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

Представлены результаты экспериментального исследования механизмов роста абляции металлов сдвоенными лазерными наносекундными импульсами. Показано, что рост выноса вещества из эрозионного кратера и рост интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы, при воздействии на металлическую мишень сдвоенными лазерными импульсами, обусловлены высокой температурой кратера (600–700°C и более), образованного первым лазерным импульсом. Воздействие второго лазерного импульса на «горячую» поверхность того же самого кратера приводит к существенному снижению затрат энергии на ее нагрев. Энергия второго лазерного импульса в основном затрачивается на вынос вещества (плазмы) из кратера. Кроме того, «горячая» поверхность кратера обладает более высокой поглощающей способностью лазерного излучения. Лазерно-эмиссионный плазменный факел, образованный вторым лазерным импульсом, выносит из кратера в несколько раз (до одного порядка) больше вещества, чем факел, образованный первым лазерным импульсом. Это приводит к тому, что суммарный вынос вещества из эрозионного кратера парой лазерных импульсов превышает вынос вещества одиночным импульсом в 2-5 раз и зависит от материала мишени. При этом энергия пары лазерных импульсов равна энергии одиночного импульса.

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

MECHANISMS OF GROWTH OF SUBSTANCE OUTLET FROM AN EROSION CRATER DURING TWO-PULSE LASER ABLATION

K.F. Znosko

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

The article presents the results of an experimental study of the mechanisms of metal ablation growth by double laser nanosecond pulses. It is shown that the growth of the substance removal from the erosion crater and the growth of the intensity of the spectral lines of the laser-emission plasma, when a metal target is exposed to double laser pulses, are due to the high temperature (600–700°C and more) of the crater formed by the first laser pulse. The action of the second laser pulse on the “hot” surface of the same crater leads to a significant decrease in the energy costs for its heating. The energy of the second laser pulse is mainly spent on the removal of substance (plasma) from the crater. In addition, the “hot” surface of the crater has a higher absorption capacity of laser radiation. The laser-emission plasma torch formed by the second laser pulse removes from the crater several times (up to one order of magnitude) more substance than the torch formed by the first laser pulse. This leads to the fact that the total removal of matter from the erosion crater by a pair of laser pulses exceeds the removal of matter by a single pulse by 2-5 times and depends on the target material. In this case, the energy of a pair of laser pulses is equal to the energy of a single pulse.

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

Введение

Взаимодействие интенсивного лазерного излучения с материалами исследуется практически с момента открытия лазеров. Лазерное излучение широко используется во многих областях науки, техники и производства, однако процессы, происходящие при этом, до конца еще не изучены.

При воздействии сфокусированным лазерным излучением на твердое тело на его поверхности образуется эрозионный кратер, происходит вынос вещества лазерно-эмиссионным плазменным факелом в окружающее пространство. Представляет интерес исследование механизмов выноса вещества из кратера для целей обработки

материалов лазерным излучением [1–3]; исследование процессов, происходящих в лазерно-эмиссионной плазме для формирования покрытий и наноструктурирования вещества [4]; исследование излучения плазмы для лазерно-эмиссионной спектроскопии (LIBS) [5–7]. В ряде работ указывалось, что использование сдвоенных лазерных импульсов для обработки материалов значительно увеличивает скорость абляции по сравнению с одиночными импульсами, однако исследованию механизмов этого явления должного внимания уделено не было [8–10].

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка описана в [11]. Использовался YAG:Nd³⁺ лазер, работающий на длине волны 1.06 мкм как в режиме одиночных, так и в режиме сдвоенных (парных) импульсов излучения длительностью по ~15 нс каждый. Межимпульсный интервал мог регулироваться в диапазоне 1–300 мкс. Энергия лазерных импульсов могла изменяться от 5 до 32 мДж. Исследовалась эффективность выноса вещества на примерах алюминия, меди, никеля, нержавеющей стали. Излучение лазера фокусировалось на поверхность металлических пластинок в пятно диаметром меньше 0.5 мм. Плотность мощности лазерного излучения на мишене составляла до 10⁹ Вт/см².

Результаты и их обсуждение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что толщина аблированного слоя сдвоенными лазерными импульсами алюминия в ~5 раз, меди в ~6 раз, никеля и нержавеющей стали в ~4 раза больше, чем толщина аблированного слоя этих металлов одиночными импульсами с энергией равной энергии сдвоенных импульсов. Межимпульсный интервал при этом составлял 1 мкс. Расчеты, проведенные по методике [4, 5], показывают, что второй лазерный импульс обеспечивал вынос материала из кратера больший, чем первый в ~9 раз для алюми-

ния, в ~11 раз для меди и в ~7 раз для никеля и нержавеющей стали.

После воздействия на мишень первым лазерным импульсом температура образованного кратера в течение нескольких микросекунд остается высокой, а для металлов с низкой температурой плавления в кратере находится расплав. Воздействие второго лазерного импульса на «горячую» поверхность того же самого кратера приводит к существенному снижению затрат энергии на ее нагрев. Энергия второго лазерного импульса в основном затрачивается на вынос вещества в виде плазмы и микрокапель. Также «горячая» поверхность кратера обладает более высокой поглощающей способностью лазерного излучения, что приводит к дополнительному росту выноса вещества из кратера.

Наличие высокой температуры в кратерах подтверждается наблюдаемыми кольцеобразными цветами побежалости, которые окружают кратеры, на металлических пластинках. Кратеры окружены областью отожженного металла, что подтверждает то, что металлы были подвержены воздействию высокой температуры, которая привела к окислению их поверхностей и изменению структуры.

Рост выноса вещества из эрозионного кратера сильно зависит от межимпульсного интервала. Он достигает максимума при межимпульсных интервалах, составляющих 1–2 мкс. С ростом межимпульсного интервала вынос материала из эрозионного кратера резко снижается. Для исследованных металлов снижение выноса материала из кратера в 2 раза происходит уже при межимпульсных интервалах около 10 мкс. При межимпульсных интервалах больших 10 мкс снижение выноса материала из кратера с ростом межимпульсного интервала происходит медленнее.

Для оценки температуры в эрозионном кратере после действия первого лазерного импульса, проводилось сравнение интенсивностей спектральных линий излучаемых лазерно-эмиссионной плазмой, образованной одиночными лазерными им-

пульсами на нагретой до высокой температуры мишени (до 1000 °С), с интенсивностями этих же линий излучаемых лазерно-эмиссионной плазмой, образованной сдвоенными лазерными импульсами на той же самой мишени, находящейся при комнатной температуре аналогично [12]. При равенстве интенсивностей спектральных линий можно полагать, что нагрев мишени до высокой температуры эквивалентен действию первого лазерного импульса. В первом приближении можно считать, что температура локального нагрева кратера первым лазерным импульсом равна температуре нагрева мишени внешним источником. Оценка показывает, что температура эрозионного кратера через 1 мкс после воздействия первого лазерного импульса при двухимпульсном формировании лазерно-эмиссионной плазмы составляет 600-700°С и более.

Максимум интенсивности спектральных линий наблюдалась при межимпульсном интервале в 1 мкс. Она в 5-8 раз превышала интенсивность этих линий при одноимпульсном образовании плазмы. С ростом межимпульсного интервала до 30 мкс она резко падала. При межимпульсном интервале ~50 мкс интенсивность этих линий уменьшалась до 3 раз.

Заключение

Таким образом, основным механизмом, приводящим к росту выноса вещества из эрозионного кратера и росту интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при наносекундном двухимпульсном лазерном воздействии на металлы, является высокая температура кратера, образованного первым импульсом, а также его высокая поглощательная способность к лазерному излучению.

Библиографические ссылки

1. Зноско К.Ф. Рост эффективности взаимодействия сдвоенных импульсов YAG:Nd³⁺-лазера с Al мишенью при уменьшении межимпульсного интервала. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне* 2020; 10(3): 100-113.

2. Зноско К.Ф., Лещик С.Д. Оптимизация двухимпульсного режима лазерной абляции цветных металлов. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 6. Тэхніка* 2021; 11(1): 45-58.
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. Гончаров В.К., Козадаев К.В., Макаров В.В., Щегрикович Д.В. Протекание эрозионных процессов в приповерхностной области металлов под действием интенсивных наносекундных лазерных импульсов. *Инженерно-физический журнал* 2013; 86(4): 747-753.
5. Ануфрик С.С., Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Ануцин С.Н. Исследование микроэлементного химического состава строительного песка методами спектрального анализа. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэм. Фіз. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2016; 6(2): 57-63.
6. Попов А.М., Лабути Т.А., Зоров Н.Б. Использование лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии для анализа конструкционных материалов и объектов окружающей среды. *Вестник МГУ. Сер. 2. Химия* 2009; 50(6): 453-467.
7. Ануфрик С.С., Зноско К.Ф., Курьян Н.Н. Спектральный анализ элементного состава древесноволокнистой плиты. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэмат. Фіз. Інфарм., выліч. тэхніка і кіраванне* 2015; (3): 83-92.
8. Курьян Н.Н., Зноско К.Ф., Григуть В.В. Временная динамика свечения лазерно-эмиссионного факела глины. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фіз. Інфарм., выліч. тэхніка і кір.* 2018; 8(2): 101-110.
9. Воропай Е.С., Ермалицкая К.Ф., Ермалицкий Ф.А. Измерение временных зависимостей эмиссионных спектров сплавов при двухимпульсной лазерной абляции. *ЖПС* 2019; 86(2): 83-89.
10. Зноско К.Ф. Усиление интенсивности спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы при ее формировании сдвоенными лазерными импульсами. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фізіка. Інфармат., выліч. тэхніка і кіраванне* 2020; 10(2): 103-115.
11. Зноско К.Ф. Механизмы усиления интенсивности спектральных линий плазмы и роста выноса материала из эрозионного кратера при двухимпульсной лазерной абляции. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэм. Фіз. Інфарм., выліч. тэхніка і кір.* 2023; 13(1): 116-132.
12. Зноско К.Ф. Влияние температуры мишени на интенсивность спектральных линий лазерно-эмиссионной плазмы. *Вестник ГрДУ им. Янки Купалы. Сер. 2. Матэматыка. Фіз. Інфарматыка, выліч. тэхніка і кіраванне* 2021; 11(1): 94-106.