ЛАЗЕРНАЯ АБЛЯЦИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ СДВОЕННЫМИ НАНОСЕКУНДНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ YAG:Nd^{3+}-ЛАЗЕРА

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

Представлены результаты экспериментального исследования абляции алюминия, меди и нержавеющей стали сдвоенными наносекундными импульсами с энергией 50 мДж (25 мДж+25 мДж). Показано, что максимальный вынос материала (толщина аблированного слоя) происходит при межимпульсном интервале равном 1 мкс. Для алюминия он составлял ~5.5 мкм, для меди ~2.5 мкм и для нержавеющей стали 1.67 мкм за один сдвоенный импульс. При моноимпульсной абляции вынос материала составлял ~0.53 мкм для алюминия, 0.21 мкм для меди и 0.18 мкм для нержавеющей стали. Таким образом, эффективность лазерной абляции сдвоенными лазерными импульсами при межимпульсном интервале в 1 мкс в ~5 раз выше для алюминия, в ~6 раз выше для меди и в ~4.5 раза выше для нержавеющей стали, по сравнению с моноимпульсной абляцией (в расчете на единицу затраченной энергии лазерного излучения).

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

LASER ABLATION OF NON-FERROUS METALS BY DOUBLE NANOSECOND PULSES OF YAG:Nd^{3+} LASER

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

The results of an experimental study of the ablation of aluminum, copper and stainless steel by dual nanosecond pulses with an energy of 50 mJ (25 mJ + 25 mJ) are presented. It is shown that the maximum removal of material (the thickness of the ablated layer) occurs at an interpulse interval of 1 μs. For aluminum, it was ~5.5 μm, for copper, ~2.5 μm, and for stainless steel, 1.67 μm in one double pulse. With monopulse ablation, the material removal was ~0.53 μm for aluminum, 0.21 μm for copper, and 0.18 μm for stainless steel. Thus, the efficiency of laser ablation with double laser pulses at an interpulse interval of 1 μs is ~5 times higher for aluminum, ~6 times higher for copper, and ~4.5 times higher for stainless steel, compared with single-pulse ablation (calculated per unit of expended energy of laser radiation). The material removal by the second laser pulse relative to the first one was calculated. With an interpulse interval of 1 μs, the removal of material by the second laser pulse exceeds the removal of material by the first pulse by ~9.5 for Al, ~11 for Cu, and ~8 for stainless steel. With an increase in the interpulse interval, the removal of material by the second laser pulse decreases compared to the first one. Already at τ~5 μs, it decreases by 1.5 times. At τ~50 μs, the removal of material is reduced by almost half. This is due to a decrease in the temperature of the erosion crater remaining after the action of the first laser pulse over time.

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

Введение

Лазерная абляция - технологический процесс прецизионного удаления материала с поверхности изделия путем воздействия на неё концентрированного потока лазерного излучения. Ее развитие идет в двух направлениях. Первое, это вынос (удаление) материала для придания объекту нужной формы и/или свойств - маркировка, гравировка, лазерная резка, прошивка отверстий, очистка изделий, структурирование поверхности и т.д. [1-3]. Второе, это использование вынесенной диспергированной массы вещества - спектральный анализ, нанесение тонких пленок, синтез наноматериалов и т.д. [4-6].

В работах [1-3, 7, 8] отмечалось, что использование сдвоенных лазерных импуль-

сов, а также их цугов, значительно увеличивает скорость лазерной резки, прошивки отверстий (скорость выноса материала) по сравнению с использованием одиночных импульсов.

В работах [2, 3, 7] указывалось, что первый лазерный импульс разогревает область взаимодействия, а второй импульс значительно более эффективно взаимодействует с «горячей» поверхностью.

В [9] экспериментами по абляции Ni-Cr сплава, нагретого до температуры 600-1200°C, показана важная роль температуры кратера, оставшейся после действия первого лазерного импульса, на эффективность взаимодействия второго лазерного импульса с мишенью.

Целью настоящей работы является оптимизация условий протекания двухимпульсного режима лазерной абляции для обработки цветных металлов.

Экспериментальная установка

Экспериментальная установка подробно описана в [3, 5-7]. Ее основу составлял YAG:Nd^{3+} лазер, работающий на длине волны 1.06 мкм как в режиме одиночных, так и в режиме генерации сдвоенных импульсов излучения длительностью по ~15 нс. Межимпульсный интервал τ мог изменяться в диапазоне 1-300 мкс. Энергия лазерных импульсов составляла 25 мДж. Исследовалась эффективность прошивки отверстий в пластинках из алюминия (Al) и меди (Cu), толщиной по 0.1 мм, и нержавеющей стали 12Х18Н9ТЛ (н/ж стали) толщиной 0.2 мм. Излучение лазера фокусировалось на поверхность пластинок фокусирующей системой. Плотность мощности падающего излучения ~10^9 Вт/см^2. Диаметр пятна лазерного излучения на пластинке с учетом расширения кратера вытеснением расплава давлением паров был меньше 0.5 мм.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости числа сдвоенных лазерных импульсов, необходимых для пробоя пластинок Al, Cu и н/ж стали от межимпульсного интервала τ. Минимальное число сдвоенных лазерных импульсов, необходимых для пробоя отверстий, наблюдается при минимальном межимпульсном интервале равном τ~1 мкс. В этом случае Al пластинка прошивалась 18-ю парами лазерных импульсов, медная 39-ю, а пластинка из н/ж стали 120-ю (суммарно 36, 78, и 240 импульсов).

Для прошивки отверстий при использовании одиночных лазерных импульсов с энергией в 25 мДж необходимо было ~190, ~480 и ~1100 импульсов соответственно. Размеры кратеров оставались практически неизменными при переходе от одиночных лазерных импульсов к сдвоенным.

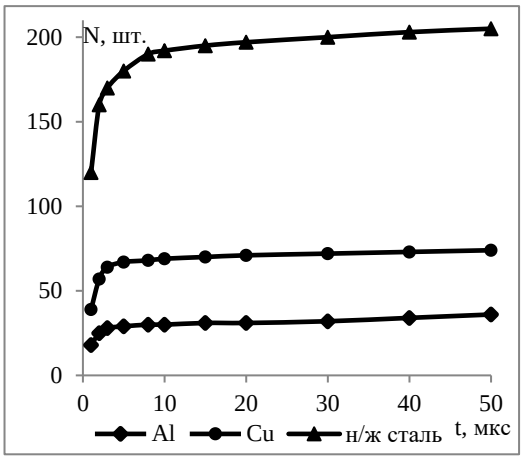

Рис. 1. Зависимости числа сдвоенных импульсов необходимых для пробоя пластинок от τ

Вынос материала из алюминиевой пластинки при τ~1 мкс составлял ~5.5 мкм за один сдвоенный импульс. В расчете на один лазерный импульс ~2.75 мкм. При моноимпульсной прошивке вынос материала составил~0.53 мкм за один импульс.

Вынос материала из медной пластинки составил ~2.5 мкм за один сдвоенный импульс (~1.25 мкм в расчете на один лазерный импульс). Вынос материала при моноимпульсной прошивке отверстия составлял ~0.21 мкм за один импульс.

Вынос материала из пластинки н/ж стали составлял ~1.7 мкм за один сдвоенный импульс. (~0.85 мкм в расчете на один лазерный импульс). При пробое пластинки моноимпульсами вынос составлял ~ 0.18 мкм за один импульс.

Таким образом, эффективность лазерной абляции сдвоенными лазерными импульсами при τ~1 мкс в ~5 раз выше для Al, в ~6 раз выше для Cu и в ~4.5 раза выше для н/ж стали, по сравнению с моноимпульсной абляцией (в расчете на один импульс).

Проведем оценку эффективности выноса материала из кратера вторым лазерным импульсом относительно первого *k* по аналогии с [2]. *k* - это отношение толщины аблированного слоя вторым лазерным импульсом к толщине аблированного слоя первым импульсом. Полагая, что $N_1h_1=N_2h_2=d$, где N_1 - количество одиночных импульсов необходимых для прошивки отверстия, h_1 - вынос материала одиночным импульсом, N_2 - количество сдвоенных импульсов (количество пар) необходимых для прошивки отверстия, h_2 - вынос материала парой импульсов, d - толщина пластинки. $h_2= h_1+\Delta h_2$, где h_1 и Δh_2 – скорости выноса материала первым (одиночным) и вторым лазерным импульсом в паре соответственно. Получим

$$k=\Delta h_2/\Delta h_1=N_1/N_2-1.$$

Рассчитанная по этой формуле эффективность выноса материала пластинки *k* вторым лазерным импульсом составляет ~9.5 для Al, ~11 для Cu и ~8 для н/ж стали. Это означает, что второй лазерный импульс при τ~1 мкс обеспечивает вынос материала из кратера в указанное число раз больший, чем первый. При увеличении межимпульсного интервала эффективность выноса материала вторым лазерным импульсом *k* снижается. Так, при τ~50 мкс *k* практически вдвое меньше, чем при τ~1 мкс. Это обусловлено снижением температуры эрозионного кратера, оставшейся после действия первого лазерного импульса с течением времени.

Заключение

Экспериментально показана высокая эффективность процесса лазерной абляции цветных металлов с использованием сдвоенных лазерных наносекундных импульсов. Основной вклад в рост эффективности абляции вносит второй лазерный импульс. Толщина аблированного слоя вторым лазерным импульсом практически на порядок превышает толщину аблированного слоя первым лазерным импульсом. Максимальная эффективность двухимпульсной абляции достигается при малых межимпульсных интервалах (порядка 1 мкс).

Библиографические ссылки

1. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску Й. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. Москва: Наука; 1988. 538 с.
2. 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.
3. 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.
4. Кремерс Д., Радиемски Л. Лазерно-искровая эмиссионная спектроскопия. Москва: Техносфера; 2009. 370 с.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
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.