

УДК 535-3; 535-2; 539.3; 533.9  
EDN: FKHVCE

PACS: 79.20.Eb, 52.38.Mf

**Абляция бескислородной меди бихроматическими наносекундными лазерными импульсами в воздушной среде**© В. Ю. Железнов<sup>1</sup>, В. В. Лычковский<sup>2</sup>, С. И. Миколуцкий<sup>1,\*</sup>, В. Е. Рогалин<sup>1</sup>,  
Ю. В. Хомич<sup>1</sup>, А. Н. Чумаков<sup>2</sup><sup>1</sup> Институт электрофизики и электроэнергетики РАН, Санкт-Петербург, 191186 Россия

\* E-mail: mikolserg@mail.ru

<sup>2</sup> Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси, Минск, 220072 БеларусьСтатья поступила в редакцию 2.04.2025; после доработки 23.04.2025; принята к публикации 11.08.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.9

*Исследованы особенности образования плазмы на поверхности бескислородной меди при облучении двойными бихроматическими (355 нм и 532 нм) лазерными импульсами длительностью 18 нс и 15 нс, соответственно, с различным временным интервалом между ними и порядком следования импульсов. Проведены эксперименты с нарастающим количеством двойных бихроматических импульсов и разным порядком их следования при плотностях энергии в каждом около 200 Дж/см<sup>2</sup>. Установлена повышенная глубина кратеров при порядке следования лазерных импульсов 532 нм + 355 нм по сравнению с обратным порядком следования импульсов с длинами волн 355 нм + 532 нм. Результаты работы могут быть использованы при выборе оптимального режима обработки материалов двойными бихроматическими импульсами, а также при дальнейшем изучении особенностей формирования лазерной плазмы.*

*Ключевые слова:* наносекундный лазер; бихроматические импульсы; абляция; воздушная среда; спектры плазмы.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-4-87-93

**Введение**

Исследования лазерной абляции материалов актуальны вследствие непрерывного развития лазеров и расширения сферы их технологических применений [1–3]. Процессы лазерной абляции в воздухе зависят от теплофизических и оптических свойств облучаемых материалов, длины волны и интенсивности лазерного излучения (ЛИ), а также от длительности лазерных импульсов и частоты их повторения. Показано, что при высоких частотах повторения лазерных импульсов (свыше 5 кГц) и больших интенсивностях ЛИ абляция материалов в воздухе сопровождается преимущественным образованием эрозивной

плазмы с многократным ростом давления на облучаемой поверхности [4]. В таких режимах облучения резко возрастает эффективность абляции материалов, а также расширяются возможности их лазерной обработки [5–11].

Даже при воздействии двух наносекундных лазерных импульсов, разделенных временным интервалом в единицы или десятки микросекунд, выявлено усиление абляции облучаемого материала и разогрева образующейся плазмы [12–15]. Усиление разогрева приповерхностной плазмы и рост энергии ионов наблюдается и при воздействии двух фемтосекундных лазерных импульсов, разделенных временным интервалом от единиц до тысяч пикосекунд [16, 17]. Поэтому двухим-

пульсное лазерное воздействие на материалы широко используется в лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии [18].

Эксперименты показали, что двухимпульсное бихроматическое лазерное воздействие дает больше степеней свободы для управления процессами лазерной модификации и абляции ряда материалов, а также разогрева приповерхностной плазмы [19–23].

Медь, и ее сплавы, благодаря высоким значениям электро- и теплопроводности, являются базовыми материалами электрофизики и электротехники [24]. Однако высокие значения теплопроводности и коэффициента отражения меди иногда являются проблемами при ее лазерной обработке [25, 26]. Для преодоления данной проблемы успешно применяются неодимовые лазеры с модулированной добротностью, генерирующие ЛИ видимого и ультрафиолетового (УФ) диапазонов с приемлемым КПД [27–32]. А дополнительные преимущества в формировании и нагреве лазерной плазмы может дать двухимпульсный режим облучения материалов на различных длинах волн (бихроматический) при учете изменения отражательной способности мишеней и коэффициента поглощения излучения плазмой от длины волны ЛИ [21, 32–34].

Целью настоящей работы было выявление особенностей образования плазмы на поверхности бескислородной меди (МБ) при облучении бихроматическими импульсами с различным временным интервалом между ними, а также определение зависимости глубины абляционных кратеров от количества двойных импульсов и порядка их следования.

### Объект исследования и методика эксперимента

Объектами исследования являлись полированные образцы меди бескислородной (МБ) диаметром 40 мм и толщиной 8 мм с исходной шероховатостью поверхности 25 нм, которые облучались бихроматическими потоками лазерного излучения в различных режимах. В эксперименте использовалась установка на основе двух наносекундных Nd:YAG лазеров (Lotis ТП LH-2132, Lotis ТП LH-2137) с длинами волн ( $\lambda$ ) 532 и 355 нм, и длительностями импульсов 15 и 18 нс, соответственно. Система синхронизации обеспечивала генерацию

парных наносекундных импульсов с заданным временным интервалом между ними и порядком их следования, что важно из-за разницы в коэффициенте отражения, который для большинства металлов заметно падает при уменьшении длины волны [34]. При  $\lambda = 355$  нм медь отражает примерно 10 %, а при  $\lambda = 532$  нм – уже 40 %, тогда как на  $\lambda = 1064$  нм отражение составляет 97 %.

В эксперименте исследовалось образование эрозионной плазмы в воздухе при различных комбинациях воздействующих импульсов и задержки между ними. Абляционный лазерный факел регистрировался видеокамерой на основе ПЗС матрицы ICX415AL с объективом И-90У 4/75 ( $f = 75$  мм). Экспозиция отдельного кадра составляла  $\sim 3$  мс. Серии кадров записывались с синхронизацией от второго импульса бихроматического лазерного излучения (ЛИ).

При диаметре лазерного пятна в 125 мкм, формировавшегося на поверхности МБ спектроделителем и ахроматическим объективом, была получена пиковая плотность энергии ( $W_p$ ) воздействующего излучения, составляющая около 200 Дж/см<sup>2</sup>. Можно было варьировать количество двойных импульсов, а также время задержки между импульсами  $\Delta t$  до нескольких микросекунд. После лазерного воздействия морфологические изменения поверхности образца исследовались на оптическом профилометре NewView 7300.

### Результаты и их обсуждение

Картина на снимках факела приповерхностной плазмы, возбужденной бихроматическими лазерными импульсами с  $\lambda = 355$  и 532 нм ( $W \sim 200$  Дж/см<sup>2</sup>,  $q_{355} = 12$  ГВт/см<sup>2</sup>,  $q_{532} = 13,8$  ГВт/см<sup>2</sup>) демонстрирует различия для разного порядка следования импульсов (рис. 1).

При опережающем действии импульсов с  $\lambda = 355$  нм (рис. 1а–в) наблюдалось образование факела приповерхностной плазмы с вертикально вытянутой формой. С большой долей вероятности, это свидетельствует о развитии экранировки плазмой и смещении очага плазменного факела от облучаемой поверхности. Данная вытянутая структура формировалась уже при режимах лазерного облучения  $\Delta t = -1,4$  мкс в виде структуры с небольшим

«отростком» (рис. 1а) и быстро достигала максимального размера уже при режимах  $\Delta\tau = -4$  мкс. Отрицательное значение интервала означает опережающее действие импульсов 355 нм, а положительное – означает опережающее действие импульсов 532 нм.

При опережающем действии импульсов с  $\lambda = 532$  нм (рис. 1з–е) динамика факела изменяется схожим образом, но в более широком диапазоне. При режиме лазерного облучения  $\Delta\tau = +1,4$  мкс факел приповерхностной плазмы имеет вид полусферы, при  $\Delta\tau = +4$  мкс уже виден «отросток» как в предыдущем случае при  $\Delta\tau = -1,4$  мкс, а при  $\Delta\tau = +6$  мкс вытянутая структура достигает максимального размера.

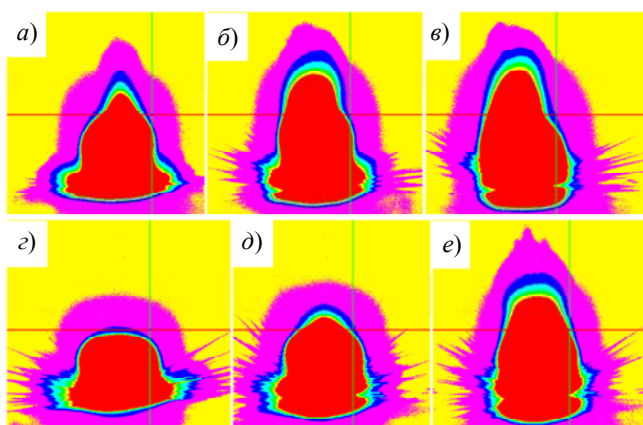


Рис. 1. Снимки приповерхностной плазмы, образованной бихроматическими лазерными импульсами с длинами волн излучения 355 и 532 нм ( $q_{355} = 12$  ГВт/см<sup>2</sup>,  $q_{532} = 13,8$  ГВт/см<sup>2</sup>) в режимах воздействия с интервалами между импульсами  $\Delta\tau$ : а)  $-1,4$  мкс; б)  $-4$  мкс; в)  $-6$  мкс; г)  $+1,4$  мкс; д)  $+4$  мкс; е)  $+6$  мкс

Следует отметить, что при значительно меньших интенсивностях бихроматического ЛИ (около 1 ГВт/см<sup>2</sup>) наблюдалась обратная картина [33], приповерхностная плазма разогревалась сильнее при опережающем действии импульсов 355 нм с максимумом в режиме с временным интервалом  $\Delta\tau = -1,4$  мкс. Причиной подобного расхождения могут быть следствия различия коэффициентов и механизмов поглощения ЛИ с  $\lambda = 355$  и 532 нм приповерхностной плазмой [35] и продуктами лазерной абляции, а также различия энергетических параметров ЛИ для случая, рассмотренного в данной работе и в [33]. Так, излучение  $\lambda = 355$  нм глубже проникает в образу-

ющуюся плазму и в большей степени поглощается в области у поверхности, в отличие от ЛИ 532 нм, которое поглощается еще и в области у фронта плазменного факела [35].

При больших интенсивностях ЛИ на 355 нм, проникающее к облучаемой поверхности, способно заметно «прогреть» образующуюся плазму на всем пути своего прохождения к облучаемой поверхности. При бихроматическом облучении этот эффект усиливается, т. к. происходит воздействие на продукты абляции от первого импульса (532 нм), которые за интервал времени между воздействующими импульсами успевают занять некоторый объем за счет теплового расширения. Однако, для подтверждения этих предположений необходимы дополнительные исследования динамики лазерной абляции.

На рис. 2 представлены профили кратеров на поверхности меди, полученные после воздействия одной пары бихроматических импульсов при следовании первым лазерного импульса с длиной волны 355 нм ( $\lambda = 355 + 532$  нм или  $\Delta\tau = -1,4$  мкс), и при следовании первым импульса с длиной волны 532 нм ( $\lambda = 532 + 355$  нм,  $\Delta\tau = +1,4$  мкс). Несмотря на то, что коэффициент поглощения меди в УФ-диапазоне существенно выше, чем в видимом, глубина кратера гораздо больше при комбинированном воздействии, когда первым идет лазерный импульс с длиной волны  $\lambda = 532$  нм, и достигает 7 мкм. При обратном порядке следования лазерных импульсов глубина кратера составляет  $\sim 4$  мкм. В случае воздействия одиночных импульсов глубина кратеров достигает 4,4 мкм и 2,3 мкм для  $\lambda = 355$  и  $\lambda = 532$  нм, соответственно.

Наглядно этот эффект можно продемонстрировать с помощью данных профилометрии, позволяющей получить зависимость глубины сформировавшихся после облучения кратеров от количества двойных импульсов при определенной временной задержке между ними ( $\Delta\tau = \pm 1,4$  мкс), также определяющей их последовательность (рис. 3). Как уже отмечалось, глубина кратеров в случае «положительной» задержки заметно больше, что можно использовать при выборе оптимального режима обработки материалов двойными бихроматическими импульсами.

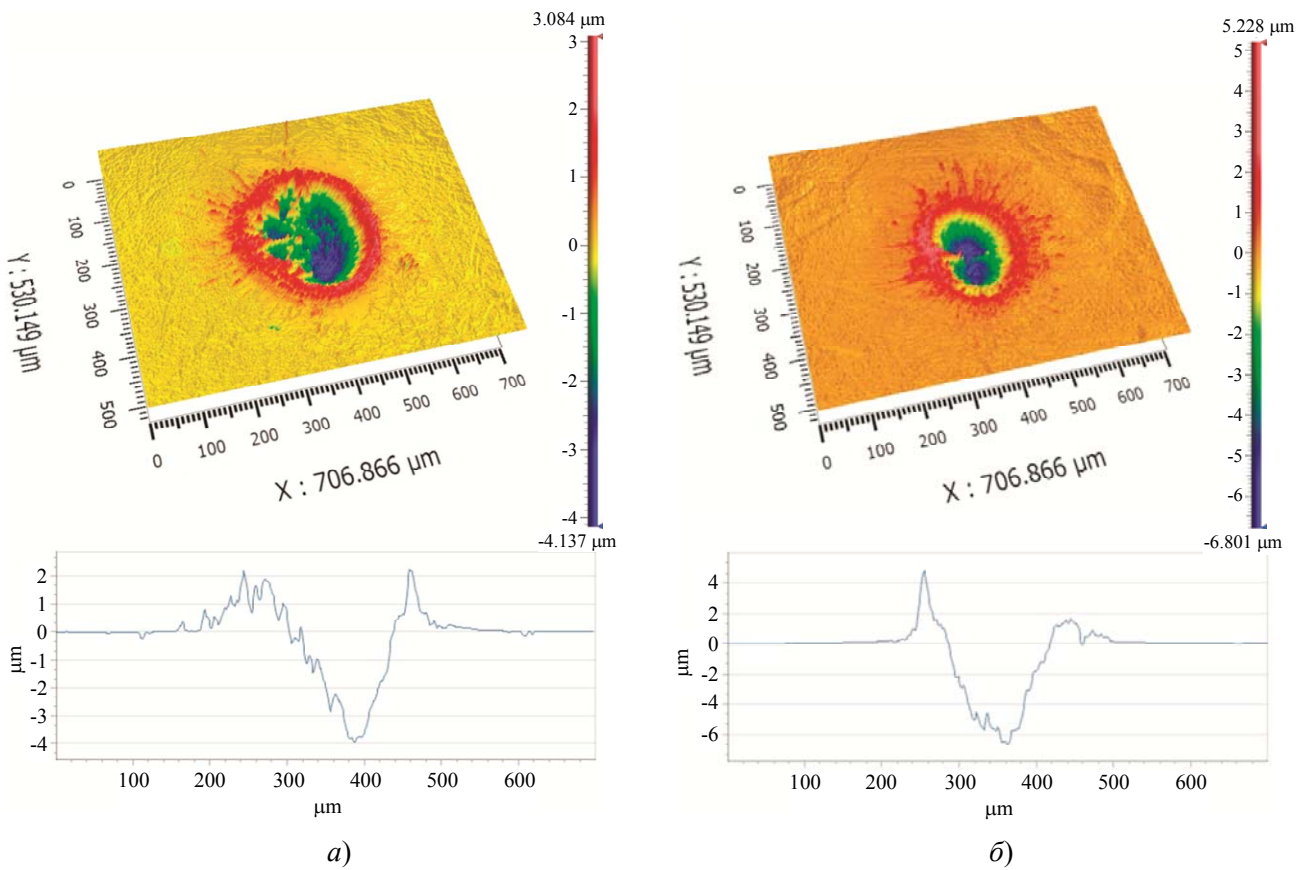


Рис. 2. Данные профилометрии (профилограмма и центральное сечение) поверхности бескислородной меди, обработанной в воздухе бихроматическими импульсами с  $W \sim 200$  Дж/см<sup>2</sup>: а)  $\lambda = 355 + 532$  нм; б)  $\lambda = 532 + 355$  нм

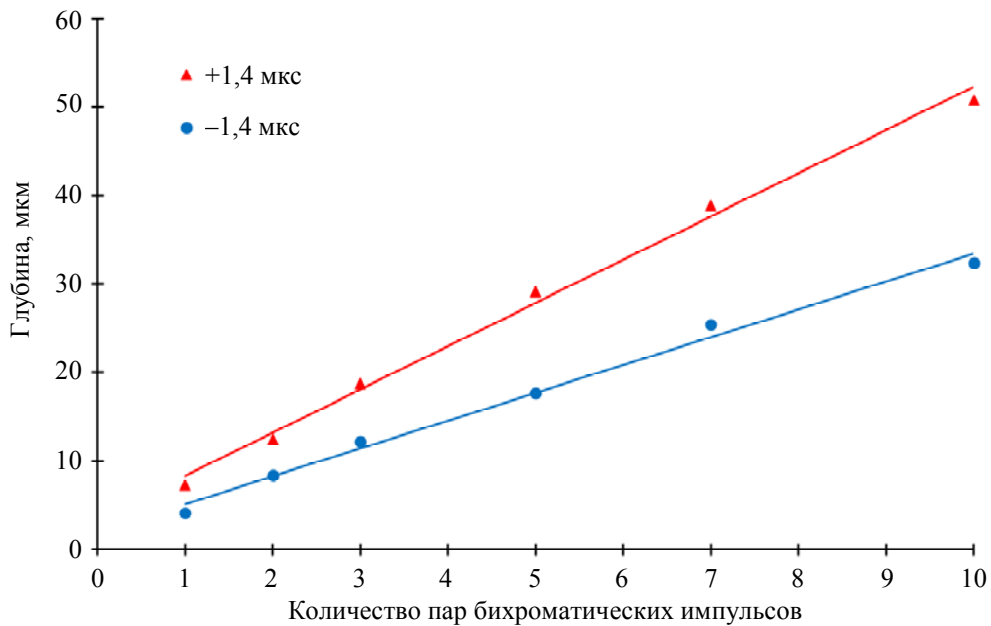


Рис. 3. Графики зависимости глубины кратера, полученного после лазерного воздействия, от количества лазерных импульсов при различной последовательности длин волн и времени задержки между ними ( $W \sim 200$  Дж/см<sup>2</sup>).  $\Delta\tau = -1,4$  мкс соответствует случаю  $\lambda = 355 + 532$  нм;  $\Delta\tau = +1,4$  мкс соответствует случаю  $\lambda = 532 + 355$  нм

### Заключение

В работе исследовано воздействие двойных бихроматических наносекундных лазерных импульсов с длинами волн 355 нм и 532 нм на полированную поверхность бескислородной меди. В абляционном режиме при повышенных плотностях энергии (около 200 Дж/см<sup>2</sup>) с помощью видеокамеры на основе ПЗС матрицы были выявлены некоторые различия в формировании факела лазерной плазмы: при опережающем действии импульсов с  $\lambda = 355$  нм факел приповерхностной плазмы имел вертикально вытянутую форму, тогда как при опережающем действии импульсов с  $\lambda = 532$  нм динамика факела изменялась в более широком диапазоне.

В результате экспериментов с разным количеством двойных бихроматических наносекундных импульсов, отличающихся порядком их следования, установлено, что опережающее действие лазерных импульсов с длиной волны излучения 532 нм обеспечивает образование заметно большей глубины кратеров на образцах бескислородной меди, чем опережающее действие лазерных импульсов с длиной волны 355 нм. Выявление такого эффекта способствует выбору оптимального режима обработки материалов двойными бихроматическими импульсами, а в дальнейшем позволит получить фундаментальные результаты в области формирования лазерной плазмы.

*Работа была выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (FFGR-2025-0001), а также Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Конвергенция-2025» (задание 2.2.02).*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Прохоров А. М., Конов В. И., Урсу И., Михэйлеску И. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. – М.: Наука, 1988.
2. Анисимов С. И., Лукьянчук Б. С. / УФН. 2002. Т. 172. № 3. С. 301–333.
3. Григорьянц А. Г., Мистюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
4. Минько Л. Я., Чумаков А. Н., Босак Н. А. / Квант. электрон. 1990. Т. 17. № 11. С. 1480–1484.
5. Sattmann R., Sturm V., Noll R. / J. Phys. D: Appl. Phys. 1995. Vol. 28. P. 2181–2187.
6. Горный С. Г., Григорьев А. М., Патров М. И., Соловьев В. Д., Туричин Г. А. / Квант. электрон. 2002. Т. 32. № 10. С. 929–932.
7. Климентов С. М., Пивоваров П. А., Конов В. И., Брайтлинг Д., Даусингер Ф. / Квант. электрон. 2004. Т. 34. № 6. С. 537–540.
8. Перишин С. М. / Квант. электрон. 2009. Т. 39. № 1. С. 63–67.
9. Минько Л. Я., Чумаков А. Н., Баканович Г. И. / Журн. прикл. спектр. 1994. Т. 61. № 5–6. С. 476–484.
10. Петух М. Л., Розанцев В. А., Широканов А. Д., Янковский А. А. / Журн. прикл. спектр. 2000. Т. 67. № 6. С. 798–801.
11. Noll R. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Fundamentals and Applications. – Berlin: Springer, 2012. P. 83–95.
12. Чумаков Н., Авраменко В. Б., Босак Н. А. / Журн. прикл. спектр. 2012. Т. 79. № 2. С. 279–287.
13. Cristoforetti G., Legnaioli S., Palleschi V., Salvetti A., Tognoni E. / Appl. Phys. B. 2005. Vol. 80. P. 559–568.
14. Ershov-Pavlov E. A., Katsalap K. Yu., Stepanov K. L., Stankevich Yu. A. / Spectrochimica Acta Part B. 2008. Vol. 63. P. 1024–1037.
15. Khalil A. A. / Laser Physics. 2010. Vol. 20. № 1. P. 238–244.
16. Piñon V., Anglos D. / Spectrochim. Acta Part B. 2009. Vol. 64. P. 950–960.
17. Amoruso S., Bruzzese R., Wang X., O'Connell G., Lunney J. G. / J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 113302.
18. Кремерс Д., Радziemски Л. Лазерно-искровая спектроскопия. – М.: Техносфера, 2009.
19. Чумаков А. Н., Босак Н. А., Панина А. В. / Журн. прикл. спектр. 2017. Т. 84. № 4. С. 595–602.
20. Chumakov N., Bosak N. A., Verenich P. I. / High Temp. Material Processes. 2014. Vol. 18. № 4. P. 269–272.
21. Чумаков А. Н., Лычковский В. В., Никончук И. С., Мацукович А. С. / Журн. техн. физики. 2022. Т. 92. № 1. С. 36–44.
22. Höhm S., Herzlieb M., Rosenfeld A., Krüger J., Bonse J. / Appl. Surf. Sci. 2016. Vol. 374. P. 331–338.
23. Bulgakov A. V., Sládek J., Hrabovský J., Mirza I., Marine W., Bulgakova N. M. / Appl. Surf. Sci. 2024. Vol. 643. P. 158626.
24. Николаев А. К., Костин С. А. Медь и жаропрочные медные сплавы. – М.: ДПК Пресс, 2012.
25. Рогалин В. Е. / Материаловедение. 2013. № 9. С. 34–42.
26. Рогалин В. Е., Крымский К. М. / Радиотехника и электроника. 2023. Т. 68. № 12. С. 1236–1246.
27. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Хомич Ю. В. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 6. С. 584–592.
28. Tunna L., Kearns A., O'Neill W., Sutcliffe C. J. / Optics & Laser Technology. 2001. Vol. 33. P. 135–143.
29. Khomich Yu. V., Mikolutskiy S. I. / Acta Astronautica. 2022. Vol. 194. P. 442–449.

30. Железнов В. Ю., Малинский Т. В., Миколуцкий С. И., Рогалин В. Е., Филлин С. А. / Прикладная физика. 2024. № 1. С. 38–42.

31. Tokarev V. N., Vasil'Yeva N. V., Cheshev E. A., Bezotosnyi V. V., Khomich V. Yu., Mikolutskiy S. I. / Laser Physics. 2015. Vol. 25. № 5. P. 056003.

32. Chumakov A., Lychkovskiy V., Nikonchuk I., Aniskevich V., Kuznechik O. / High Temperature Material Processes. 2025. Vol. 29. № 1. P. 9–14.

33. Luchkovskiy V., Chumakov A. Proceedings of the XV Belarusian-Serbian Symposium "Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas". – Minsk, Belarus, 2024. P. 59–62.

34. Соколов А. В. Оптические свойства металлов. – М.: Физматлит, 1961.

35. Breitling D., Schittenhelm H., Berger P., Dausinger F., Hügel H. / Appl. Phys. A. 1999. Vol. 69. P. S505–S508.

PACS 79.20.Eb, 52.38.Mf

## Ablation of oxygen-free copper by bichromatic nanosecond laser pulses in air

V. Yu. Zheleznov<sup>1</sup>, V. V. Lychkovskiy<sup>2</sup>, S. I. Mikolutskiy<sup>1,\*</sup>, V. E. Rogalin<sup>1</sup>, Yu. V. Khomich<sup>1</sup> and A. N. Chumakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute for Electrophysics and Electric Power RAS, St.-Petersburg, 191186 Russia

\*E-mail: mikolserg@mail.ru

<sup>2</sup>B. I. Stepanov Institute of Physics NASB, Minsk, 220072 Belarus

Received 2.04.2025; revised 23.04.2025; accepted 11.08.2025

**Features of plasma formation on the surface of oxygen-free copper under irradiation with double bichromatic (355 nm and 532 nm) nanosecond laser pulses with different time intervals and pulse sequences were revealed. Experiments were conducted with an increasing number of double bichromatic pulses and different pulse sequences at energy densities of about 200 J/cm<sup>2</sup> each pulse. An increased crater depth was established with the laser pulse sequence of 532 nm + 355 nm compared to the reverse sequence of pulses with wavelengths of 355 nm + 532 nm. The results of the work can be used to select the optimal mode of processing materials with double bichromatic pulses, as well as in further studying the features of laser plasma formation.**

**Keywords:** nanosecond laser; bichromatic pulses; ablation; air medium; plasma spectra.

### REFERENCES

1. Prokhorov A. M., Konov V. I., Ursu I. and Mihailescu I. Interaction of Laser Radiation with Metals. Moscow, Nauka, 1988 [in Russian].
2. Anisimov S. I. and Luk'yanchuk B. S., Phys.-Usp. **45** (3), 293–324 (2002).
3. Grigoryants A. G. and Misyurov A. I. Technological Processes of Laser Processing. Moscow, Bauman MSTU, 2006 [in Russian].
4. Minko L. Ya., Chumakov A. N. and Bosak N. A. Sov. J. Quantum Electron. **20** (11), 1389–1393 (1990).
5. Sattmann R., Sturm V. and Noll R., J. Phys. D: Appl. Phys. **28**, 2181–2187 (1995).
6. Gorny S. G., Grigoriev A. M., Patrov M. I., Solovyev V. D. and Turichin G. A., Quantum Electron. **32** (10), 929–932 (2002).
7. Klimentov S. M., Pivovarov P. A., Konov V. I., Breitling D. and Dausinger F., Quantum Electron. **34** (6), 537–540 (2004).
8. Pershin S. M., Quantum Electron. **39** (1), 63–67 (2009).
9. Minko L. Ya., Chumakov A. N. and Bakanovich G. I., J. Appl. Spectrosc. **61** (5–6), 805–811 (1994).
10. Petukh M. L., Rozantsev V. A., Shirokanov A. D. and Yankovsky A. A., J. Appl. Spectrosc. **67** (6), 1097–1101 (2000).
11. Noll R. Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. Fundamentals and Applications. Berlin, Springer, 2012, pp. 83–95.
12. Chumakov N., Avramenko V. B. and Bosak N. A., J. Appl. Spectrosc. **79** (2), 261–268 (2012).

13. Cristoforetti G., Legnaioli S., Palleschi V., Salvetti A. and Tognoni E., *Appl. Phys. B.* **80**, 559–568 (2005).
14. Ershov-Pavlov E. A., Katsalap K. Yu., Stepanov K. L. and Stankevich Yu. A., *Spectrochim. Acta Part B.* **63**, 1024–1037 (2008).
15. Khalil A. A. I., *Laser Physics.* **20** (1), 238–244 (2010).
16. Piñon V. and Anglos D., *Spectrochim. Acta Part B.* **64**, 950–960 (2009).
17. Amoroso S., Bruzzese R., Wang X., O'Connell G. and Lunney J. G., *J. Appl. Phys.* **108**, 113302 (2010).
18. Kremers D. and Radziemski L. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy.* Moscow, Tekhnosfera, 2009 [in Russian].
19. Chumakov A. N., Bosak N. A. and Panina A. V., *J. Appl. Spectrosc.* **84** (4), 620–626 (2017).
20. Chumakov N., Bosak N. A. and Verenich P. I., *High Temp. Mater. Process.* **18** (4), 269–272 (2014).
21. Chumakov A. N., Lychkovsky V. V., Nikonchuk I. S. and Matsukovich A. S., *J. Tech. Phys.* **67** (1), 16–24 (2022).
22. Höhm S., Herzlieb M., Rosenfeld A., Krüger J. and Bonse J., *Appl. Surf. Sci.* **374**, 331–338 (2016).
23. Bulgakov A. V., Sládek J., Hrabovský J., Mirza I., Marine W. and Bulgakova N. M., *Appl. Surf. Sci.* **643**, 158626 (2024).
24. Nikolaev A. K. and Kostin S. A. *Copper and Heat-Resistant Copper Alloys.* Moscow, DPK Press, 2012 [in Russian].
25. Rogalin V. E., *Materialovedenie* **9**, 34–42 (2013) [in Russian].
26. Rogalin V. E. and Krymskii K. M., *J. Commun. Technol. Electron.* **68**, 1464–1473 (2023).
27. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Mikolutskiy S. I. and Khomich Yu. V., *Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics)* **10** (6), 584–592 (2022) [in Russian].
28. Tunna L., Kearns A., O'Neill W. and Sutcliffe C. J., *Opt. Laser Technol.* **33**, 135–143 (2001).
29. Khomich Yu. V. and Mikolutskiy S. I., *Acta Astronaut.* **194**, 442–449 (2022).
30. Zheleznov V. Yu., Malinskiy T. V., Mikolutskiy S. I., Rogalin V. E. and Filin S. A., *Applied Physics*, № 1, 38–42 (2024) [in Russian].
31. Tokarev V. N., Vasil'Yeva N. V., Cheshev E. A., Bezotosnyi V. V., Khomich V. Yu. and Mikolutskiy S. I., *Laser Physics* **25** (5), 056003 (2015).
32. Chumakov A., Lychkouski V., Nikonchuk I., Aniskevich V. and Kuznechik O., *High Temp. Mater. Process.* **29** (1), 9–14 (2025).
33. Luchkovsky V. and Chumakov A. *Proc. XV Belarusian-Serbian Symp. "Physics and Diagnostics of Laboratory and Astrophysical Plasmas".* Minsk, Belarus, 2024, pp. 59–62.
34. Sokolov A. V. *Optical Properties of Metals.* Moscow, Fizmatlit, 1961 [in Russian].
35. Breiiting D., Schittenhelm H., Berger P., Dausinger F. and Hügel H., *Appl. Phys. A.* **69**, S505–S508 (1999).

#### Об авторах

**Железнов Вячеслав Юрьевич**, научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18). E-mail: vyuzheleznov@ieeras.ru SPIN-код РИНЦ 9321-9395, Author ID 1091137

**Лычковский Вячеслав Валерьевич**, научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (220072, Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68-2). E-mail: v.luchkouski@dragon.bas-net.by SPIN-код РИНЦ 5483-3905, Author ID 1124904

**Миколуцкий Сергей Иванович**, к.ф.-м.н. ведущий научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18). E-mail: mikolserg@mail.ru SPIN-код РИНЦ 1699-7962, Author ID 631498

**Рогалин Владимир Ефимович**, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18). E-mail: v-rogalin@mail.ru SPIN-код РИНЦ 1644-1244, Author ID 177801

**Хомич Юрий Владиславович**, к.т.н., ведущий научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики РАН (191186, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, 18). E-mail: YKhomich@yandex.ru SPIN-код РИНЦ 5923-9035, Author ID 762787

**Чумаков Александр Никитич**, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, Институт физики им. Б. И. Степанова НАН Беларуси (220072, Беларусь, Минск, пр. Независимости, 68-2). E-mail: a.chumakov@dragon.bas-net.by SPIN-код РИНЦ 3991-6413, Author ID 743165