Особенности абляции германия бихроматическими наносекундными лазерными импульсами в воздушной и жидкой средах

© В.Е. Рогалин[1], В.Ю. Железнов[1], А.И. Иванова[2], И.А. Каплунов[2], В.В. Лычковский[3], С.И. Миколуцкий[1], Ю.В. Хомич[1], А.Н. Чумаков[3]

[1] Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук,
191181 Санкт-Петербург, Россия
[2] Тверской государственный университет,
170100 Тверь, Россия
[3] Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси,
220072 Минск, Беларусь

E-mail: v-rogalin@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.
В окончательной редакции 28 июля 2026 г.
Принята к публикации 12 августа 2026 г

Исследовано воздействие сдвоенных наносекундных лазерных импульсов с длинами волн 532 и 355 нм на поверхность монокристаллического германия в воздушной и водной средах. Выявлены зависимости глубины кратера от временно́го интервала и порядка следования бихроматических импульсов. Проведена обработка германия сдвоенными лазерными импульсами в водной среде в режиме сканирования. Получена пористая структура с размером пор от 0.5 до 1.5 мкм при бихроматическом воздействии в воде. Установлено, что в этом случае поры в германии более равномерно распределены и преимущественно имеют несколько меньший размер, чем в случае воздействия монохромными импульсами.

Ключевые слова: наносекундный лазер, бихроматические импульсы, монокристаллический германий, пористая структура, водная среда.

DOI: 10.61011/FTP.2026.10.64212.9786

1. Введение

В XXI веке вырос интерес к разнообразным пористым материалам, в частности пористый германий (Ge) применяют при изготовлении полупроводниковых слоев в приборах и интегральных схемах, фотоприемниках, сенсорах изображений, солнечных элементах, электродов для аккумуляторных литиевых батарей и электрохимических конденсаторов [1–4]. В работе [5] был продемонстрирован лазерный метод получения пор на поверхности Ge для интенсификации процессов диффузионной сварки. В данной работе для обработки монокристаллического Ge предлагается исследовать воздействие наносекундных бихроматических лазерных импульсов УФ и видимого диапазонов [6,7].

Двухимпульсное лазерное воздействие известно достаточно давно [8–10] и остается востребованным в настоящее время [11,12], но бóльшая часть экспериментов проводилась в воздушной среде. Следует учесть, что бихроматическое излучение, существенно отличающееся от монохроматического, используется сравнительно недавно [6,7,13], а при воздействии на германий — впервые. В работе [6] получен синергетический эффект воздействия сдвоенных импульсов лазерного излучения (ЛИ) на поверхность бескислородной меди в воздухе. Однако и в водной среде двойные импульсы нашли применение в широком спектре задач: наноструктурирование графита [14], исследование абляции кремния для получения наночастиц наносекундными импульсами с различной задержкой между импульсами (от 5 до 20 нс) на длине волны 1064 нм [15]. Несмотря на множество экспериментальных исследований лазерной абляции [16–20], эти процессы все еще недостаточно изучены, особенно в условиях двухимпульсного воздействия на полупроводники в водной среде.

Цель данной работы состояла в выявлении особенностей воздействия сдвоенных наносекундных лазерных импульсов с длинами волн излучения $\lambda = 532$ и 355 нм на поверхность Ge в атмосферном воздухе и в водной среде. Особое внимание было обращено на получение заранее заданных локальных участков пористой структуры на поверхности монокристалла Ge при воздействии наносекундными бихроматическими импульсами Nd:YAG-лазера в водной среде при различных задержках между импульсами.

2. Экспериментальная установка и методы исследований

В экспериментах по лазерной модификации поверхности образцов использовалась лабораторная установка, созданная на основе двух Nd:YAG-лазеров LH-2132 и LH-2137 (ООО „ЛОТИС ТИИ“, Минск) с системой синхронизации, обеспечивающей генерацию парных наносекундных импульсов ЛИ с $\lambda = 355$ и 532 нм и длительностью 18 и 15 нс соответственно с возможно-

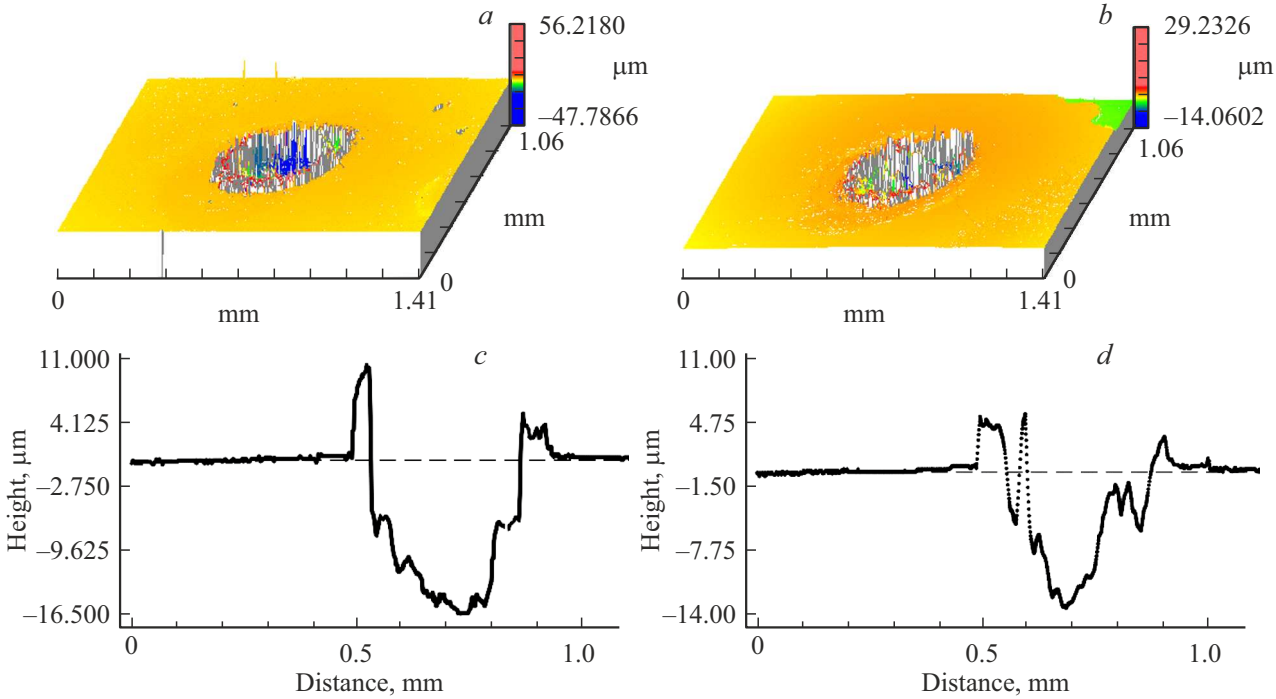

Рис. 1. Данные профилометрии поверхности Ge после воздействия 5 парами бихроматических импульсов с $\lambda = 355$ и 532 нм (плотности энергии $E_{355} \sim 54$ Дж/см^2 и $E_{532} \sim 46$ Дж/см^2): трехмерное изображение при $\Delta\tau = -1.4$ мкс (a) и $\Delta\tau = +1.4$ мкс (b); двумерный профиль при $\Delta\tau = -1.4$ мкс (c) и $\Delta\tau = +1.4$ мкс (d) (отрицательное значение интервала соответствует опережающему воздействию импульсов 355 нм).

стью регулировки временно́го интервала между ними и порядка их следования [13].

Оптическая схема эксперимента была аналогична приведенной в работе [7], но вместо меди лазерному воздействию подвергался монокристалл германия диаметром 30 мм и толщиной 2 мм, марки ГМО n-типа с удельным электрическим сопротивлением ~ 5 Ом $\cdot$ см, легированный сурьмой до концентрации $\sim 3 \cdot 10^{14}$ см^3. Оптические поверхности были обработаны химико-механическим методом [21]. Они соответствовали кристаллографическим плоскостям {111} (точность $< 10'$). Исходная средняя шероховатость поверхности R_a составляла 20 нм.

Образец размещался в прозрачной кювете с деионизованной водой и крепился к дну клейкой лентой. Уровень воды над поверхностью Ge составлял 10 мм. Образец облучался в режиме одновременного воздействия двумя бихроматическими импульсами, при пяти различных временны́х задержках между ними ($\Delta t \sim \pm 1.4$, ± 4, ± 6, ± 8, ± 10 мкс). Отрицательное значение соответствует опережающему действию лазерных импульсов с длиной волны 355 нм, положительное — 532 нм. Микросекундный диапазон задержек выбран на основе экспериментов из работы [13], проводившихся в воздухе. Этот уровень согласован с временем удаления экранирующего слоя лазерной плазмы от мишени и ослабления его влияния на воздействие последующих импульсов ЛИ.

Форма временно́го профиля импульсов лазерного излучения регистрировалась фотоприемником 11HSP-V2 (Standa) на осциллографе Teledyne Lecroy Wave Surfer 510R с полосой пропускания 1 ГГц. Энергия лазерных импульсов контролировалась прибором Ophir с измерительной головкой PE25BF-DIF-V2 ROHS и измерителем энергии Vega. С помощью спектроделителя излучение обоих лазеров формировалось в один соосный пучок, который фокусировался ахроматическим объективом ($f = 104$ мм) на поверхности мишени в лазерное пятно диаметром ~ 190 мкм (по полувысоте). Плотность мощности каждого импульса ЛИ составляла ~ 3 ГВт/см^2 при различных плотностях энергии в 54 Дж/см^2 (355 нм) и 46 Дж/см^2 (532 нм). Режим сканирования осуществлялся с помощью двукоординатной моторизованной платформы. Далее рельеф поверхности анализировался с помощью оптического профилометра NewView 7300 и сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) JEOL JSM 6610LV.

3. Результаты эксперимента и обсуждение

В случае бихроматического лазерного воздействия на монокристаллический Ge в воздушной среде при указанных выше плотностях энергии образовывался кратер со следами оплавления материала в центре и выноса его за пределы пятна. На рис. 1 представлены наиболее характерные профилограммы лазерных кратеров для

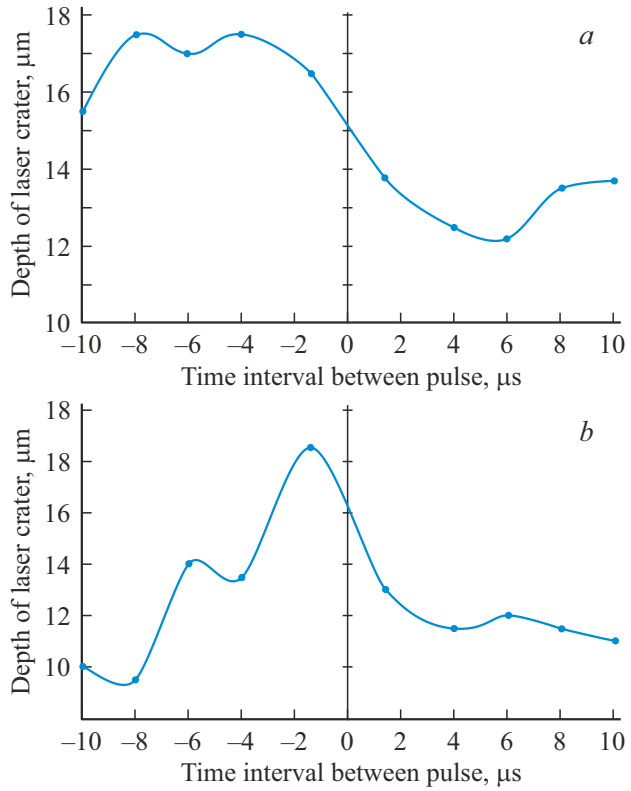

Рис. 2. Зависимость глубины кратера на поверхности Ge от временно́го интервала и порядка следования бихроматических импульсов с $\lambda = 355$ и 532 нм (плотности энергии $E_{355} \sim 54$ Дж/см^2 и $E_{532} \sim 46$ Дж/см^2) при воздействии пятью парами импульсов: *a* — в воздухе, *b* — в воде.

режимов воздействия пятью парами бихроматических лазерных импульсов с временны́ми интервалами между импульсами $\Delta\tau = \pm 1.4$ мкс.

Из профилограмм на рис. 1, *c* и *d* видно, что глубина кратера при равном количестве пар импульсов больше при опережающем действии импульса с $\lambda = 355$ нм, это связано с большим поглощением излучения германием на этой длине волны. Стоит отметить, что максимальная глубина кратеров наблюдается при отрицательном временно́м интервале для всех исследованных в данной работе задержек (см. рис. 2, *a*). Например, при 5 парах импульсов глубина достигает 17.5 мкм, что глубже почти на 30 %, чем при воздействии в режиме 532 + 355 нм, где глубина кратера составляла 13.8 мкм (рис. 2, *a*).

В водной среде появляется два дополнительных фактора воздействия. Это — ускоренный теплоотвод с нагретой поверхности за счет контакта с водой и резко увеличивающийся импульс давления лазерной плазмы. В бихроматическом режиме эти процессы заметно зависят от интервала между импульсами. При этом следует учесть, что максимальные амплитуды импульсов давления на воздухе и в воде могут различаться в несколько раз [19,20].

В случае воздействия на Ge одиночной пары бихроматических импульсов в воде наблюдалось оплавление поверхности с образованием микроджетов — округлых структур, связанных с выбросом расплавленного материала и его быстрым застыванием [7,16]. При этом также образуются поры микрометрового масштаба. При увеличении числа пар бихроматических импульсов ЛИ до пяти проявляется дальнейшее развитие порообразования на поверхности.

На рис. 2, *b* представлен график зависимости глубины кратера на поверхности Ge от временно́го интервала и порядка следования пяти бихроматических импульсов при воздействии в водной среде. В отличие от графика на рис. 2, *a* здесь наблюдается отчетливый максимум при временно́м интервале $\Delta\tau = -1.4$ мкс. Воздействие ЛИ на германий в водной среде с целью получения пористой поверхности сравнительно новое направление, а работа в бихроматическом режиме — поисковая, стартовая. Из рис. 2, *b* видно, что в дальнейшем следует рассмотреть меньшие временны́е интервалы.

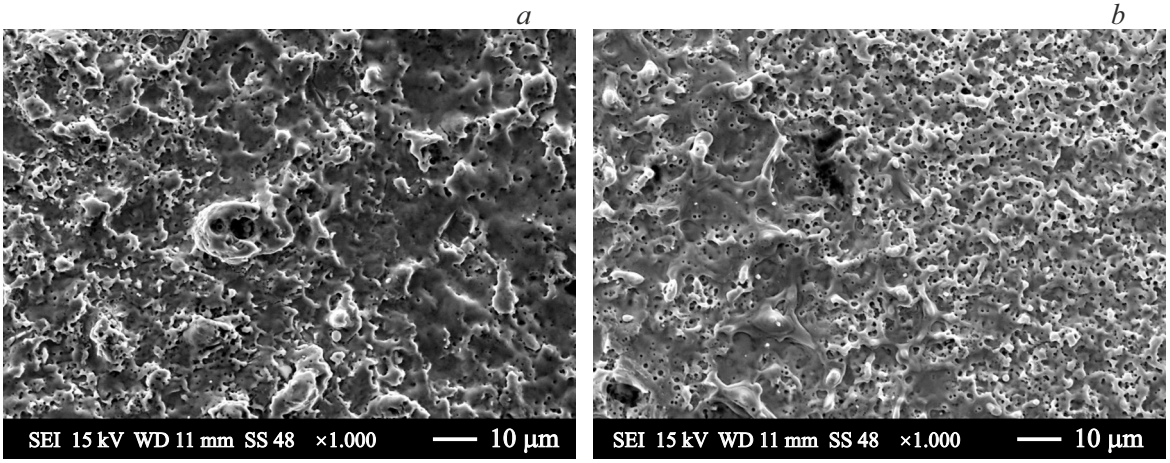

Рис. 3. СЭМ-изображения поверхности Ge после лазерного сканирования в водной среде со скоростью 400 мкм/с, частотой 1 Гц, в бихроматическом режиме с интервалами между импульсами: *a* — +1.4 мкс, *b* — −1.4 мкс.

Очевидно, что режим сканирования позволяет осуществить воздействие несколькими парами бихроматических импульсов на единицу площади, а также сгладить микрорельеф в области облучения. Для получения пористой поверхности Ge был использован режим лазерного сканирования со скоростью 400 мкм/с, частотой следования импульсов 1 Гц и плотностью энергии в импульсах $E_{355} \sim 54$ Дж/см^2 и $E_{532} \sim 46$ Дж/см^2. Типичные СЭМ-изображения пористой структуры для временны́х интервалов ± 1.4 мкс показаны на рис. 3.

При сканировании во всех случаях получена кораллообразная структура с микропорами по всей ее поверхности. Их размер составлял от 0.5 до 1.5 мкм, что несколько меньше, чем в случае воздействия монохроматическим импульсом с $\lambda = 1064$ нм [5]. Следует отметить, что в работе [5] энергия в импульсе достигала 0.6 Дж, а в случае бихроматического воздействия — 16 и 13.4 мДж для импульсов с $\lambda = 355$ и 532 нм соответственно. Однако при воздействии одной пары бихроматических импульсов глубина кратера достигает ~ 4 мкм, как и при воздействии одиночного ИК импульса.

Также, исходя из полученных с помощью СЭМ экспериментальных данных, сделано предположение, что в случае опережающего воздействия длины волны 355 нм пространственная плотность пор выше и более равномерно распределена.

4. Заключение

В работе исследовано воздействие наносекундных бихроматических импульсов с длинами волн ЛИ 532 и 355 нм на поверхность монокристаллического германия в воздушной и водной средах. При воздействии в воздушной среде выявлены зависимости глубины кратера от временны́х интервалов между импульсами и порядка их следования. Показано, что при опережающем следовании импульса с длиной волны излучения 355 нм наблюдается максимальная глубина кратеров для всех исследуемых задержек. Данный режим можно использовать при обработке германия, требующей интенсивного удаления материала, например пробивание (сверление) микроотверстий.

При обработке монокристаллического германия бихроматическими импульсами ЛИ в водной среде исследована структура пятен в зависимости от временно́го интервала между ними. Для сглаживания микрорельефа после абляционного кратерообразования и формирования пористого слоя проведена обработка германия сдвоенными бихроматическими импульсами в водной среде в режиме сканирования. Поверхностная структура с размером пор от 0.5 до 1.5 мкм получена как при опережающем действии УФ импульса (355 нм), так и при лидирующем импульсе видимого диапазона (532 нм). Выявлено, что при бихроматическом воздействии в воде поры в германии более равномерно распределены и преимущественно имеют несколько меньший размер, чем при воздействии монохромными импульсами.

Финансирование работы

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда № 24-19-00727 (https://rscf.ru/project/24-19-00727/), с использованием ресурсов ЦКП ТвГУ, а также государственной программы научных исследований Республики Беларусь „Конвергенция-2030“ (задание 2.2.07).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] М.А. Бисенова, Р.Е. Бейсенов, А.Л. Мереке, Е.Е. Бейсенова. Горение и Плазмохимия, **19** (1), 43 (2021). DOI: 10.18321/cpc409
[2] K. Mishra, X.C. Liu, F.S. Ke, X.D. Zhou. Compos. Part B: Eng., **163**, 158 (2019). DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.10.076
[3] А.Л. Степанов, А.М. Рогов, В.И. Нуждин, В.Ф. Валеев. Патент РФ № 2734458 C1 (2020).
[4] L. Zhang, A.M. Agarwal, L.C. Kimerling, J. Michel. Nanophotonics, **3** (4–5), 247 (2014). DOI: 10.1515/nanoph-2013-0020
[5] В.Е. Рогалин, В.Ю. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий, С.А. Филин, Ю.В. Хомич, А.А. Сергеев, С.В. Ивакин, И.А. Каплунов, А.И. Иванова, М.С. Андреева. ФТТ, **67** (12), 2412 (2025). DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62438.8061k-25
[6] В.Ю. Железнов, В.В. Лычковский, С.И. Миколуцкий, В.Е. Рогалин, Ю.В. Хомич, А.Н. Чумаков, В.А. Ямщиков. Докл. РАН. Физика, техн. науки, **523** (1), 7 (2025). DOI: 10.7868/S3034508125040022
[7] Yu.V. Khomich, S.I. Mikolutskiy, V.E. Rogalin, V.Yu. Zheleznov, V.V. Lychkouski, A.N. Chumakov, E.V. Shakhmatov. Acta Astronaut., **239**, 484 (2026). DOI: 10.1016/j.actaastro.2025.11.003
[8] L.Ya. Min'ko, A.N. Chumakou, N.A. Bosak. Sov. J. Quant. Electron., **20** (11), 1389 (1990). DOI: 10.1070/QE1990v020n11ABEH007540
[9] S.M. Pershin. Sov. J. Quant. Electron., **19** (2), 215 (1989). DOI: 10.1070/QE1989v019n02ABEH007806
[10] V.N. Lednev, M.N. Filippov, A.F. Bunkin, S.M. Pershin. Laser Phys. Lett., **12** (12), 126001 (2015). DOI: 10.1088/1612-2011/12/12/126001
[11] J.C. Crowhurst, S. Ly, B. Koroglu, W.J. Keller. Opt. Express, **32** (5), 7053 (2024). DOI: 10.1364/OE.513511
[12] К.Ф. Зноско, С.Д. Лещик. Вестн. Гродн. гос. ун-та им. Янки Купалы. Сер. 6, Техника, **11** (1), 45 (2021).
[13] А.Н. Чумаков, В.В. Лычковский, И.С. Никончук, А.С. Мацукович. ЖТФ, **92** (1), 36 (2022). DOI: 10.21883/JTF.2022.01.51849.202-21
[14] A. De Giacomo, A. De Bonis, M. Dell'Aglio, O. De Pascale, R. Gaudiuso, S. Orlando, A. Santagata, G.S. Senesi, F. Taccogna, R. Teghil. J. Phys. Chem. C, **115** (12), 5123 (2011). DOI: 10.1021/jp109389c

[15] A. Momeni, M.H. Mahdieh. Laser Phys. Lett., **12** (7), 076102 (2015). DOI: 10.1088/1612-2011/12/7/076102
[16] S.I. Ashitkov, S.A. Romashevskii, P.S. Komarov, A.A. Burmistrov, V.V. Zhakhovskii, N.A. Inogamov, M.B. Agranat. Quant. Electron., **45** (6), 547 (2015). DOI: 10.1070/QE2015v045n06ABEH015771
[17] F. Weisbuch, V.N. Tokarev, S. Lazare, C. Belin, J.L. Bruneel. Appl. Phys. A, **75**, 677 (2002). DOI: 10.1007/s00339-002-1454-0
[18] A.P. Pogoda, A.A. Sergeev, I.S. Khakhalin, E.E. Popov, N.L. Istomina, A.S. Boreisho, V.M. Petrov. Quant. Electron., **50** (7), 658 (2020). DOI: 10.1070/QEL17297
[19] S.I. Kudryashov, A.A. Samokhvalov, Y.D. Golubev, D.S. Ivanov, M.E. Garcia, V.P. Veiko, B. Rethfeld, V.Yu. Mikhailovskii. Appl. Surf. Sci., **537**, 147940 (2021). DOI: 10.1016/j.apsusc.2020.147940
[20] S.I. Kudryashov, A.A. Samokhvalov, E.I. Ageev, A.A. Petrov, V.P. Veiko. Int. J. Heat Mass Transfer, **127**, 1095 (2018). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.104
[21] В.Ф. Пахомов, Н.Г. Потоскаева, В.Е. Рогалин, М.Ю. Турский. А.с. СССР № 1127475 (1984).

Редактор А.Н. Смирнов

Features of germanium ablation by bichromatic nanosecond laser pulses in air and liquid media

V.E. Rogalin[1], V.Yu. Zheleznov[1], A.I. Ivanova[2], I.A. Kaplunov[2], V.V. Lychkouski[3], S.I. Mikolutskiy[1], Yu.V. Khomich[1], A.N. Chumakov[3]

[1] Institute for Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, 191181 St. Petersburg, Russia
[2] Tver State University, 170100 Tver, Russia
[3] B.I. Stepanov Institute of Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, 220072 Minsk, Belarus

Abstract The effect of dual nanosecond laser pulses with wavelengths of 532 nm and 355 nm on the surface of single-crystal germanium in air and water was studied. The dependence of crater depth on the number of pairs of bichromatic pulses for various time intervals between pulses and their sequence orders was determined. Germanium was processed with double laser pulses in an aqueous medium in scanning mode. A porous structure with a pore size of 0.5 to 1.5 μm was obtained under bichromatic irradiation in water. It has been determined that, in this case, the pores in the germanium were more uniformly distributed and predominantly slightly smaller than those irradiated with monochromatic pulses.