

Воздействие излучения фемтосекундного лазера на оптическую поверхность германия

© И.А. Каплунов¹, С.А. Третьяков¹, А.И. Иванова¹, А.Д. Васильев¹, К.Б. Юшков², В.Е. Роголин³

¹ Тверской государственный университет,
170100 Тверь, Россия

² Национальный исследовательский технологический университет „МИСиС“,
119049 Москва, Россия

³ Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук,
191181 Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kaplunov.ia@mail.ru

Поступила в Редакцию 5 мая 2026 г.

В окончательной редакции 26 июня 2026 г.

Принята к публикации 3 июля 2026 г.

Исследовано воздействие высокоинтенсивного частотно-импульсного излучения фемтосекундного лазера с длиной волны 1030 нм на поверхности (100), (110) и (111) монокристаллов германия. Выявлены особенности образующегося рельефа поверхности и влияние кристаллографической ориентации поверхностей в зависимости от плотности мощности излучения и частоты следования импульсов.

Ключевые слова: германий, кристаллографическая ориентация, фемтосекундный лазер, абляция, модификация поверхности.

DOI: 10.61011/FTP.2026.05.63874.9399

1. Введение

Фемтосекундные лазеры уже стали активно применяемым инструментом для разнообразной обработки материалов [1–3] и широко применяются не только в научных исследованиях, но и в производстве высокотехнологичных изделий. Их достоинством является не только высокая мощность импульсного излучения, применяемого для модификации поверхностей металлов, полупроводников и диэлектриков, а также целого ряда других применений. Малая длительность импульса позволяет минимизировать зону термического влияния, что особенно важно при обработке полупроводниковых изделий, в частности при резке. Возможность фокусировки фемтосекундных лазерных импульсов в объеме прозрачных оптических материалов делает возможным трехмерную (3D) микро- и нанообработку [4]. Фемтосекундные технологии также позволяют решать задачи поверхностной модификации непрозрачных материалов, где также проявляются особенности такого взаимодействия.

Монокристаллический германий — это первый материал, на основе которого впервые были изготовлены полупроводниковые микросхемы. Также оказалось, что Ge обладает и уникальными оптическими свойствами в ИК области спектра [5]. Несмотря на высокую стоимость Ge, этот материал крайне востребован в разнообразных высокотехнологичных применениях.

Данная работа посвящена исследованию особенностей взаимодействия частотно-импульсного излучения фемтосекундного лазера с кристаллографическими поверхностями (100), (110) и (111) монокристаллического германия. В работе [6] изучалось формирование микро- и наноструктур на кремнии с помощью фемтосекундного

лазерного излучения с длиной волны 744 нм (длительностью импульса 100 фс) и 248 нм (60 фс). Установлена зависимость формирования кратеров и растущих микроконусов на поверхности кремния от длины волны лазерного излучения, длительности воздействия, числа импульсов и состояния поверхности.

Создание структурированного рельефа на поверхности монокристаллического германия позволит уменьшить коэффициент отражения и увеличить эффективность фотоэлектронных преобразователей на его основе; модификация поверхности может быть использована для проведения технологических операций на поверхности оптических элементов [5]. С учетом развития промышленных применений фемтосекундных лазерных систем рассмотрение влияния характеристик излучения на параметры модификации поверхности германия является актуальной исследовательской задачей.

2. Образцы и методика исследований

Образцы германия для исследований изготовлены из монокристалла, выращенного методом Чохральского, легированного сурьмой (удельное сопротивление 25–30 Ом·см), и плотностью дислокаций $(0.5–1.0) \cdot 10^4 \text{ см}^{-2}$. Образцы представляли собой прямоугольные параллелепипеды со сторонами $10 \times 10 \times 5 \text{ мм}$. Были изготовлены образцы с разной кристаллографической ориентацией, полированная плоскость $10 \times 10 \text{ мм}$ на разных образцах соответствовала трем плоскостям: (100), (110) и (111).

Для экспериментов по исследованию влияния высокоинтенсивного излучения на поверхности монокристал-

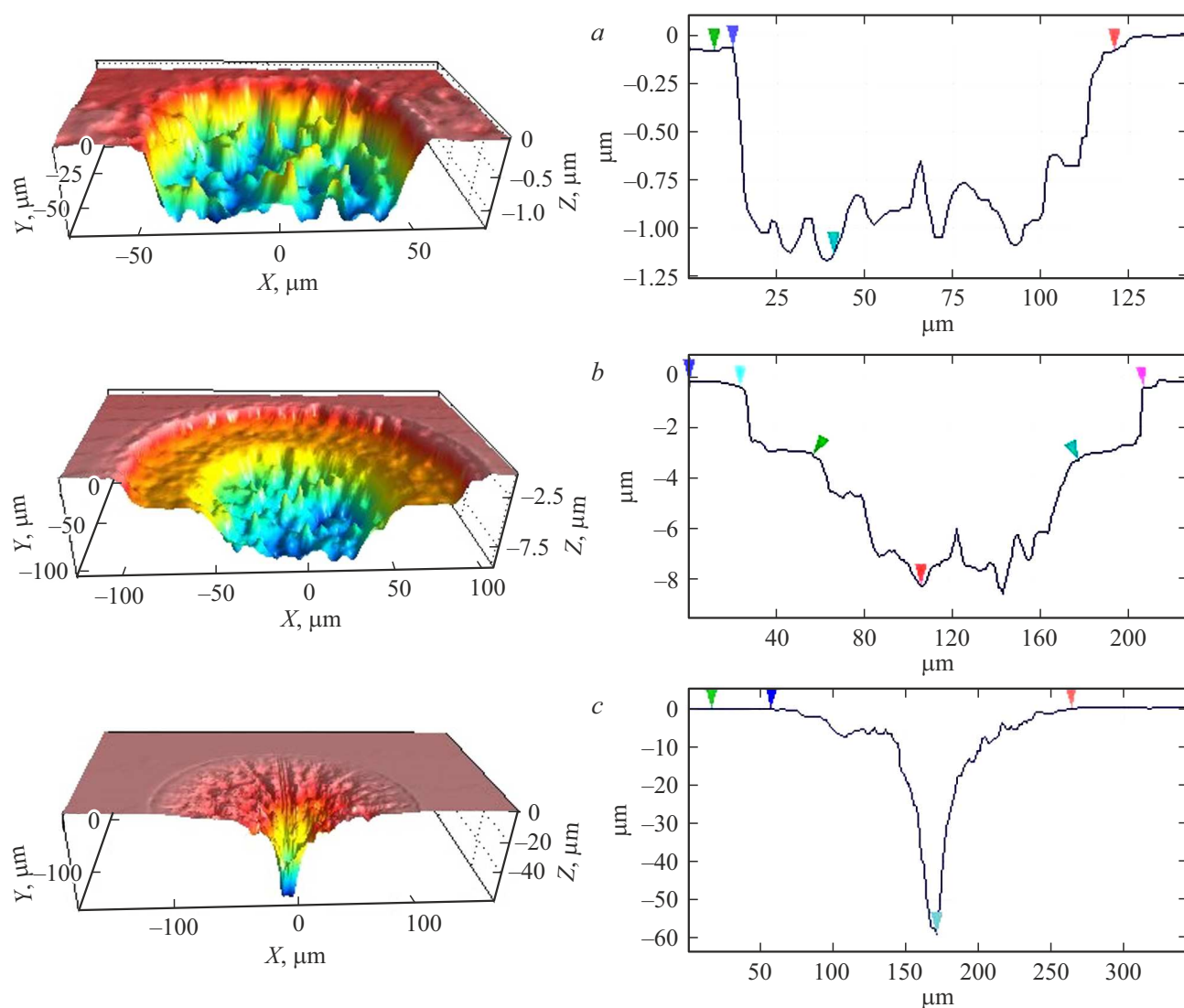


Рис. 1. 3D и 2D профили кратеров на поверхности монокристаллов германия с кристаллографической ориентацией поверхности (100). Количество импульсов: *a* — 10, *b* — 2000, *c* — 10 000.

лов германия использовался оптоволоконный лазер с длиной волны 1030 нм ($\sigma = 330$ фс) с возможностью регулировки мощности и частоты следования импульсов. Параметры излучения при эксперименте: частота повторения импульсов — 100 кГц, средняя мощность — 5 Вт, пиковая мощность — 152 МВт, плоскость поляризации — вертикальная. Фокусировка пучка на поверхности образца осуществлялась линзой с фокусным расстоянием 300 мм, обеспечивающей диаметр пучка в перетяжке 310 мкм по уровню $1/e^2$ интенсивности.

3. Результаты и обсуждение

На образцы воздействовали излучением в разных областях (количество точек воздействия составляло 8) с изменением количества импульсов на точку; режимы воздействия приведены в табл. 1. На рис. 1, 2

представлены результаты исследований областей воздействия на профилометре (NanoMap 1000WLI) и на растровом электронном микроскопе (РЭМ; JEOL JSM 6610LV). Были получены большие массивы данных (на данные три образца 48 точек с различным увеличением и фокусировкой порядка 650 файлов), в статье приведены частные и усредненные результаты измерений, рисунки приведены для плоскости с кристаллографической ориентацией (100), подвергнутой лазерному воздействию. Профилометрические и электронно-микроскопические (РЭМ) исследования следов воздействия импульсного лазерного излучения на образцы разной кристаллографической ориентации выявили ряд закономерностей. Профилометрические исследования, включающие анализ поверхности с помощью специализированного программного обеспечения Gwyddion, позволили получить усредненные данные по геометрии

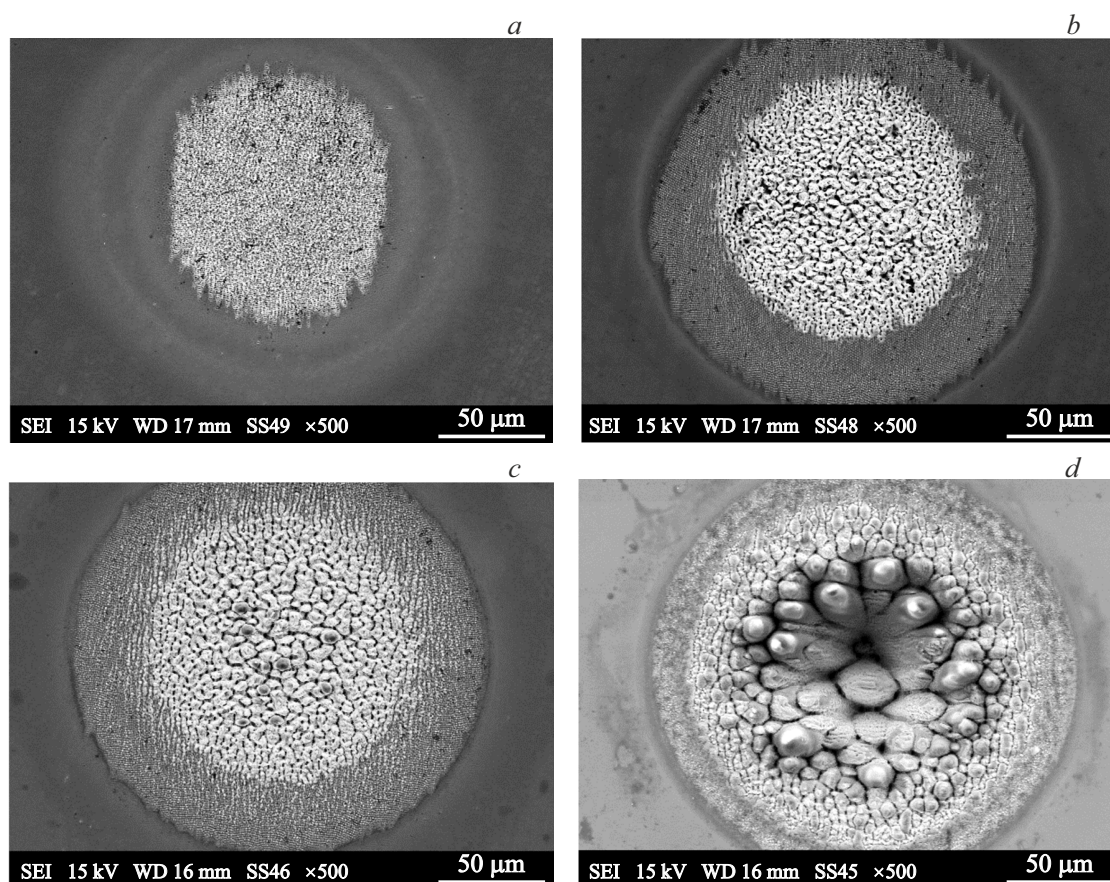


Рис. 2. РЭМ-изображения кратеров на поверхности монокристаллов германия с кристаллографической ориентацией поверхности (100). Количество импульсов: *a* — 10, *b* — 300, *c* — 2000, *d* — 10 000.

Таблица 1. Параметры лазерного излучения

№ точки	Время воздействия, мс	Количество импульсов	Суммарная энергия, мДж
1	0.1	10	0.5
2	1	100	5
3	3	300	15
4	5	500	25
5	7	700	35
6	10	1000	50
7	20	2000	100
8	100	10000	500

кратеров для разных кристаллографических направлений (табл. 2).

Выявлено, что поверхность, соответствующая плоскости (100), наиболее подвержена процессу разрушения; образующиеся кратеры на ней наиболее глубокие, а параметр шероховатости S_a поверхности дна кратера имеет величину больше, чем для других кристаллографических плоскостей. Диаметр кратеров при этом для всех кристаллографических ориентаций сопоставим друг с другом, так как он определяется абляционными

процессами, независимыми от кристаллографии. Механизм формирования кратеров включает в себя процесс образования зерен поликристаллической структуры в

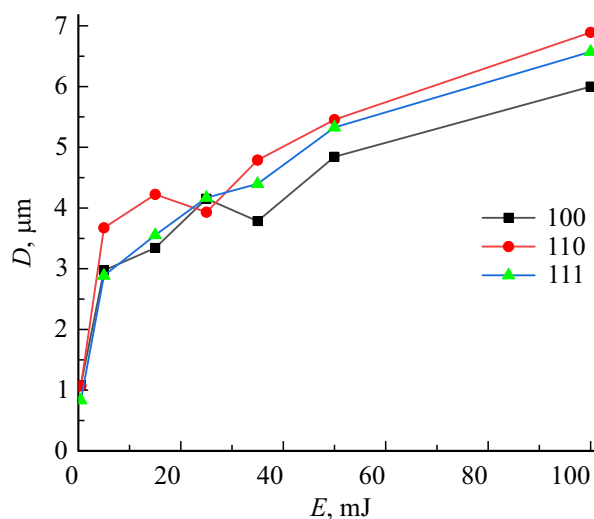


Рис. 3. Зависимость линейных размеров зерен, образовавшихся в результате воздействия фемтосекундного лазера, от суммарной энергии в пакете импульсов.

Таблица 2. Геометрические параметры кратеров на поверхности монокристаллов германия

Кристаллографическая ориентация плоскости воздействия	(100)	(110)	(111)
10 импульсов, 0.1 мс, 0.5 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	1.12	0.53(0.76)*	0,43(0.63)
Диаметр кратера у поверхности, мкм	100	102	105
Sa поверхности кратера, мкм	0.121	0.082	0,053
100 импульсов, 1 мс, 5 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	3.12(1.92)	2.02(0.36)	2.53(0.42)
Ширина кратера у поверхности, мкм	123	123	120
Sa поверхности кратера, мкм	0.423	0.165	0.214
300 импульсов, 3 мс, 15 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	4.31(2.1)	3.11	3.18(1.05)
Ширина кратера у поверхности, мкм	115	113	123
Sa поверхности кратера, мкм	0.930	0.341	0.641
500 импульсов, 5 мс, 25 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	4.20(2.21)	3.36	2.52(1.21)
Ширина кратера у поверхности, мкм	116	135	118
Sa поверхности кратера, мкм	0.821	0.581	1.086
700 импульсов, 7 мс, 35 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	4.21(2.31)	3.67(1.84)	4.46
Ширина кратера у поверхности, мкм	108	137	109
Sa поверхности кратера, мкм	0.795	0.449	0.641
1000 импульсов, 10 мс, 50 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	4.60(1.61)	3.83(2.15)	3.40(2.17)
Ширина кратера у поверхности, мкм	101	111	112
Sa поверхности кратера, мкм	0.819	0.780	1.149
2000 импульсов, 20 мс, 100 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	8.12	6.22(1.89)	6.52
Ширина кратера у поверхности, мкм	117	112	118
Sa поверхности кратера, мкм	0.861	1.386	0.869
10 000 импульсов, 100 мс, 500 мДж			
Средняя глубина кратера, мкм	63.86	51.52	61.13
Ширина кратера у поверхности, мкм	167	122	129
Sa поверхности кратера, мкм	5.028	5.426	7.525

Примечание. * Значения в скобках указывают глубину каналов.

приповерхностном слое германия в зоне воздействия, а также образование каналов в кратере, что фиксируется на 2D профилограммах и изображениях, полученных с помощью РЭМ. В зависимости от количества импульсов различаются диаметры кратеров, их глубина.

Зерна в кратерах образовались в процессе кристаллизации расплава, остывающего между импульсами, а также при осаждении паров германия. Они содержат значительное количество оксидов резко неравновесного состава. Установлено, что размер зерен зависит от количества энергии в пакете импульсов и растет с ее увеличением (рис. 3).

На изображениях, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, зафиксировано, что вокруг

кратеров (кроме областей, где присутствуют зерна) формируется периодическая структура, соответствующая направлению плоскости поляризации лазерного излучения. На картину распределения зерен по поверхности влияние поляризации не выявлено.

Проведенный фурье-анализ структуры выявил периодичность ~ 1 мкм на начальных этапах формирования структуры поверхности. При 2000 и 10 000 импульсах периодичность структуры составила ~ 3 мкм. С учетом того что периодичность сопоставима с длиной волны, можно предположить о значительном вкладе интерференции на начальном этапе процесса разрушения поверхности образцов. Сначала на поверхности формируется дискретное интерференционное поле от лазер-

ного излучения, оказывающее влияние на геометрию поверхности. В дальнейшем данное поле разрушается вследствие рассеяния излучения от сформировавшихся неоднородностей поверхности, что приводит к постепенному увеличению размера периодичности. Затем образуются хаотично расположенные зерна, размеры которых увеличиваются с ростом количества импульсов; при этом на самих зернах присутствуют периодические рельефы. Морфологический анализ зерен не выявил в их геометрических формах и ориентациях на плоскости каких-либо закономерностей, связанных с кристаллографической ориентацией поверхности образцов.

4. Заключение

Установлено, что поверхность, соответствующая плоскости с кристаллографической ориентацией (100), наиболее подвержена процессу разрушения. Поверхностная энергия разных граней (ориентаций плоскостей) Ge отличается из-за различия в плотности упаковки атомов и количества на поверхности оборванных связей. Максимальную поверхностную энергию у Ge имеет кристаллографическая плоскость (100). В экспериментах не выявлено кристаллографических особенностей в рельефе и в геометрии зерен, что с высокой степенью вероятности обусловлено малым значением длительности пика лазерного излучения, а следовательно, и отсутствием необходимой для ориентированного формирования структуры скорости кристаллизации (как из газовой фазы, так и из расплава).

Финансирование работы

Работа выполнена с использованием ресурсов НИТУ МИСиС и ЦКП ТвГУ в рамках государственного задания по научной деятельности (проект № 0817-2026-0006) и гранта РНФ (Соглашение № 24-19-00727).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Самохин. УФН, 187(2), 159 (2017). DOI: 10.3367/UFNr.2016.09.037974 [A.A. Ionin, S.I. Kudryashov, A.A. Samokhin. Phys. Usp., 60 (2), 149 (2017). DOI: 10.3367/UFNe.2016.09.037974]
- [2] Н.А. Иногамов, Ю.В. Петров, В.А. Хохлов, В.В. Жаховский. Теплофизика высоких температур, 58(4), 689 (2020). DOI: 10.31857/S0040364420040043 [N.A. Inogamov, Y.V. Petrov, V.A. Khokhlov, V.V. Zhakhovskii. High Temperature, 58 (4), 632 (2020). DOI: 10.1134/S0018151X20040045]
- [3] Н.С. Захаров, С.В. Холод. Взаимодействие ультракоротких импульсов лазерного излучения с веществом (12 ЦНИИ МО РФ, Сергиев Посад, 2012).
- [4] А.В. Достовалов. Создание периодических структур фемтосекундным излучением внутри световодов и на поверхности металлов. Автореф. канд. дис. (ФГБУН ИАИЭ СО РАН, Новосибирск, 2014).
- [5] И.А. Каплун, В.Е. Роголин. Фотоника, 13(1), 88 (2019). DOI: 10.22184/FRos.2019.13.1.88.106 [I.A. Kaplunov, V.E. Rogalin. Photonics Russian, 13 (1), 88 (2019)].
- [6] А.А. Ионин, С.И. Кудряшов, А.А. Руденко, Л.В. Сеleznev, Д.В. Синицын, С.В. Макаров. Optical Mater. Express, 7(8), 2793 (2017). DOI: 10.1364/OME.7.002793

Редактор Г.А. Оганесян

The effect of femtosecond laser radiation on the optical surface of germanium

I.A. Kaplunov¹, S.A. Tretiakov¹, A.I. Ivanova¹, A.D. Vasiliev¹, K.B. Yushkov², V.E. Rogalin³

¹ Tver State University,
170100 Tver, Russia

² National Research Technological University „MISIS“,
119149 Moscow, Russia

³ Institute of Electrophysics and
Electric Power Engineering
of the Russian Academy of Sciences,
191181 St. Petersburg, Russia

Abstract The study of the effect of high-intensity radiation from a femtosecond laser with a wavelength of 1030 nm on the surface of germanium single crystals revealed the features of the resulting surface relief and patterns associated with different crystallographic orientation of the surfaces depending on the radiation power density and pulse repetition rate.