УДК 548:621.373.826 *Оригинальная статья*

Модификация поверхности монокристаллического германия под воздействием излучения фемтосекундного лазера

И.А. Каплунов[1], С.А. Третьяков[1], А.И. Иванова[1], А.Д. Васильев[1], К.Б. Юшков[2], В.Е. Рогалин[3], Н.Я. Вайсбург[1]

[1]ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
170100, Россия, Тверь, ул. Желябова, 33
[2]ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
119049, Россия, Москва, Ленинский пр-кт, 4, стр. 1
[3]ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики РАН»
191181, Россия, Санкт-Петербург, Дворцовая набережная, дом 18, литера А
Tretyakov.sa@tversu.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.646

Аннотация: В настоящей работе представлены результаты исследования воздействия излучения фемтосекундного лазера на полированные поверхности монокристаллов германия с разной кристаллографической ориентацией. В экспериментах использовались лазер с длиной волны 1030 нм, средней мощностью 5 Вт и длительностью импульсов 330 фс, а также оптическая схема с автоматизированной системой управления положением образца, позволяющая контролировать стабильность излучения и повторяемость условий эксперимента. Образовавшиеся в результате воздействия неровности поверхности, представляющие собой кратеры или структуру из серии пиков и впадин с сохранением средней линии в плоскости исходной поверхности, фиксировались с помощью оптической микроскопии, а в дальнейшем исследовались на профилометре и растровом электронном микроскопе. В результате морфологического и высотного анализа полученных данных в точках воздействия, были выявлены особенности образующегося рельефа в зависимости от кристаллографической ориентации образцов и энергетических характеристик лазерного излучения, где пиковая мощность импульса, а, следовательно, и плотность энергии, регулировалась через среднюю мощность или частоту следования импульсов. Необратимое изменение поверхности (разрушение) для монокристаллического германия, составляет по пиковой мощности 20-30 МВт в импульсе при диаметре пучка 0,31 мм и длительности воздействия 20 мс, что соответствует плотности энергии 8,7-13,1 мДж/см^2.

Ключевые слова: фемтосекундный лазер, критические значения, профилометрический анализ, германий.

Каплунов Иван Александрович – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Третьяков Сергей Андреевич – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Иванова Александра Ивановна – к.ф.-м.н., доцент кафедры прикладной физики, ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Васильев Алексей Денисович – аспирант 3 курса направления «Физика конденсированного состояния», ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Юшков Константин Борисович – д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник научно-технологического и учебного центра акустооптики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»
Рогалин Владимир Ефимович – д.ф.-м.н., заведующий лабораторией, ФГБУН «Институт электрофизики и электроэнергетики РАН»

© И.А. Каплунов, С.А. Третьяков, А.И. Иванова, А.Д. Васильев, К.Б. Юшков, В.Е. Рогалин, Н.Я. Вайсбург, 2026

Вайсбург Наталья Яковлевна – аспирант 2 курса направления «Физика конденсированного состояния», ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»

Original Article

Surface modification of single-crystal germanium by femtosecond laser radiation

I.A. Kaplunov[1], S.A. Tretiakov[1], A.I. Ivanova[1], A.D. Vasilyev[1], K.B. Yushkov[2], V.E. Rogalin[3], N.Ya. Vaysburg[1]

[1]*Tver State University, Tver, Russia*

[2]*NUST MISIS, Moscow, Russia*

[3]*Institute of Electrophysics and Power Engineering of the RAS, St. Petersburg, Russia*

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.646

Abstract: This paper presents the results of a study examining the effects of femtosecond laser radiation on polished germanium single crystal surfaces with varying crystallographic orientations. In the experiments used a 1030 nm laser with an average power of 5 W and a pulse duration of 330 fs, as well as an optical setup with an automated sample position control system, enabling the radiation stability and repeatability of experimental conditions to be monitored. The resulting surface irregularities, which consisted of craters or a structure consisting of a series of peaks and valleys with the midline maintained in the plane of the original surface, were fixed using optical microscopy and subsequently examined using a profilometer and a scanning electron microscope. Morphological and 3D surface profile analysis of the obtained data at the impact points revealed features of the resulting relief depending on the crystallographic orientation of the samples and the energy characteristics of the laser radiation, where the peak pulse power, and therefore the fluence, was controlled through the average power or pulse repetition rate. Irreversible change of the surface (laser-induced damage) for single-crystal germanium is 20-30 MW in peak power per pulse with a beam diameter of 0,31 mm and an exposure duration of 20 ms, which corresponds to an fluence of 8,7-13,1 mJ/cm^2.

Keywords: femtosecond laser, critical values, profilometric analysis, germanium.

Ivan A. Kaplunov – Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Applied Physics, Tver State University

Sergei A. Tretiakov – Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Physics, Tver State University, ORCID: 0000-0002-4134-5609

Alexandra I. Ivanova – Ph. D., Associate Professor, Department of Applied Physics, Tver State University, ORCID: 0000-0002-5517-2294

Alexey D. Vasilyev – 3rd year postgraduate student, Department of Condensed Matter Physics, Tver State University

Konstantin B. Yushkov – Ph. D., Leading Researcher, Scientific and Technological and Educational Center of Acousto-Optics, National Research Technological University MISIS, ORCID: 0000-0001-9015-799X

Vladimir E. Rogalin – Dr. Sc., Head of the Laboratory at Institute of Electrophysics and Power Engineering of the RAS, ORCID: 0000-0002-2980-5385

Natalia Ya. Vaysburg – 2nd year postgraduate student, Department of Condensed Matter Physics, Tver State University

Поступила в редакцию/received: 30.07.2026; после рецензирования/revised: 02.09.2026; принята/accepted: 05.09.2026.

1. Введение

Структурная модификация поверхности металлов и полупроводников под воздействием лазерного излучения позволяет управлять структурой поверхности на микро- и наноуровне, изменять морфологию, вызывать локальные фазовые переходы, контролировать процессы абляции, плавления и рекристаллизации. [1-4]. Эти эффекты критически важны для создания высококачественных оптических элементов, микро- и наноструктурированных поверхностей, а также для формирования слоёв материалов с управляемыми свойствами.

Для решения ряда технологических задач, в том числе увеличения мощности и энергии в точке фокусировки, после создания лазеров с модуляцией добротности резонатора длительность импульсов сократилась от мс (10^{-3} с) до нс (10^{-9} с) и затем после разработки методов синхронизации мод – до пс (10^{-12} с) и фс (10^{-15} с), что является предельно возможной короткой длительностью для длин волн видимого спектрального диапазона. Развитие фемтосекундных лазерных систем существенно продвинуло промышленную обработку материалов из-за своих уникальных характеристик – сверхкороткой длительности импульса и высокой пиковой интенсивности. За счет сверхкороткой длительности импульса удалось достичь рекордных значений интенсивности излучения, когда первостепенную роль начинают играть нелинейные процессы, вследствие чего изменяется характер взаимодействия и поглощения энергии импульсов веществом [5-7].

Лазерное взаимодействие импульсов фемтосекундной длительности с веществом часто называется нетепловым процессом, что отличает их от взаимодействия с наносекундными и более длительными импульсами, и именно из-за этого фемтосекундные лазеры обеспечивают высокую производительность при обработке материалов для достижения высокой и качественной микро- и нанообработки. Сверхкороткие импульсы создают ограниченную зону термического воздействия и обеспечивают очень высокую точность обработки, тогда как высокая пиковая интенсивность обуславливает нелинейные взаимодействия (многофотонное поглощение и туннельная ионизация в прозрачных материалах) и обеспечивает большое разнообразие материалов, которые могут быть обработаны. Возможность фокусировки фемтосекундных лазерных импульсов в объеме прозрачных оптических материалов делает возможным трехмерную (3D) микро- и нанообработку: создание сложных 3-мерных волноводных структур внутри диэлектриков, создание 3-мерных элементов памяти, создание периодического изменения показателя преломления внутри сердцевины оптического световода – волоконных длиннопериодных и брэгговских решеток [8].

Фемтосекундные технологии также позволяют решать задачи поверхностной модификации непрозрачных материалов (полупроводники, металлы), где также проявляются особенности фемтосекундного взаимодействия по сравнению с более длительными импульсами. На германии формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур (ЛИПС) впервые было представлено в работе [9] в виде полос с периодом 2-3 мкм при обработке излучением рубинового лазера. В настоящее время исследования модификации поверхности германия лазерным излучением УФ и ИК диапазона отражены в работах

[10-12].

Воздействие на материалы фемтосекундными лазерными импульсами формирует ЛИПС, которые имеют особенности структуры, отличные от более длительных импульсов. Образуются структуры как с периодом, сравнимым с длиной волны излучения, так и мелкомасштабные структуры с периодом существенно меньше длины волны излучения и ориентированные перпендикулярно поляризации излучения [13]. Наблюдается зависимость периода структур не только от длины волны и угла падения, но и от количества импульсов и мощности импульса [14]. ЛИПС при этом формируются намного позже после окончания импульса [15]. Также имеет место формирование двумерных структур [16].

При фемтосекундном воздействии подавляется формирование тепловой зоны вокруг облученной области. Высокая мгновенная пиковая мощность вызывает холодную абляцию, а не плавление с последующем испарением материала [6]. Фемтосекундное излучение позволяет обрабатывать оптически прозрачные и непрозрачные материалы, что применяется в разных областях науки и техники, где необходимо с высокой точностью создавать микрорельеф, выполнять микрофрезерование и резку материалов, а также, где необходимо сфокусировать в объеме вещества высокие порции энергии, сформировать оптические ловушки (задачи квантовой и нелинейной оптики, атомная энергетика) [17, 18].

Для оптического и фотоэлектрического применения германия модификация поверхности изменение поверхностной морфологии Ge под воздействием лазера может приводить к существенным изменениям зеркальности поверхности позволяет снизить коэффициент отражения, а также увеличить эффективность фотоэлектронных преобразователей на основе Ge. Модификация поверхности может быть использована для проведения технологических операций на поверхности оптических элементов из Ge, например, для осуществления диффузионной сварки оптических изделий в приборах. С учетом развивающихся фемтосекундных лазерных систем и областей их применения исследования влияния излучения и особенностей материала на параметры разрушения (модификации) приповерхностного слоя Ge является актуальной исследовательской задачей. Основная цель исследования состоит в определении корреляции между лазерными параметрами и топологическими изменениями поверхности монокристаллического Ge разной кристаллографической ориентации.

2. Образцы монокристаллов для исследований

Образцы для исследований размерами 10×10×5 мм были вырезаны из

монокристалла германия; кристаллографическая ориентация плоскости 10×10 мм для разных образцов соответствовала плоскостям (100), (110) и (111). Рабочие поверхности обрабатывались по оптическому классу Р III ГОСТ 11141-84 [19], с шероховатостью *Rz* не хуже 0,02 мкм ГОСТ 2789-73 [20]. Особенности условий подготовки поверхностей были направлены на решение задачи получения близких значений параметров шероховатости независимо от кристаллографической ориентации. Таким образом исключалось влияние рельефа поверхности на результаты экспериментов для образцов с разной кристаллографической ориентацией.

Для исследований использовался оптоволоконный лазер с длиной волны 1030 нм (длительность импульса 330 фс) с возможностью регулировки мощности излучения в диапазоне от 0 до 5 Вт и частоты следования импульсов – от 100 до 1000 кГц. При этом регулировка количества импульсов, приходящих на заданную точку воздействия, осуществлялась с помощью акустооптического модулятора (АОМ), выполняющего роль затвора в режиме выключения, путем подачи сигнала на включение в течение заданного времени. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

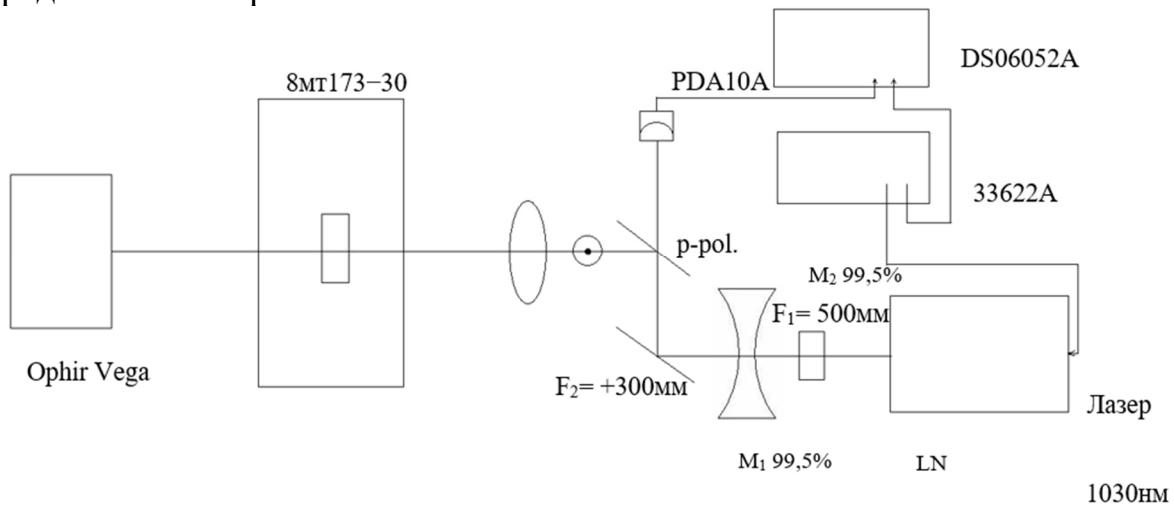


Рис. 1. Схема эксперимента.

Применялись следующие приборы и устройства: - оптоволоконный фемтосекундный лазер с длиной волны 1030 нм; - пластинка ниобата лития, для визуализации пучка на второй гармонике (514 нм); - рассеивающая линза для создания плоскопараллельного пучка, система из зеркал для регулировки положения лазерного луча в пространстве; - фокусирующая линза с фокусным расстоянием 300 мм; - предметный столик на автоматизированном трансляторе 8MT173-30 (горизонтальное перемещение с шагом 1,25 мкм), с возможностью ручного вертикального перемещения; измеритель мощности лазерного луча, для измерения диаметра пучка; - PDA10A-EC – *Si* фотодетектор с усилителем, фиксированный коэффициент усиления, рабочий спектральный диапазон:

200-1100 нм, ширина полосы пропускания: 150 МГц, площадь активной области: 0,8 мм^2; - генератор сигналов Agilent 33622A, для управления AOM; - осциллограф DSO6052A (Agilent Technologies).

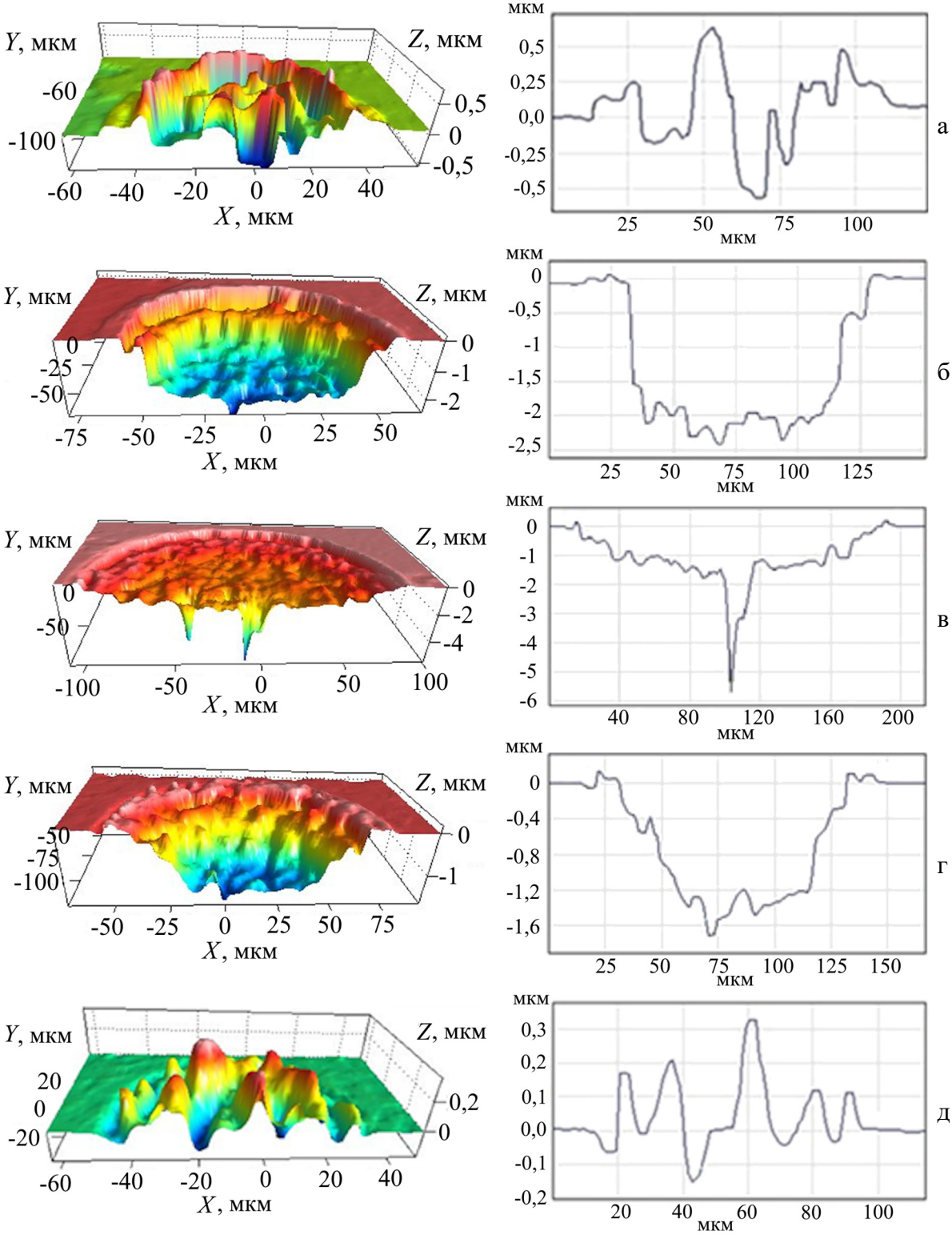
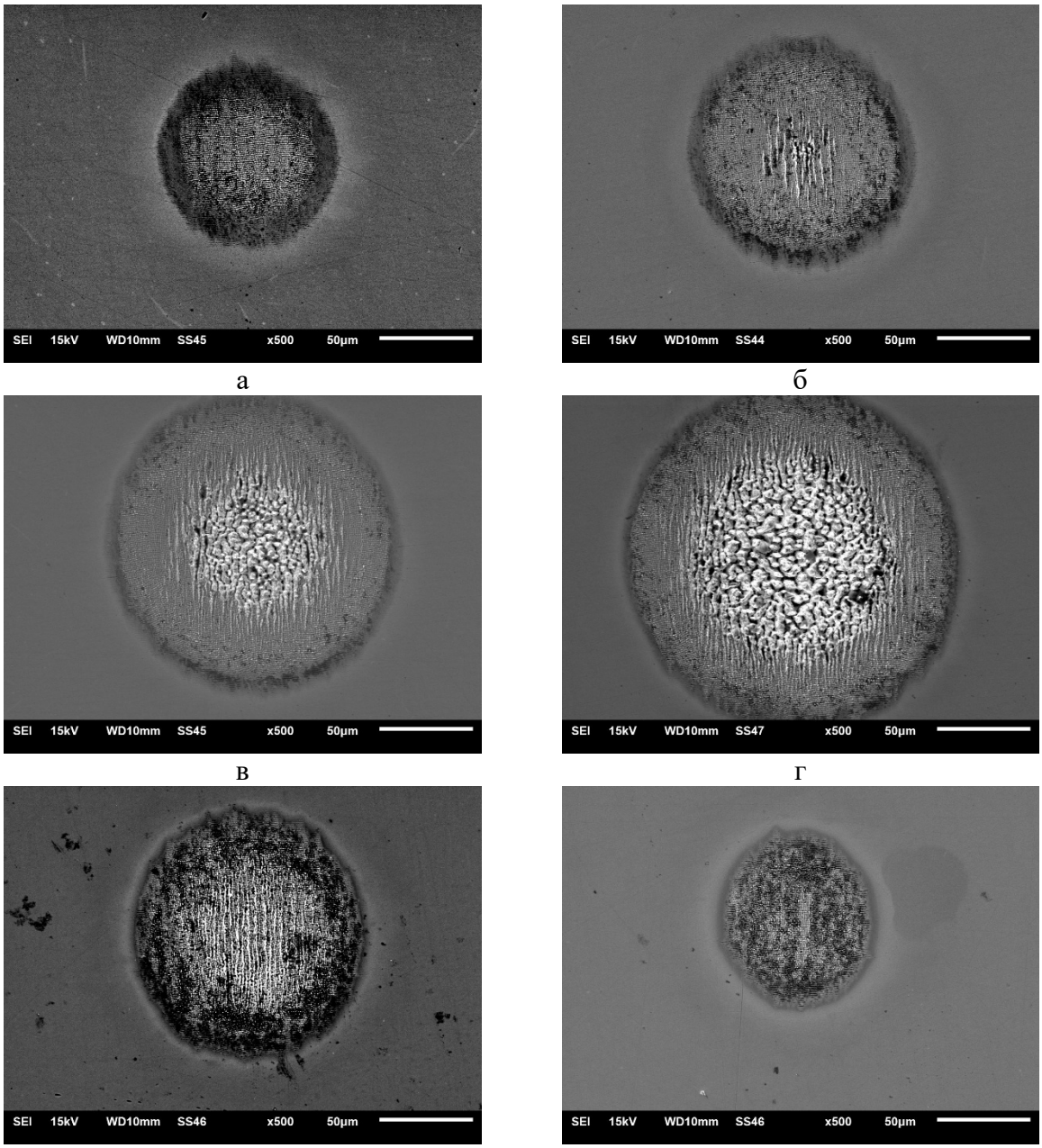


Рис. 2. 3D (слева) и 2D (справа) профили кратеров на поверхности монокристаллов *Ge* с кристаллографической ориентацией поверхности 111. При f = 100 кГц, мощность P: а – 1,5 Вт; б – 2 Вт; в – 4 Вт. При мощности 5 Вт и частотах: г – 297,4 кГц; д – 500 кГц.

Образцы одной и той же кристаллографической ориентации подвергались воздействию фемтосекундного лазерного излучения точечно с переменной мощностью и частотой излучения, что позволяло менять пиковую мощность, с фиксированным количеством импульсов. Параметры излучения представлены в Таблице 1, длительность воздействия на все точки составляло 20 мс. Нецелочисленные значения частот определены характеристиками самой лазерной системы.



а б в г д е

Рис. 3. РЭМ изображения кратеров, плоскость 111. При f = 100 кГц, мощность P: а – 1,5 Вт; б – 2 Вт; в – 3 Вт; г – 4 Вт. При мощности 5 Вт и частотах: д – 297,4 кГц; е – 500 кГц.

Таблица 1. Параметры лазерного излучения при изменении пиковой мощности.

№ точки	P, Вт	Частота f, кГц	Пиковая мощность, МВт	Суммарная энергия, мДж
1	4	100,0	121,6	80
2	3	100,0	91,2	60
3	2	100,0	60,8	40
4	1,5	100,0	45,6	30
5	1	100,0	30,4	20
6	0,5	100,0	15,2	10
7	5	297,4	50,7	100
8	5	500,0	30,4	100
9	5	720,7	21,1	100
10	5	898,9	17,0	100

На рис. 2-3 представлены результаты исследований воздействия на поверхность (111) германия, зафиксированные профилометром (NanoMap 1000WLI; программное обеспечение SPIP и Gwyddion) и растровым электронным микроскопом (РЭМ; JEOL JSM 6610LV). На поверхности сформировались кратеры, отличающиеся для поверхностей с разной кристаллографической ориентацией (исследования поверхностей были проведены для всех образцов) и мощностью лазерного воздействия.

На полученных изображениях РЭМ явно видны проявления эффекта интерференции лазерного излучения при малых значениях пиковой мощности и суммарной энергии. Профилометрический анализ полученных данных для кратеров, образовавшимся при одинаковой длительности и количеству импульсов в пакете (20 мс, 2000 импульсов), показал, что значение средней глубины уменьшается почти линейно в зависимости от снижения значения пиковой мощности в импульсе. Подобную зависимость для случая увеличения частоты с сохранением суммарной энергии в пакете получить не удалось по причине недостаточного количества данных.

Также интерес представляет анализ геометрии кратеров при равных или близких значениях пиковой мощности и разной суммарной энергией в пакетах: например, точки 5 и 8 из Таблицы 1. Данные указывают, что влияние суммарного количества энергии в пакете импульсов вносит вклад в геометрию кратера, который сопоставим с влиянием значения пиковой мощности.

С точки зрения влияние кристаллографической ориентации поверхности на разрушение под воздействием лазерного излучения можно отметить следующие закономерности. Для плоскости (100) наблюдаются в большей части разрушения, связанные с процессами перехода из твердого состояния в газообразное, а для плоскости (111) на основании анализа профилей наблюдаются структуры, сформировавшиеся выше средней линии поверхности и потенциально образованные из жидкого состояния. На основании данных результатов можно предположить, что при

воздействии фемтосекундного лазерного излучения в сверхкороткие временные интервалы при уменьшении пиковой мощности или на начальных этапах разрушения происходит образование как жидкой, так и газообразной фаз. Для плоскости (111) фиксируется данный результат вследствие более медленного процесса абляции, что связано с наиболее высокой ретикулярной плотностью поверхности и минимальным значением поверхностной энергии (сингулярная плоскость), соответствующими данной плоскости. При этом отсутствие кристаллографических особенностей в рельефе и в геометрии образующихся зерен с высокой степенью вероятности обусловлено малым значением длительности пика лазерного изучения, а, следовательно, и отсутствием необходимой для ориентированного формирования структуры скоростью кристаллизации (как из газовой фазы, так и из расплава).

3. Заключение

Воздействие фемтосекундного лазерного излучения на оптические поверхности германия разной кристаллографической ориентации позволило выявить особенности модификации (разрушения) поверхностей, что определяется разной поверхностной энергией плоскостей. При этом рельеф поверхности, образующаяся структура поверхности не имеют кристаллографических особенностей.

Исследования показывают, что критические значения параметров фемтосекундного лазерного излучения, при которых начинается процесс необратимого изменения поверхности (разрушения) для монокристаллического германия составляет по пиковой мощности 20-30 МВт в импульсе при диаметре пучка 0,31 мм по уровню $1/e^2$.

Работа выполнена с использованием ресурсов НИТУ МИСИС и ЦКП ТвГУ при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственной программы в области научно-исследовательской деятельности (проект № 0817-2026-0006).

Библиографический список:

1. **Хомич, В.Ю.** Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов / В.Ю. Хомич, В.А. Шмаков // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185. – №. 5. – С. 489-499. DOI: 10.3367/UFNr.0185.201505c.0489.

2. **Кочуев, Д.А**. Воздействие лазерного излучения на поверхность твердого тела и формирование микро- и наноструктур / Д.А. Кочуев, Р.В. Чкалов, В.Г Прокошев, К.С Хорьков // Известия РАН. Серия Физическая. – 2020. – Т. 84. – № 3. – С. 443-446. DOI: 10.31857/S0367676520030151.

3. **Бронников, К.А.** Формирование лазерно-индуцированных периодических структур на тонких пленках нитридов переходных металлов и полупроводников / К.А. Бронников, С.А. Гладких, К.А. Окотруб и др. // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52. – №. 11. – С. 1012-1017.

4. **Либенсов, М.Н.** Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / М.Н. Либенсов, Е.Б. Яковлев, Г.Д. Шандыбина; под общей редакцией В.П. Вейко. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2008. – 141 с.

5. **Iqbal, M.H.** Pulsed laser ablation of germanium under vacuum and hydrogen environments at various fluences / M.H. Iqbal, S. Bashir, M.S. Rafique et al. // Applied Surface Science. – 2015. – V. 344. – P. 146-158. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.03.117.
6. **Kumar, M.** Fabrication of nanopatterned germanium surface by laser-induced etching: AFM, Raman and PL studies / M. Kumar, H.S. Mavi, S. Rath et al. // Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures. – 2008. – V. 40. – I. 9. – P. 2904-2910. DOI: 10.1016/j.physe.2008.02.007.
7. **Чумаков, А.Н**. Абляция кремния в воздухе моно-и бихроматическими импульсами лазерного излучения с длинами волн 355 и 532 nm / А.Н. Чумаков, В.В. Лычковский, И.С. Никончук, А.С. Мацукович / Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – Вып. 1. – С. 36-44. DOI: 10.21883/JTF.2022.01.51849.202-21.
8. **Достовалов, А.В**. Создание периодических структур фемтосекундным излучением внутри световодов и на поверхности металлов: дисс. … канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / Достовалов Александр Владимирович. – Новосибирск: Институт автоматики и электрометрии СО РАН, 2015. – 120 с.
9. **Беспалов, В.Г.** Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии / В.Г. Беспалов, С.А. Козлов, Н.В. Петров и др. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 136 с.
10. **Birnbaum, M**. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers / M. Birnbaum // Journal of Applied Physics. – 1965. – V. 36. – I. 11. – P. 3688-3689. DOI: 10.1063/1.1703071.
11. **Рогалин, В.Е.** Получение пористой поверхности на германии путем воздействия инфракрасными наносекундными лазерными импульсами / В.Е. Рогалин, В.Ю. Железнов, Т.В. Малинский, С.И. Миколуцкий и др. // Физика твердого тела. – 2025. – Т. 67. – Вып. 12. – С. 2412-2415. DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62438.8061k-25.
12. **Zheleznov, V.Yu.** Impact treatment of the surface of oxygen-free copper with nanosecond laser pulses in water / V.Yu. Zheleznov, T.V. Malinskiy, S.I. Mikolutskiy et al. // Inorganic Materials. – 2024. – V. 60. – I. 9. – P. 1083-1088. DOI: 10.1134/S0020168524701437.
13. **Zheleznov, V.Yu**. Effect of nanosecond ultraviolet laser pulses on the surface of germanium single crystals / V.Yu. Zheleznov, T.V. Malinskii, V.E. Rogalin et al. // Russian Microelectronics. – 2023. – V. 52. – I. 8. – P. 741-749. DOI: 10.1134/S1063739723080073.
14. **Ozkan, A.M.** Femtosecond laser-induced periodic structure writing on diamond crystals and microclusters / A.M. Ozkan, A.P. Malshe, T.A. Railkar et al. // Applied Physics Letters. – 1999. – V. 75. – I. 23. – P. 3716-3718. DOI: 10.1063/1.125439.
15. **Okamura, K.** Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation / K. Okamura, M. Hashida, Y. Miyasaka et al. // Physical Review B. – 2010. – V. 82. – I. 16. – P. 165417-1-165417-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.165417.
16. **Vorobyev, A.Y.** Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications / A.Y. Vorobyev, C. Guo // Laser & Photonics Reviews. – 2012. – V. 7. – I. 3. – P. 385-407. DOI: 10.1002/lpor.201200017.
17. **Dostovalov, A.V**. Specific features of formation of self-induced gratings on metal foils during scanning by a tightly focused femtosecond laser beam / A.V. Dostovalov, V.P. Korolkov, S.K. Golubtsov, V.I. Kondrat'ev // Quantum Electronics. – 2014. – V. 44. – I. 4. – P. 330-334. DOI: 10.1070/QE2014v044n04ABEH015376.
18. Micromachining. // In book: Ultrafast lasers technology and applications / ed. by M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Such, 1st ed. – Boca Raton: CRC Press, 2002. – Chapter 7. – 30 p. DOI: 10.1201/9780203910207.
19. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля: ГОСТ 11141-84. – Взамен ГОСТ 11141–76; введ. 01.01.1985. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 20 с.
20. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики: ГОСТ 2789-73; 01.01.1975. – М.: Издательство стандартов, 1985. – 41 с.

References:

1. Khomich V.Y., Shmakov V.A. Mechanisms of direct laser nanostructuring of materials, *Physics–Uspekhi*, 2015, vol. 58, issue 5, pp. 455-465. DOI: 10.3367/UFNe.0185.201505c.0489.
2. Kochuev D.A., Chkalov R.V., Prokoshev V.G., Khor'kov K.S. Effect of laser radiation on the surface of a solid body and the formation of micro- and nanostructures, *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, issue 3, pp. 343-345. DOI: 10.3103/S1062873820030120.
3. Bronnikov K.A., Gladkikh S.A., Okotrub K.A. et al. Formation of laser-induced periodic structures on thin films of transition metal nitrides and semiconductors, *Kvantovaya Elektonika [Quantum Electronics]*, 2022, vol. 52, no. 11, pp. 1012-1017. (In Russian).
4. Libensov M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D. *Vzaimodejstvie lazernogo izlucheniya s veshchestvom*

(silovaya optika). Konspekt lektsij. Chast' I. Pogloshchenie lazernogo izlucheniya v veshchestve [Interaction of laser radiation with matter (power optics). lecture notes. Part I. Absorption of laser radiation in matter], ed. by V.P. Veiko. St. Petersburg, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics, and Optics Publ., 2008. – 141 p. (In Russian).
5. Iqbal M.H., Basir S., Rafique M.S. et al. Pulsed laser ablation of germanium under vacuum and hydrogen environments at various fluences, *Applied Surface Science*, 2015, vol. 344, pp. 146-158. DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.03.117.
6. Kumar M., Mavi H.S., Rath S. et al. Fabrication of nanopatterned germanium surface by laser-induced etching: AFM, Raman and PL studies, *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 2008, vol. 40, issue 9, pp. 2904-2910. DOI: 10.1016/j.physe.2008.02.007.
7. Chumakov A.N., Luchkouski V.V., Nikonchuk I.S., Matsukovich A.S. Silicon ablation in air by mono- and bichromatic laser pulses with wavelength 355 and 532nm, *Technical Physics*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 16-24. DOI: 10.21883/TP.2022.01.52527.202-21.
8. Dostovalov A.V. Sozdanie periodicheskikh struktur femtosekundnym izlucheniem vnutri svetovodov i na poverkhnosti metallov [Creation of periodic structures by femtosecond radiation inside light guides and on the surface of metals]. Cand. chem. sci. diss.: 02.00.04. Novosibirsk, Institute of Automation and Electrometry SB RAS Publ., 2015, 120 p. (In Russian).
9. Bespalov V.G., Kozlov S.A., Petrov N.V. et al. *Femtosekundnaya optika i femtotekhnologii* [Femtosecond optics and femtotechnologies]. St. Petersburg, ITMO University, 2018, 136 p. (In Russian).
10. Birnbaum M. Semiconductor surface damage produced by ruby lasers, *Journal of Applied Physics*, 1965, vol. 36, issue 11, pp. 3688-3689. DOI: 10.1063/1.1703071.
11. Rogalin V.E., Zheleznov V.Y., Malinsky T.V. et al. Poluchenie poristoj poverkhnosti na germanii putem vozdejstviya infrakrasnymi nanosekundnymi lazernymi impul'sami [Obtaining a porous surface on germanium by exposure to infrared nanosecond laser pulses], *Fizika Tverdogo Tela [Solid State Physics]*, 2025, vol. 67, issue 12, pp. 2412-2415. DOI: 10.61011/FTT.2025.12.62438.8061k-25. (In Russian).
12. Zheleznov V.Yu., Malinskiy T.V., Mikolutskiy S.I. et al. Impact treatment of the surface of oxygen-free copper with nanosecond laser pulses in water, *Inorganic Material*s, 2024, vol. 60, issue 9, pp. 1083-1088. DOI: 10.1134/S0020168524701437.
13. Zheleznov V.Yu., Malinskii T.V., Rogalin V.E. et al. Effect of nanosecond ultraviolet laser pulses on the surface of germanium single crystals, *Russian Microelectronics*, 2023, vol. 52, issue 8, pp. 741-749. DOI: 10.1134/S1063739723080073.
14. Ozkan A. M., Malshe A.P., Railkar T.A. et al. Femtosecond laser-induced recording of periodic structures on diamond crystals and microclusters, *Applied Physics Letters,* 1999, vol. 75, issue 23, pp. 3716-3718. DOI: 10.1063/1.125439.
15. Okamura K., Hashida M., Miyasaka Y. et al. Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation, *Physical Review B*, 2010, vol. 82, issue 16, pp. 165417-1-165417-5. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.165417.
16. Vorobyev A.Y., Guo C. Direct femtosecond laser surface nano/microstructuring and its applications, *Laser & Photonics Reviews*, 2012, vol. 7, issue 3, pp. 385-407. DOI: 10.1002/lpor.201200017.
17. Dostovalov A.V., Korolkov V.P., Golubtsov S.K., Kondrat'ev V.I. Specific features of formation of self-induced gratings on metal foils during scanning by a tightly focused femtosecond laser beam, *Quantum Electronics*, 2014, vol. 44, issue 4, pp. 330-334. DOI: 10.1070/QE2014v044n04ABEH015376.
18. Micromachining, *Ultrafast lasers technology and applications,* ed. by M.E. Fermann, A. Galvanauskas, G. Such, 1st ed. Boca Raton, CRC Press, 2002, chapter 7, 30 p. DOI: 10.1201/9780203910207.
19. GOST 11141-84. *Detali opticheskie. Klassy chistoty poverkhnostej. Metody kontrolya* [Optical parts. Classes of cleanness of surfaces. Methods of control]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985, 20 p. (In Russian).
20. GOST 2789-73. *Sherokhovatost' poverkhnosti. Parametry i kharakteristiki* [Surface roughness. Parameters and characteristics]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1985, 41 p. (In Russian).