

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ. ПОЛУПРОВОДНИКИ

MATERIALS SCIENCE AND TECHNOLOGY. SEMICONDUCTORS

Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2023. Т. 26, № 2. С. 89—100.
DOI: 10.17073/1609-3577-2023-2-89-100

УДК 621.315.592:538.971

Воздействие наносекундных ультрафиолетовых лазерных импульсов на поверхность монокристаллов германия

© 2023 г. В. Ю. Железнов¹, Т. В. Малинский¹, В. Е. Рогалин¹, Ю. В. Хомич¹,
В. А. Ямщиков¹, И. А. Каплунов²✉, А. И. Иванова²

¹ *Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук,
Дворцовая наб., д. 18, Санкт–Петербург, 191186, Российская Федерация*

² *Тверской государственный университет,
ул. Желябова, д. 33, Тверь, 170100, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: kaplunov.ia@tversu.ru

Аннотация. Впервые проведено подробное комплексное исследование «сухого» травления дислокационных и бездислокационных образцов германия на плоскостях {111}, {110}, {100}. Травление осуществляли путем воздействия импульсов наносекундного ультрафиолетового лазерного излучения допороговой интенсивности (длина волны — 355 нм, длительность ~ 10 нс, плотность энергии ~ 0,5—1,3 Дж/см², частота следования импульсов — 100 Гц, расходимость — 1—2 мрад). До и после лазерной термообработки поверхности образцы исследовали с помощью оптического профилометра Zygo и растрового электронного микроскопа. Выявлены особенности характера повреждения поверхностей, соответствующих различным кристаллографическим плоскостям монокристаллов промышленного дислокационного германия. Они сопоставлены с данными о допороговых повреждениях типовых бездислокационных кристаллов. Показано, что в дислокационных образцах германия на плоскости {111} возможно создание режима воздействия излучения, приводящего к формированию ямок травления, внешне идентичных дислокационным ямкам, выявляемым при селективном химическом травлении. Их концентрация по порядку величины соответствует плотности дислокаций. На плоскости {100} дислокационных образцов также обнаружены результаты травления, явно имеющие кристаллографическую природу. При плотности энергии воздействующего излучения $\geq 0,4$ Дж/см² на поверхностях дислокационного (плоскость {100}) и бездислокационного германия (плоскости {111}, {100}, {110}) были зарегистрированы лишь отдельные пятна размером ~50 мкм, а также отдельные микрократеры размером ~0,1—1 мкм, не имеющие кристаллографических признаков. Показана возможность экологичного выявления дислокаций в германии без использования химических реагентов.

Ключевые слова: германий (Ge), монокристалл, бездислокационный, наносекундный УФ–лазер, кристаллографическая плоскость, травление

© 2023 National University of Science and Technology “MISIS”.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания по научной деятельности № 75–03–2022–056 и № 0817–2023–0006 с использованием ресурсов Центра коллективного пользования Тверского государственного университета.

Для цитирования: Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Рогалин В.Е., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. Воздействие наносекундных ультрафиолетовых лазерных импульсов на поверхность монокристаллов германия. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2023; 26(2): 89–100. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-89-100>

Impact of nanosecond UV laser pulses on the surface of germanium single crystals

V. Yu. Zheleznov¹, T. V. Malinskiy¹, V. E. Rogalin¹, Yu. V. Khomich¹,
V. A. Yamshchikov¹, I. A. Kaplunov²✉, A. I. Ivanova²

¹ *Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences,
18 Dvortsovaya Emb., St. Petersburg 191186, Russian Federation*

² *Tver State University, 33 Zhelyabova Str., Tver 170100, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: kaplunov.ia@tversu.ru*

Abstract. For the first time, a detailed comprehensive study of the “dry” etching of dislocation and dislocation-free germanium samples on the {111}, {110} and {100} planes has been carried out. Etching was carried out by exposure to pulses of nanosecond UV laser radiation of subthreshold intensity (wavelength 355 nm, duration ~ 10 ns, energy density ~ 0.5–1.3 J/cm², pulse repetition rate 100 Hz, divergence 1–2 mrad). Before and after laser heat treatment of the surface, the samples were examined using a Zygo optical profilometer and a scanning electron microscope. Features of the nature of damage to surfaces corresponding to different crystallographic planes of single crystals of industrial dislocation germanium are revealed. They are compared with data on subthreshold damages of typical dislocation-free crystals.

It is shown that in dislocation samples of germanium on the {111} plane, it is possible to create a regime of exposure to radiation, leading to the formation of etch pits that are outwardly identical to dislocation pits detected during selective chemical etching. Their concentration corresponds in order of magnitude to the density of dislocations.

On the {100} plane of dislocation samples, etching results were also found, which clearly have a crystallographic nature. At an energy density of the acting radiation ≥ 0.4 J/cm², on the surfaces of dislocation ({100} plane) and dislocation-free germanium ({111}, {100}, {110} planes), only individual spots ~50 μm in size were registered, as well as individual microcraters ~0.1–1.0 μm in size, which do not have crystallographic features. The possibility of environmentally friendly detection of dislocations in germanium without the use of chemical reagents is shown.

Keywords: germanium, single crystal, dislocation-free, nanosecond UV laser, crystallographic plane, etching

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the state task for scientific activity No. 75–03–2022–056 and No. 0817–2023–0006 using the resources of the Shared Use Center of Tver State University.

For citation: Zheleznov V.Yu., Malinskiy T.V., Rogalin V.E., Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A., Kaplunov I.A., Ivanova A.I. Impact of nanosecond UV laser pulses on the surface of germanium single crystals. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2023; 26(2): 89–100. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2023-2-89-100>

Введение

После появления высокоинтенсивных импульсных источников потоков энергии в твердых телах был обнаружен целый ряд новых эффектов, которые кардинально отличаются от стационарных явлений. Были обнаружены структурные и морфологические изменения материала, далекие от термодинамического равновесия [1—4]. Благодаря широкому развитию такого удобного инструмента, как мощные лазеры, стала интенсивно развиваться физика структурно модифицированных материалов с новыми заданными свойствами [1, 5—7].

Структурная модификация металлов и полупроводников в результате воздействия интенсивных лазерных импульсов может происходить вследствие как тепловых процессов (нагрев, плавление, испарение) [2, 5—10], так и нетепловых (генерация неравновесных точечных дефектов — вакансий и межузельных атомов) [1]. Изучение этих структурных изменений актуально для развития авиакосмической и атомной промышленности, а также других отраслей. Исследования проводятся прежде всего на материалах, активно применяемых на практике, так как их свойства в стационарных процессах довольно подробно изучены. Один из таких материалов — монокристаллический германий (Ge) [11].

Германий — базовый полупроводник, активно используемый в электронике и инфракрасной (ИК) оптике. Несмотря на сложности с поиском полезных ископаемых, содержащих германий в промышленных количествах, его производство и потребление постоянно растет. Использование германия в полупроводниковой промышленности ограничено; сейчас он применяется, в основном, для разнообразных оптических применений, особенно для приборов, используемых в атмосферном окне 8—14 мкм [12, 13]. Для этой области спектра по совокупности физико-химических свойств оптика из германия является одной из наиболее востребованных. Из Ge изготавливают разнообразные оптические элементы для систем, работающих в окнах прозрачности атмосферы 3—5 и 8—14 мкм, в частности в тепловизионных приборах [12—14], для изготовления фотоприемников [15], в акустооптике [16], нелинейной оптике [17] и CO₂-лазерах [12].

Технологиям роста крупногабаритных монокристаллов германия уделяется большое внимание; в настоящее время выращивают монокристаллы Ge для ИК-оптики диаметром до 500 мм [12]. Разработана технология получения бездислокационных кристаллов [18, 19]. Подробно исследованы особенности поглощения излучения в германии и другие оптические характеристики [1, 12, 20].

При исследовании свойств полупроводников, а также для их обработки активно применяется ла-

зерное излучение, например, для отжига, очистки поверхности, резки, скрайбирования и др. [8, 11, 21]. Поэтому воздействие разнообразных видов лазерного излучения на полупроводники, и особенно на германий, изучено, казалось бы, досконально [17, 18, 21—23]. При лазерном воздействии могут возникать различные дефекты структуры кристалла, а на поверхности и в прилегающих областях возможно образование структур разного размера [9, 22—25]. В последнем случае модификация поверхности может иметь различный масштаб — от нанометрового до микронного. Эти исследования носят не только фундаментальный характер, они имеют и практическую значимость за счет постоянного получения новых результатов.

Так, например, в работе [26] было сообщено о «сухом» травлении монокристаллического германия воздушной микроплазмой, образованной при оптическом пробое воздуха вблизи образца. Для того, чтобы избежать повреждения кристалла излучением, образец располагался вне непосредственного воздействия луча лазера. Таким образом, поверхность германия подвергалась воздействию только лазерной плазмы.

Применяемые в настоящее время частотно-импульсные ультрафиолетовые (УФ) лазеры широко используются для очистки поверхности полупроводниковых и металлических деталей перед проведением различных ответственных технологических операций, например непосредственно перед нанесением на оптические элементы интерференционных покрытий [27]. Поэтому важно не превысить допустимое значение плотности энергии воздействующего излучения.

Недавно [3] сообщалось об исследовании особенностей взаимодействия УФ наносекундных импульсов твердотельного Nd:YAG-лазера (третья гармоника, длина волны $\lambda = 355$ нм) с поверхностями металлов и полупроводников в допороговом режиме при плотности энергии $E \sim 0,1 \div 1,0$ Дж/см² (в этом случае порог возникновения плазменного факела вблизи поверхности образца, с образованием кратера на поверхности, составлял примерно 1,0 Дж/см²). На поверхности металлов был обнаружен оптикопластический эффект, заключающийся в возникновении в результате воздействия в лазерном пятне микровыступа высотой до 1 мкм, являющегося зоной остаточной пластической деформации.

На поверхности {111} монокристаллов германия при воздействии наносекундным УФ-излучением с $E \sim 0,5 \div 1,15$ Дж/см² [2] было обнаружено селективное травление поверхности, соответствующее дислокационным ямкам травления [21]. Схожий эффект наблюдался при воздействии серии лазерных импульсов на поверхность {111} монокристаллов кремния [28].

Ниже рассмотрены результаты исследования воздействия наносекундных УФ-лазерных импульсов на поверхности монокристаллического германия, соответствующие не только кристаллографическим плоскостям $\{111\}$, но и $\{100\}$ и $\{110\}$. Причем были использованы как типовые промышленные образцы с плотностью дислокаций $\sim 10^4 \text{ см}^{-2}$, так и бездислокационные кристаллы.

Образцы и методы исследования

Исследовали дислокационные образцы германия электронного типа проводимости (удельное электрическое сопротивление $\sim 5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$), легированные сурьмой (концентрация сурьмы составляла $\sim 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$). Образцы вырезали из одного монокристалла. Отклонение поверхности образцов от ориентации кристаллографических плоскостей $\{111\}$, $\{110\}$ и $\{100\}$ составляло менее 10 угл. мин. Бездислокационные образцы также вырезали из одного монокристалла и обрабатывали таким же образом. Образцы полировали по обычной оптической технологии [29]. Исходная шероховатость поверхности (до воздействия лазерным излучением) составляла 0,5—0,6 нм.

На поверхность образцов воздействовали сканирующим импульсно-периодическим излучением наносекундного УФ-лазера (длина волны — 355 нм, длительность ~ 10 нс, плотность энергии $\sim 0,5$ — $1,3 \text{ Дж/см}^2$, частота следования импульсов — 100 Гц, расходимость — 1—2 мрад). Методика эксперимента подробно изложена в работах [2, 30]. Излучение фокусировалось на образец кварцевой линзой с фокусным расстоянием 250 мм. Образец располагался на трехкоординатном предметном столике, перемещение которого синхронизировалось с частотой следования лазерных импульсов, что обеспечивалось путем управления экспериментом по заданной программе. Образец пере-

мещался относительно неподвижного лазерного луча по растровой траектории («змейка») так, что соседние пятна перекрывались с коэффициентом перекрытия $\geq 99\%$ (коэффициент перекрытия — это отношение площади, обработанной одним импульсом излучения к площади пятна, обработанного двумя импульсами). При фиксированной плотности энергии обрабатывалась зона размером $\sim 1 \times 4 \text{ мм}^2$. Затем плотность энергии изменялась, и обрабатывался другой участок.

До и после лазерной термообработки поверхности образцы исследовали с помощью оптического профилометра Zygo NewView 7300 и растрового электронного микроскопа (РЭМ) JEOL JSM 6610LV.

Результаты и их обсуждение

В экспериментах первоначально определяли порог появления эрозионного кратера [2, 31] при воздействии на поверхность одиночного импульса лазерного излучения. Он составлял обычно $\sim 1,0$ — $1,3 \text{ Дж/см}^2$. Ранее, в работах [2, 32], были проанализированы отличия пороговых и допороговых повреждений монокристаллов германия излучением наносекундного УФ-лазера. Ниже рассмотрены особенности характера повреждения поверхностей, соответствующих различным кристаллографическим плоскостям ($\{111\}$, $\{110\}$, $\{100\}$), монокристаллов промышленного германия наносекундными импульсами УФ-лазера допороговой интенсивности. Помимо этого, впервые сопоставлены данные о допороговых повреждениях типовых дислокационных и бездислокационных кристаллов.

Подтверждено, что в дислокационных образцах германия на плоскости $\{111\}$ возможно создание режима воздействия излучения, приводящего к формированию ямок травления. Внешне они идентичны дислокационным ямкам, выявляемым при селективном химическом травлении [21],

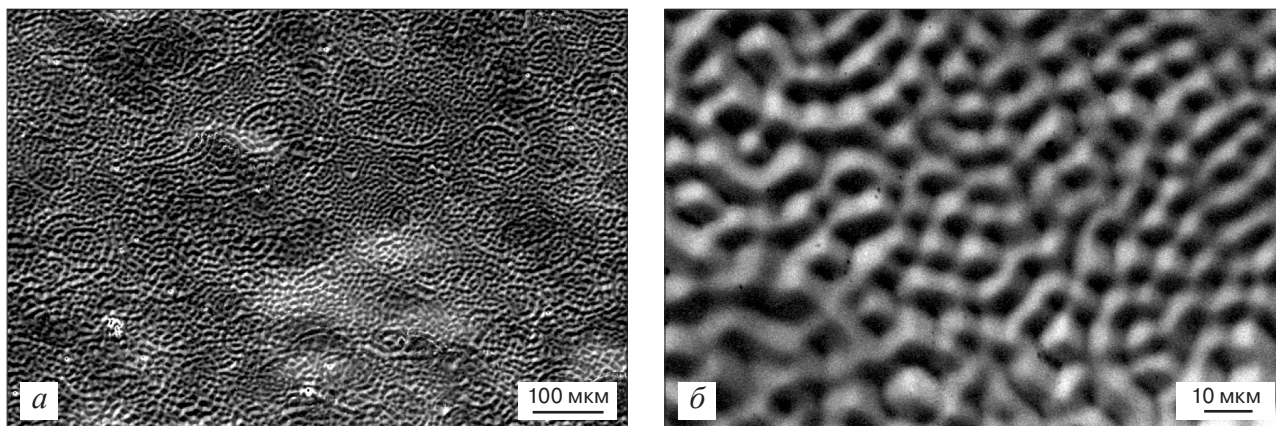


Рис. 1. РЭМ-изображения структуры поверхности $\{111\}$ Ge после воздействия наносекундным излучением УФ-лазера с плотностью энергии $E = 1,14 \text{ Дж/см}^2$: а — увеличение $\times 150$; б — $\times 1000$

Fig. 1. SEM images of the structure of the $\{111\}$ Ge surface after exposure to nanosecond UV laser radiation with an energy density $E = 1.14 \text{ J/cm}^2$: (a) $\times 150$; (б) $\times 1000$

и их концентрация по порядку величины соответствует плотности дислокаций. Режим лазерного травления германия наблюдался в достаточно узком интервале плотностей энергии (при $E \sim 0,5-1,15$ Дж/см²) [2, 32]. Оптимальное значение E , когда вся облученная область покрывалась полностью зоной травления, а ямки травления визуально различались на микрофотографиях, было еще меньше ($0,8-1,25$ Дж/см², рис. 1).

Впервые обнаружено, что на плоскости {100} также возникали картины травления, явно имеющие кристаллографическую природу (рис. 2). Однако, если на плоскости {111} картины лазерного травления имели вид семейства трехгранных углублений, то на плоскости {100} они приобретали вид разнообразных четырехгранных пирамидальных образований неправильной формы.

При плотности энергии воздействующего излучения $\sim 0,4$ Дж/см² на всех поверхностях дислокационного и бездислокационного германия, соответствующих исследованным плоскостям {111}, {100}, {110}, появлялись отдельные пятна размером ~ 50 мкм, а также отдельные микрократеры размером $\sim 0,1-1$ мкм (рис. 3, а и рис. 4).

Конфигурация этих пятен на поверхности бездислокационного германия (см. рис. 3, а) прак-

тически не зависела от ориентации образца, хотя следует отметить, что на поверхности {110} они были наименее выраженными. На рис. 4 приведены типичные РЭМ-микрофотографии внешнего вида этих дефектов на поверхности {110} в зависимости от плотности энергии лазерного излучения. Характерный размер этих пятен составлял $\sim 50-100$ мкм. С ростом плотности энергии расстояние между пятнами уменьшалось, и в дальнейшем они перекрывали друг друга, создавая зону сплошных повреждений (рис. 3, б—г).

Влияние кристаллографической ориентации и плотности дислокаций на форму пятен на поверхности и особенности их структуры практически не сказывалось. Эти результаты зафиксированы на всех кристаллах всех трех ориентаций.

При анализе профилограмм пятен (рис. 5), полученных в результате воздействия наносекундными импульсами УФ-лазера с плотностью энергии $\sim 0,4$ Дж/см² (см. рис. 3, а), обнаружено, что внешний ободок пятна несколько выше, чем окружающая поверхность, а центральная зона чуть ниже.

Плотность таких пятен на поверхности {110} кристаллов с дислокациями, как и на всех бездислокационных образцах, с увеличением энергии

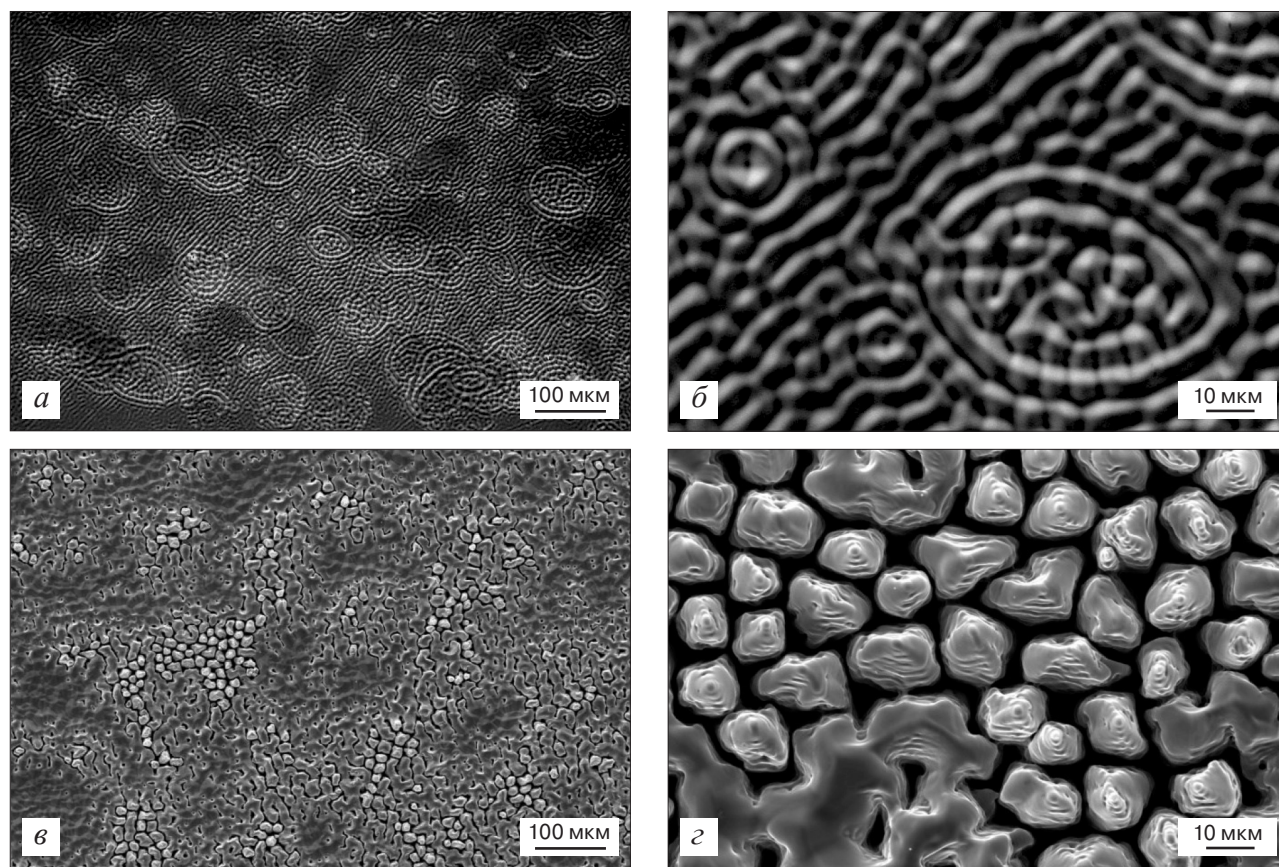


Рис. 2. РЭМ-изображение структуры поверхности {100} Ge после воздействия наносекундным излучением УФ-лазера: а — увеличение $\times 150$, $E = 1$ Дж/см²; б — $\times 1000$, $E = 1$ Дж/см²; в — $\times 150$, $E = 1,3$ Дж/см²; г — $\times 1000$, $E = 1,3$ Дж/см²

Fig. 2. SEM image of the {100} Ge surface structure after exposure to nanosecond UV laser radiation: (a) $\times 150$, $E = 1$ J/cm²; (б) $\times 1000$, $E = 1$ J/cm²; (в) $\times 150$, $E = 1.3$ J/cm²; (г) $\times 1000$, $E = 1.3$ J/cm²

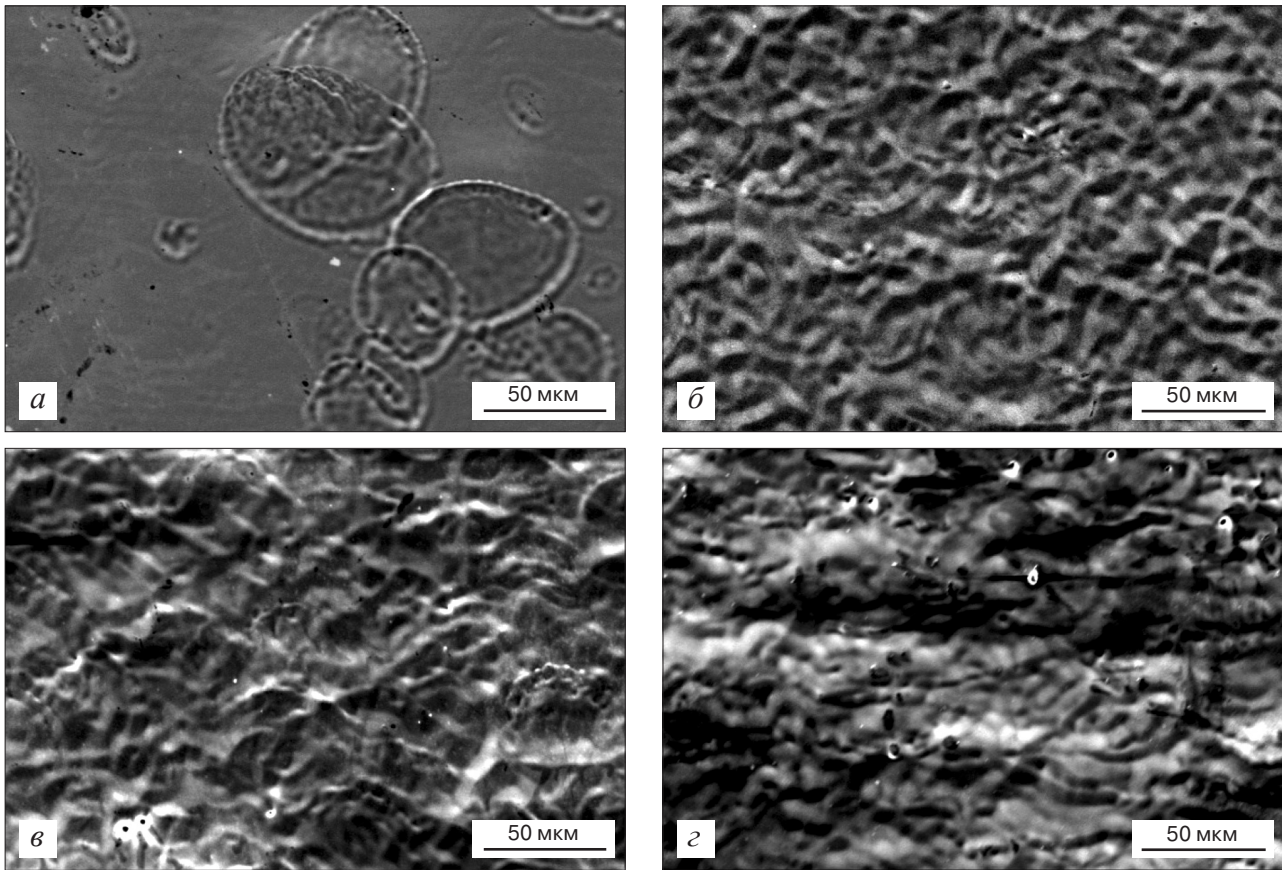


Рис. 3. РЭМ-изображения ($\times 500$) структуры поверхности $\{111\}$ бездислокационного Ge после воздействия наносекундным излучением УФ-лазера с различной плотностью энергии E , Дж/см²: а — 0,4; б — 0,85; в — 0,95; г — 1,23

Fig. 3. SEM images ($\times 500$) of the $\{111\}$ surface structure of dislocation-free Ge after exposure to nanosecond UV laser radiation with different energy densities E , J/cm²: (a) 0.4; (б) 0.85; (в) 0.95; (г) 1.23

воздействующего излучения возрастала, пятна становились более отчетливыми, но режим селективного травления с формированием характерных структур, имеющих кристаллографическое происхождение, так и не устанавливался.

На рис. 3 на примере бездислокационного образца с ориентацией $\{111\}$ показана динамика развития зоны повреждений при увеличении плотности энергии излучения. Анализ качества поверхности образцов, обработанных сканирующим пучком лазерного излучения, показал, что шероховатость поверхности S_a прямо пропорциональна плотности энергии лазерных импульсов. На рис. 6 сопоставлены зависимости шероховатости поверхности образцов с ориентацией $\{111\}$ от плотности энергии воздействующего лазерного излучения. Эти зависимости идентичны для всех шести образцов и носят линейный характер.

Оптический пробой в твердых телах под действием лазерного излучения начали изучать с момента появления лазеров (начало шестидесятых годов прошлого века), и он исследован очень подробно (см. например, работу [31]). Особое внимание уделялось порогу возникновения оптического пробоя и анализу образующихся при этом поврежденный материала образца (*Optical Damage*). Возникло

стойкое мнение, что основные повреждения материала сопутствуют оптическому пробую. Однако при более внимательном рассмотрении выяснилось, что и при воздействии допороговых значений плотности энергии лазерного излучения в материале мишени возникают необратимые изменения, хотя и гораздо менее заметные. Так, в металлах был обнаружен оптикопластический эффект [3]. Он проявился при воздействии на поверхность металла серии допороговых наносекундных импульсов УФ-лазера с длиной волны 355 нм. В результате на поверхности металла, в области лазерного пятна, возникал микровыступ высотой ~ 1 мкм. В полупроводниковых монокристаллах германия и кремния было обнаружено «сухое» лазерное травление [2, 28, 32]. Также широко известно, что в результате воздействия лазерных импульсов допороговой интенсивности на поверхности многих материалов появляются характерные периодические структуры (*Periodic Nanoripples*) [24, 33].

Нами впервые обнаружено заметное различие в повреждении кристаллографических плоскостей $\{111\}$, $\{110\}$, $\{100\}$ монокристаллов дислокационного германия в результате воздействия наносекундными импульсами УФ-лазера допороговой интенсивности. Помимо этого, впервые сопоставлены данные

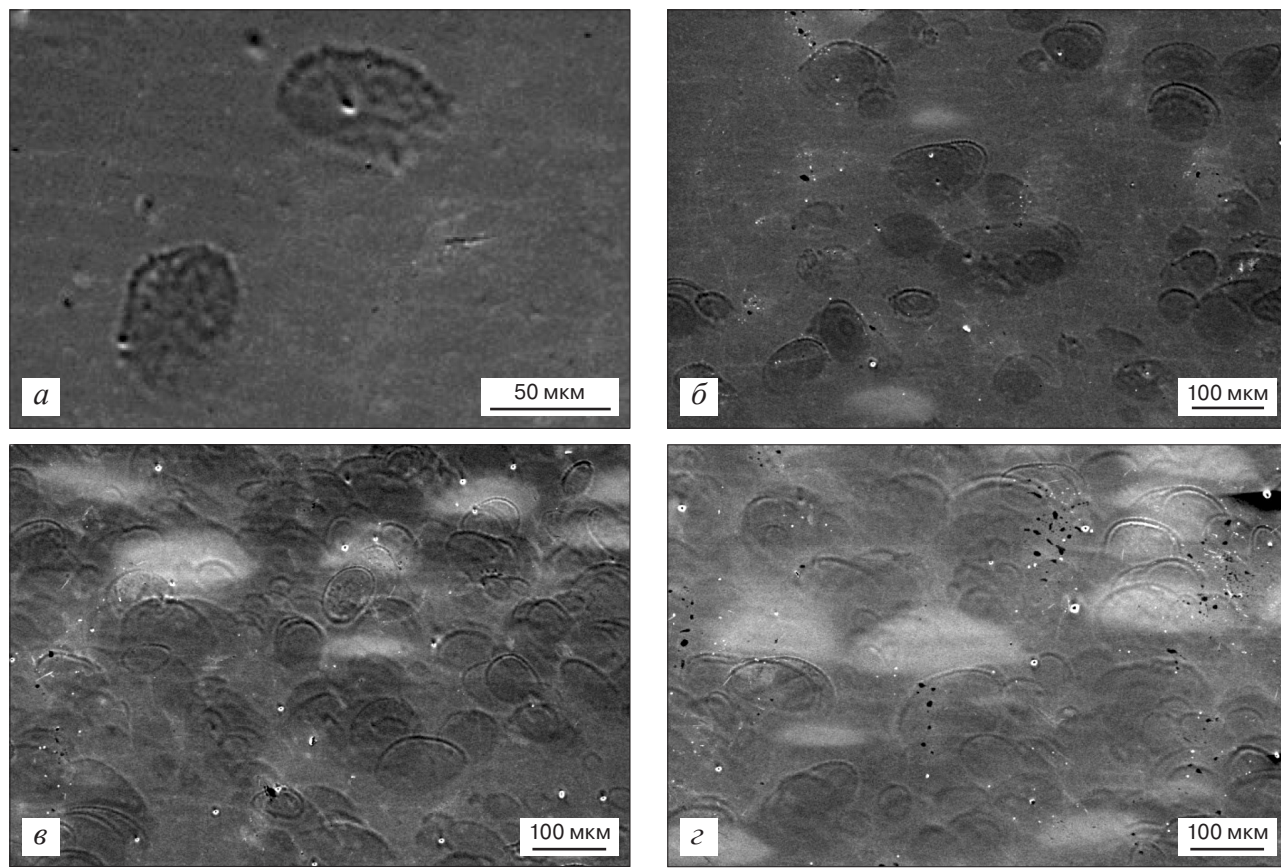


Рис. 4. РЭМ-микрофотографии поверхности {110} германия после воздействия наносекундными импульсами УФ-лазера с различной плотностью энергии E , Дж/см²: а — 0,4; б — 0,55; в — 0,7; г — 0,95; д — 1,15

Fig. 4. SEM micrographs of the {110} surface of germanium after exposure to nanosecond pulses of a UV laser with different energy densities E , J/cm²: (a) 0.4; (б) 0.55; (в) 0.7; (г) 0.95; (д) 1.15

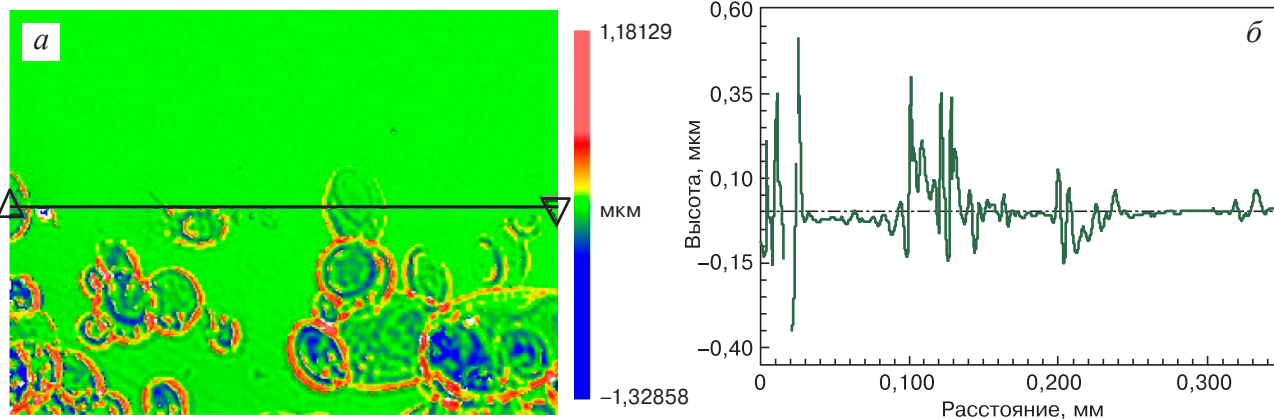
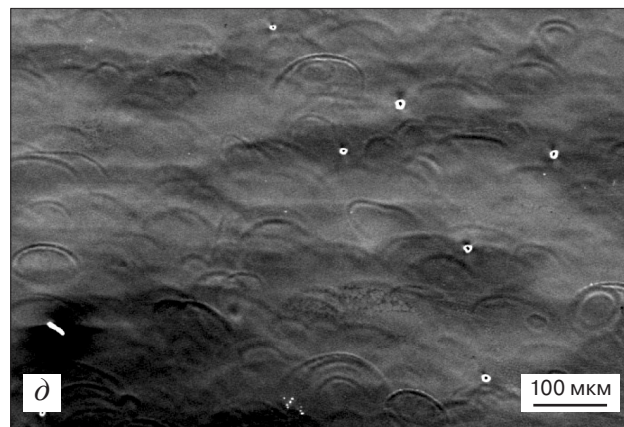


Рис. 5. Изображение поверхности {111} бездислокационного Ge на границе зон 0,29 и 0,46 Дж/см² (а) и профилограмма пятен на 2D-сечении (б): а: «V» — 2D-сечение

Fig. 5. Image of the {111} surface of dislocation-free Ge at the boundary of the 0.29 and 0.46 J/cm² zones (a) and the profilogram of spots on the 2D section (б): a: "V" is the 2D section

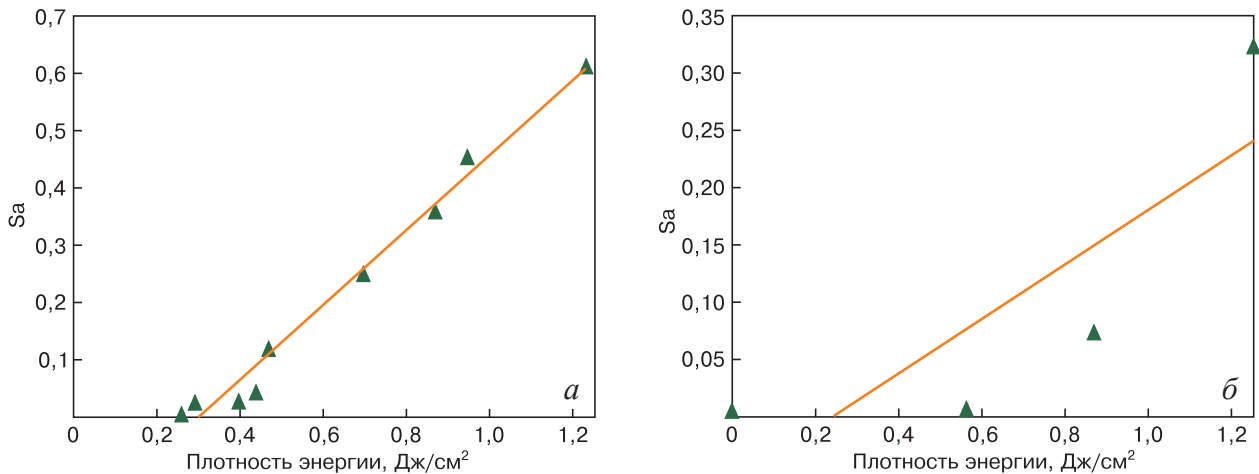


Рис. 6. Зависимости средней шероховатости плоскости {111} по площади Sa от плотности энергии воздействующего наносекундного лазерного излучения для бездислокационного (а) и дислокационного (б) кристалла германия

Fig. 6. Dependences of the average roughness of the {111} plane over the area Sa on the energy density of the acting nanosecond laser radiation for (a) dislocation-free and (b) dislocation germanium crystals

о допороговых повреждениях промышленных дислокационных и бездислокационных кристаллов. Все образцы были приготовлены идентичным образом и облучались в максимально приближенных условиях.

Воздействие на поверхность монокристалла германия лазерным пучком предпороговой мощности приводило к его локальной абляции. Этот эффект прежде всего начинал проявляться при плотности энергии $\sim 0,4$ Дж/см² на дефектах структуры кристалла, которые могут активно поглощать энергию лазерного излучения. В качестве таких дефектов структуры могли выступать не только типичные дефекты кристаллической решетки монокристалла — дислокации, но и дефекты приповерхностного слоя поверхности — структуры, возникшие в результате механической обработки. Германий в зоне такого дефекта локально испарялся и осаждался вблизи, образуя небольшой «бруствер», высотой до $\sim 0,5$ мкм. Последующие импульсы интенсифицировали этот процесс, увеличивая площадь зоны локальной абляции. С увеличением плотности энергии импульсов и их количества вся облученная поверхность приобретала однородный характер (см. рис. 1—4).

На поверхности {111} дислокационного германия при воздействии лазерного излучения при $E \sim 0,8\text{--}1,25$ Дж/см² имели место те же эффекты, о которых сообщалось в ранее опубликованных работах [2, 32]. На РЭМ-микрофотографиях поверхности образцов (см. рис. 1) наблюдалась картина, представляющая собой чередование фигур с правильной трехгранной огранкой. Вследствие селективной абляции на поверхности германия на плоскости {111} формировались трехгранные пирамидальные ямки с остроконечным углублением. С ростом плотности энергии вся облученная область покрывалась полностью зоной трав-

ления, а ямки травления визуально различались на микрофотографиях. Подобные образования, получающиеся при селективном химическом травлении плоскости {111} монокристаллов германия, используются для экспериментального выявления дислокаций и измерения их концентрации [22]. После травления образуется картина правильных трехгранных ямок, хорошо различимых визуально.

На плоскости {100} в таком же германии лазерное травление приводило к образованию разнообразных четырехгранных пирамидальных образований неправильной формы. Эти ямки, как и трехгранные пирамидальные ямки на плоскости {111}, были образованы сингулярными для германия гранями {111}. Грани {111} обладают минимальной поверхностной энергией и формируют микро- и макроструктуру поверхности. В результате воздействия лазерного луча удаляются (испаряются) атомы Ge, соответствующие другим кристаллографическим плоскостям, из-за более высокой поверхностной энергии; с увеличением плотности энергии излучения, а также благодаря накоплению эффекта при воздействии последующих импульсов, ямки углубляются и расширяются.

Характерные размеры ямок свидетельствуют о большой скорости протекания процесса. Формируются поверхности, имеющие четкую морфологию при отсутствии следов затвердевшего расплава. Это происходит с участием небольшой толщины приповерхностного слоя образца; глубина формирования измененного слоя составляет менее 10—15 мкм; в работе [23] измененный слой и концентрация дефектов в нем оценивается как 30 мкм (поверхностный слой в данной работе подвергался плавлению). Скорость формирования плоских граней в ямках оценивается авторами $\sim 0,1\text{--}0,3$ м/с. Это на несколько порядков выше, чем скорость

формирования граней при росте монокристаллов германия [34].

Концентрация ямок травления на поверхности $\{111\}$, как и в работах [2, 23, 32], составила $(3\text{—}5) \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$, что несколько выше, чем плотность дислокаций в исследуемых монокристаллах германия, определенная по стандартной методике. В процессе воздействия лазерного излучения в образце происходила генерация дополнительных структурных дефектов, в связи с чем могла наблюдаться повышенная концентрация ямок травления.

Влияние ориентации кристалла на возможность выявления дислокаций как в случае химического травления, так и в случае «сухого» лазерного воздействия в значительной степени определяется анизотропией поверхностной энергии. Для понимания путей роста, или абляции, кристаллов и анализа любых структурных превращений, имеющих место на поверхности в результате каких-либо внешних воздействий, необходимо знание зависимости поверхностной энергии монокристалла от ориентации грани. Поверхностные энергии разных граней Ge отличаются друг от друга из-за различия в плотности упаковки атомов и количества оборванных связей на поверхности. Грани, которые являются сингулярными, имеют минимальную поверхностную энергию. Для германия это грани $\{111\}$ — $1,053 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/см}^2$, грани $\{110\}$ — $1,260 \times 10^{-4} \text{ Дж/см}^2$, $\{100\}$ — $1,271 \cdot 10^{-4} \text{ Дж/см}^2$ [35].

Заключение

Сопоставлены результаты воздействия наносекундного УФ-лазерного излучения на образцы дислокационного и бездислокационного германия для трех основных кристаллографических плоскостей — $\{111\}$, $\{110\}$, $\{100\}$. Получена картина «сухого» травления дислокационных образцов германия на плоскостях $\{111\}$ и $\{100\}$. Вследствие селективной абляции на поверхности дислокационного германия, соответствующей плоскости $\{111\}$, формировались трехгранные пирамидальные ямки с остроконечным углублением. На плоскости $\{100\}$ в таком же германии лазерное травление приводило к образованию разнообразных четырехгранных пирамидальных образований неправильной формы. Эти ямки, как и трехгранные пирамидальные ямки на плоскости $\{111\}$, были образованы сингулярными для германия гранями $\{111\}$. На плоскости $\{110\}$ дислокационного германия, как и на всех бездислокационных образцах, не удалось получить регулярную картину травления, которую можно было бы связать с кристаллографической структурой Ge.

Полученные результаты представляют интерес, так как демонстрируют возможность «сухого» травления дислокационных кристаллов германия в целях определения плотности дислокаций без использования химических реагентов, т. е. менее вредным с экологической точки зрения способом.

Библиографический список

1. Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д. Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика); под ред. В.П. Вейко. Ч. 1. Поглощение лазерного излучения в веществе. СПб.: СПбГУ ИТМО; 2008. 141 с.
2. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Роголин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., Ямщиков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. Лазерное травление германия. *Письма в ЖТФ*. 2021; 47(14): 18—23. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.14.51181.18724>
3. Малинский Т.В., Роголин В.Е. Предпороговые эффекты при воздействии ультрафиолетовых лазерных импульсов на медь и ее сплавы. *Журнал технической физики*. 2022; 92(2): 268—273. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.02.52016.225-21>
4. Murzin S.P., Balyakin V.B., Gachot C., Fomchenkov S.A., Blokhin M.V., Kazanskiy N.L. Ultraviolet nanosecond laser treatment to reduce the friction coefficient of silicon carbide ceramics. *Applied Sciences*. 2021; 11(24): 11906. <https://doi.org/10.3390/app112411906>
5. Хомич В.Ю., Шмаков В.А. Механизмы и модели прямого лазерного наноструктурирования материалов. *Успехи физических наук*. 2015; 185(5): 489—499. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0185.201505c.0489>
6. Хомич В.Ю., Шмаков В.А. Образование периодических наноразмерных структур на поверхности твердых тел при фазовых и структурных превращениях. *Доклады РАН*. 2012; 446(3): 276—278.
7. Бронников К.А. Формирование лазерно-индуцированных периодических поверхностных структур на пленках металлов и полупроводников. Дисс. канд. физ.-мат. наук. Новосибирск; 2022. 106 с.
8. Iqbal M.H., Bashir S., Rafique M.S., Dawood A., Akram M., Mahmood K., Hayat A., Ahmad R., Hussain T., Mahmood A. Pulsed laser ablation of germanium under vacuum and hydrogen environments at various fluences. *Applied Surface Science*. 2015; 344: 146—158. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.117>
9. Manoj K., Mavi H.S., Rath S., Shukla A.K., Vankar V.D. Fabrication of nanopatterned germanium surface by laser-induced etching: AFM, Raman and PL studies. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2008; 40(9): 2904—2910. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2008.02.007>
10. Чумаков А.Н., Лычковский В.В., Никончук И.С., Мацукович А.С. Абляция кремния в воздухе моно- и бихроматическими импульсами лазерного излучения с длинами волн 355 и 532 nm. *Журнал технической физики*. 2022; 92(1): 36—44. <https://doi.org/10.21883/JTF.2022.01.51849.202-21>
11. Bosi M., Atolini G. Germanium: Epitaxy and its application. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2010; 56(3–4): 146—174. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2010.09.002>
12. Каплунов И.А., Роголин В.Е. Оптические свойства и области применения германия в фотонике. *Фотоника*. 2019; 13(1): 88—106. <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.1.88.106>

13. Кортаев В.В., Мельников Г.С., Михеев С.В., Самков В.М., Солдатов Ю.И. Основы тепловидения. СПб.: НИУ ИТМО; 2012. 122 с.
14. Shimanskii A.F., Gorodishcheva A.N., Kopytkova S.A., Kulakovskaya T.V. Thermal stability of the properties of germanium crystals for IR optics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1353(1): 12062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012062>
15. Mashanovich G.Z., Mitchell C.J., Penades J.S., Ali Z., Khokhar A.Z., Littlejohns C.G., Cao W., Qu Zh., Stanković S., Gardes F.Y., Masaud T.B., Chong H.M., Mittal V., Murugan G.S., James S., Wilkinson J.S., Peacock A.C., Nedeljkovic M. Germanium mid-infrared photonic devices. *Journal of Lightwave Technology*. 2017; 35(4): 624—630. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2632301>
16. Молчанов В.Я., Китаев Ю.И., Колесников А.И., Нарвер В.Н., Розенштейн А.З., Солодовников Н.П., Шаповаленко К.Г. *Теория и практика современной акустооптики*. М.: МИСиС; 2015. 459 с.
17. Ordu M., Guo J., Pack G.Ng., Shah P., Ramachandran S., Hong M.K., Ziegler L.D., Basu S.N., Erramilli S. Nonlinear optics in germanium mid-infrared fiber material: Detuning oscillations in femtosecond mid-infrared spectroscopy. *AIP Advances*. 2017; 7(9): 095125. <https://doi.org/10.1063/1.5003027>
18. Depuydt B., Theuwis A., Romandic I. Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2006; 9(4–5): 437—443. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.08.002>
19. Claeys L., Simoen E., eds. Germanium-based technologies: from materials to devices. 1st ed. Berlin: Elsevier; 2007. 480 p. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70279-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70279-1)
20. Malinskiy T.V., Zheleznov V.Yu., Rogalin V.E., Kaplunov I.A. Experimental study of the influence of laser radiation power on the reflection coefficient of germanium and silicon at a wavelength of 355 nm. *Journal of Physics Conference Series*. 2021; 2103(1): 012154. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012154>
21. Бублик В.Т., Дубровина А.Н. Методы исследования структуры полупроводников и металлов. М.: Металлургия; 1978. 272 с.
22. Воронов В.В., Долгаев С.И., Лаврищев С.В., Лялин А.А., Смакин А.В., Шафеев Г.А. Формирование конических микроструктур при импульсном лазерном испарении твердых тел. *Квантовая электроника*. 2000; 30(8): 710—714.
23. Гонов С.Ж. Особенности воздействия милли- и наносекундного лазерного излучения на полупроводниковые материалы твердотельной электроники. Дисс. ... канд. техн. наук. Нальчик; 2007. 130 с.
24. Вейко В.П., Дорофеев И.А., Калугина Т.И., Либенсон М.Н., Шандыбина Г.Д. Образование периодических структур на поверхности кремния под действием импульса неодимового лазера миллисекундной длительности. *Письма в ЖТФ*. 1984; 10(1): 15—20.
25. Ивлев Г.Д., Малевич В.Л. Нагрев и плавление монокристаллического германия при наносекундном лазерном воздействии. *Квантовая электроника*. 1988; 15(12): 2584—2586.
26. Ehrhardt M., Lorenz P., Bauer J., Heinke R., Hosain M.A., Han B., Zimmer K. Dry etching of germanium with laser induced reactive micro plasma. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2021; 8(3): 237—255. <https://doi.org/10.1007/s40516-021-00147-1>
27. Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. Под ред. Дж. М. Поуга, Г. Фоти, Д.К. Джекобсона; пер. с англ. Под ред. А.А. Углова. М.: Машиностроение; 1987. 424 с.
28. Ашиккалиева К.Х., Каныгина О.Н. Формирование периодических структур на поверхности монокристаллического кремния при импульсном лазерном воздействии. *Деформация и разрушение материалов*. 2012; (5): 12—15.
29. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. Справочник технолога-оптика. 2-е изд. СПб.: Политехника; 2004. 679 с.
30. Mikolutskiy S.I., Khasaya R.R., Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A. Formation of various types of nanostructures on germanium surface by nanosecond laser pulses. *Journal of Physics Conference Series*. 2018; 987: 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/987/1/012007>
31. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С., Ходыко Ю.В. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука; 1970. 272 с.
32. Железнов В.Ю., Малинский Т.В., Миколуцкий С.И., Рогалин В.Е., Филин С.А., Хомич Ю.В., Ямщицков В.А., Каплунов И.А., Иванова А.И. Модификация поверхности германия при воздействии излучения наносекундного ультрафиолетового лазера. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники*. 2020; 23(3): 203—212. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2020-3-203-212>
33. Конов В.И., Прохоров А.М., Сычугов В.А., Тищенко А.И., Токарев И.Н. Пространственно-временная эволюция периодических структур, индуцированных на поверхность облученных лазером твердых образцов. *Журнал технической физики*. 1983; 53(11): 2238—2286.
34. Каплунов И.А., Колесников А.И., Иванова А.И., Подкопаев О.И., Третьяков С.А., Гречишкин Р.М. Микроморфология поверхности монокристаллических слитков германия, выращенных из расплава. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2015; (6): 89—94. <https://doi.org/10.7868/S0207352815060128>
35. Гадияк Г.В., Карпушин А.А., Кушкова А.С., Морозов Ю.Н., Репинский С.М., Шкляев А.А. Диаграмма Вульфа для поверхностей кремния и германия. *Квантовохимический расчет. Поверхность. Физика, химия, механика*. 1988; (3): 23—28.

References

1. Libenson M.N., Yakovlev E.B., Shandybina G.D. Interaction of laser radiation with matter (power optics). Pt 1. Absorption of laser radiation in matter [Veiko V.P., ed.]. St. Petersburg: ITMO; 2008. 141 p. (In Russ.)
2. Zheleznov V.Yu., Malinskiy T.V., Mikolutskiy S.I., Rogalin V.E., Filin S.A., Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A., Kaplunov I.A., Ivanova A.I. Laser etching of Germanium. *Technical Physics Letters*. 2021; 47(10): 734—736. <https://doi.org/10.1134/S1063785021070282>
3. Malinskiy T.V., Rogalin V.E. Prethreshold effects, when copper and its alloys were impacted to ultraviolet la-

- ser pulses. *Technical Physics*. 2022; 92(2): 211—215. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.02.52950.225-21>
4. Murzin S.P., Balyakin V.B., Gachot C., Fomchenkov S.A., Blokhin M.V., Kazanskiy N.L. Ultraviolet nanosecond laser treatment to reduce the friction coefficient of silicon carbide ceramics. *Applied Sciences*. 2021; 11(24): 11906. <https://doi.org/10.3390/app112411906>
 5. Khomich V.Y., Shmakov V.A. Mechanisms of direct laser nanostructuring of materials. *Physics–Uspekhi*. 2015; 58(5): 455—465. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0185.201505c.0489>
 6. Khomich V.Yu., Shmakov V.A. Formation of periodic nanodimensional structures on the surface of solids during phase and structural transformations. *Doklady Physics*. 2012; 57(9): 349—351.
 7. Bronnikov K.A. Formation of laser-induced periodic surface structures on films of metals and semiconductors. Diss. Cand. Sci. (Phys.–Mat.). Novosibirsk; 2022. 106 p. (In Russ.)
 8. Iqbal M.H., Bashir S., Rafique M.S., Dawood A., Akram M., Mahmood K., Hayat A., Ahmad R., Hussain T., Mahmood A. Pulsed laser ablation of germanium under vacuum and hydrogen environments at various fluences. *Applied Surface Science*. 2015; 344: 146—158. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.117>
 9. Manoj K., Mavi H.S., Rath S., Shukla A.K., Vankar V.D. Fabrication of nanopatterned germanium surface by laser-induced etching: AFM, Raman and PL studies. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. 2008; 40(9): 2904—2910. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2008.02.007>
 10. 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 532 nm. *Technical Physics*. 2022; 92(1): 16—24. <https://doi.org/10.21883/TP.2022.01.52527.202-21>
 11. Bosi M., Atolini G. Germanium: Epitaxy and its application. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 2010; 56(3–4): 146—174. <https://doi.org/10.1016/j.pcrysgrow.2010.09.002>
 12. Kaplunov I.A., Rogalin V.E. Optical properties and application of germanium in photonics. *Photonics Russia*. 2019; 13(1): 88—106. <https://doi.org/10.22184/FRos.2019.13.1.88.106>
 13. Korotaev V.V., Mel'nikov G.S., Mikheev S.V., Samkov V.M., Soldatov Yu.I. Fundamentals of thermal imaging. St. Petersburg: ITMO; 2012. 122 p. (In Russ.)
 14. Shimanskii A.F., Gorodishcheva A.N., Kopytkova S.A., Kulakovskaya T.V. Thermal stability of the properties of germanium crystals for IR optics. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019; 1353(1): 12062. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1353/1/012062>
 15. Mashanovich G.Z., Mitchell C.J., Penades J.S., Ali Z., Khokhar A.Z., Littlejohns C.G., Cao W., Qu Zh., Stanković S., Gardes F.Y., Masaud T.B., Chong H.M., Mittal V., Murugan G.S., James S., Wilkinson J.S., Peacock A.C., Nedeljkovic M. Germanium mid-infrared photonic devices. *Journal of Lightwave Technology*. 2017; 35(4): 624—630. <https://doi.org/10.1109/JLT.2016.2632301>
 16. Molchanov V.Ya., Kitaev Yu.I., Kolesnikov A.I., Narver V.N., Rozenshtein A.Z., Solodovnikov N.P., Shapovalenko K.G. Theory and practice of modern acousto-optics. Moscow: MISiS; 2015. 459 p. (In Russ.)
 17. Ordu M., Guo J., Pack G. Ng, Shah P., Ramachandran S., Hong M.K., Ziegler L.D., Basu S.N., Erramilli S. Nonlinear optics in germanium mid-infrared fiber material: Detuning oscillations in femtosecond mid-infrared spectroscopy. *AIP Advances*. 2017; 7(9): 095125. <https://doi.org/10.1063/1.5003027>
 18. Depuydt B., Theuwis A., Romandic I. Germanium: From the first application of Czochralski crystal growth to large diameter dislocation-free wafers. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 2006; 9(4–5): 437—443. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2006.08.002>
 19. Claeys L., Simoen E., eds. Germanium-based technologies: from materials to devices. 1st ed. Berlin: Elsevier; 2007. 480 p. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(07\)70279-1](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(07)70279-1)
 20. Malinskiy T.V., Zheleznov V.Yu., Rogalin V.E., Kaplunov I.A. Experimental study of the influence of laser radiation power on the reflection coefficient of germanium and silicon at a wavelength of 355 nm. *Journal of Physics Conference Series*. 2021; 2103(1): 012154. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2103/1/012154>
 21. Bublik V.T., Dubrovina A.N. Methods of studying the structure of semiconductors and metals. Moscow: Metallurgiya; 1978. 272 p. (In Russ.)
 22. Voronov V.V., Dolgaev S.I., Lavrishchev S.V., Lyalin A.A., Simakin A.V., Shafeev G.A. Formation of conic microstructures upon pulsed laser evaporation of solids. *Quantum Electronics*. 2000; 30(8): 710—714. <https://doi.org/10.1070/QE2000v030n08ABEH001795>
 23. Gonov S.Zh. Features of the impact of milli- and nanosecond laser radiation on semiconductor materials of solid-state electronics. Diss. Cand. Sci. (Eng.). Nalchik; 2007. 130 p. (In Russ.)
 24. Veiko V.P., Dorofeev I.A., Imas Ya.A., Kalugina T.I., Libenson M.N., Shandybina G.D. Formation of periodic structures on a silicon surface under the effect of millisecond duration pulse deodmium lasers. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoi fiziki*. 1984; 10(1): 15—20.
 25. Ivlev G.D., Malevich V.L. Heating and melting of single-crystal germanium by nanosecond laser pulses. *Soviet Journal of Quantum Electronics*. 1988; 18(12): 1626—1627. <https://doi.org/10.1070/QE1988v018n12ABEH012781>
 26. Ehrhardt M., Lorenz P., Bauer J., Heinke R., Hosain M.A., Han B., Zimmer K. Dry etching of germanium with laser induced reactive micro plasma. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2021; 8(3): 237—255. <https://doi.org/10.1007/s40516-021-00147-1>
 27. Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C., eds. Surface modification and alloying by laser, ion and electron beams. NY: London: Plenum Press; 1983. 424 p. (Russ. transl.: Poate J.M., Foti G., Jacobson D.C., eds. Modifikirovaniye i legirovaniye poverkhnosti lazernymi, ionnymi i elektronnyimi puchkami. NY: London: Plenum Press; 1983. 424 p.)
 28. Ashikkalieva K.H., Kanygina O.N. Formation of periodic structures on the surface of single-crystal silicon under pulsed laser action. *Deformatsiya i razrusheniye materialov*. 2012; (5): 12—15. (In Russ.)
 29. Okatov M.A., Antonov E.A., Baigozhin A. Handbook of the optical technologist. St. Petersburg: Politekhnik; 2004. 679 p. (In Russ.)
 30. Mikolutskiy S.I., Khasaya R.R., Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A. Formation of various types of nanostructures on germanium surface by nanosecond laser pulses. *Journal of Physics Conference Series*. 2018; 987: 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/987/1/012007>
 31. Anisimov S.I., Imas Ya.A., Romanov G.S., Khodyko Yu.V. The effect of high-power radiation on metals. Moscow: Nauka; 1970. 272 p. (In Russ.)

32. Zhelezov V.Yu., Malinskiy T.V., Mikolutskiy S.I., Rogalin V.E., Filin S.A., Khomich Yu.V., Yamshchikov V.A., Kaplunov I.A., Ivanova A.I. Modification of germanium surface exposed to radiation of a nanosecond ultraviolet laser. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Materialy Elektronnoi Tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2020; 23(3): 203—212. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2020-3-203-212>

33. Konov V.I., Prokhorov A.M., Sichugov V.A., Tischenko A.V., Tokarev V.N. Time and space evolution of the periodic structures induced onto the surface of laser-irradiated solid samples. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*; 1983; 53(12): 2238—2242. (In Russ.)

34. Kaplunov I.A., Kolesnikov A.I., Ivanova A.I., Podkopaev O.I., Tretiakov S.A., Grechishkin R.M. Surface micromorphology of germanium single crystal boules grown from melt. *Journal of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2015; 9(3): 630—635. <https://doi.org/10.1134/S102745101503026X>

35. Gadiyak G.V., Karpushin A.A., Kushkova A.S., Morokov Yu.N., Repinsky S.M., Shklyaev A.A. Wulf diagram for silicon and germanium surfaces. Quantum-chemical calculation. *Poverkhnost'. Fizika, khimiya, mekhanika*. 1988; (3): 23—28. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Железнов Вячеслав Юрьевич — научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Дворцовая наб., д. 18, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9779-3323>; e-mail: rragrid@gmail.com

Малинский Тарас Владимирович — канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук (Московский филиал), Ленинский просп., д. 32А, Москва, 119334, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5183-1240>; e-mail: tmalinksy@yandex.ru

Рогалин Владимир Ефимович — доктор физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Дворцовая наб., д. 18, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2980-5385>; e-mail: v-rogalin@mail.ru

Хомич Юрий Владиславович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук, Дворцовая наб., д. 18, Санкт-Петербург, 191186, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1614>; e-mail: ykhomich@yandex.ru

Ямщиков Владимир Александрович — член-корреспондент РАН, доктор техн. наук, руководитель направления, Институт электрофизики и электроэнергетики Российской академии наук (Московский филиал), Ленинский просп., д. 32А, Москва, 119334, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4158-6899>; e-mail: rc@iperas.nw.ru

Каплунов Иван Александрович — доктор техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной физики, Тверской государственный университет, ул. Желябова, д. 33, Тверь, 170100, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1726-3451>; e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Иванова Александра Ивановна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры прикладной физики, Тверской государственный университет, ул. Желябова, д. 33, Тверь, 170100, Российская Федерация; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5517-2294>; e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

Vyacheslav Yu. Zhelezov — Researcher, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, 18 Dvortsovaya Emb., St. Petersburg 191186, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9779-3323>; e-mail: rragrid@gmail.com

Taras V. Malinsky — Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Laboratory, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (Moscow Branch), 32A Leninsky Ave., Moscow 119334, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5183-1240>; e-mail: tmalinksy@yandex.ru

Vladimir E. Rogalin — Dr. Sci. (Phys.-Math.), Head of Laboratory, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, 18 Dvortsovaya Emb., St. Petersburg 191186, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2980-5385>; e-mail: v-rogalin@mail.ru

Yury V. Khomich — Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences, 18 Dvortsovaya Emb., St. Petersburg 191186, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1541-1614>; e-mail: ykhomich@yandex.ru

Vladimir A. Yamshchikov — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Head of Direction in the Moscow Branch, Institute of Electrophysics and Electric Power of the Russian Academy of Sciences (Moscow Branch), 32A Leninsky Ave., Moscow 119334, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4158-6899>; e-mail: rc@iperas.nw.ru

Ivan A. Kaplunov — Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief of the Department of Applied Physics, Tver State University, 33 Zhelyabova Str., Tver 170100, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1726-3451>; e-mail: kaplunov.ia@tversu.ru

Alexandra I. Ivanova — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor of the Applied Physic Department, Tver State University, 33 Zhelyabova Str., Tver 170100, Russian Federation; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5517-2294>; e-mail: alex.ivanova33@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.12.2022; поступила после доработки 09.03.2023; принята к публикации 05.06.2023

Received 25 December 2022; Revised 9 March 2023; Accepted 5 June 2023