

Влияние ионно-кластерной бомбардировки на грубо полированную поверхность пластин монокристаллического германия

И.В. Николаев,^{1,*} Н.Г. Коробейщиков,¹ А.В. Лапега¹

¹Новосибирский государственный университет,
физический факультет, отдел прикладной физики,
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2

(Поступила в редакцию 18.03.2024; после доработки 29.03.2024; подписана в печать 01.04.2024)

Исследована обработка поверхности монокристаллического германия ионно-кластерным пучком аргона. Исходная поверхность пластин германия бомбардировалась кластерными ионами аргона с высокой (105 эВ/атом) и низкой (10 эВ/атом) удельной энергией. Используя атомно-силовой микроскоп, получены изображения и проведено сравнение топографии поверхности до и после ионно-кластерной бомбардировки. С помощью функции спектральной плотности мощности шероховатости продемонстрировано сглаживание поверхности в диапазоне пространственных частот: 1) $\nu = 1 - 8 \text{ мкм}^{-1}$ — для высокоэнергетического режима; 2) $\nu = 0.7 - 2.5 \text{ мкм}^{-1}$ — для низкоэнергетического режима.

PACS: 79.20.Rf, 41.75.Ak. УДК: 538.971, 537.534, 544.277.6

Ключевые слова: ионно-кластерный пучок, обработка поверхности, сглаживание поверхности, монокристаллический германий, функция спектральной плотности мощности шероховатости.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.79.2430301

ВВЕДЕНИЕ

Обработка ионно-кластерными пучками является прогрессивно развивающейся технологией для различных практических приложений в микроэлектронике, оптике, биотехнологиях и др. [1–3]. Коллективное взаимодействие атомов каждого кластерного иона с атомами на поверхности мишени приводит к эффективному травлению, осаждению пленок, имплантации, наноструктурированию и сглаживанию поверхности металлов, полупроводников, диэлектриков, оптических и сверхтвердых материалов [1–4]. За счет распыления и смещения атомов мишени преимущественно вдоль поверхности мишени и Ван-дер-Ваальсовых сил между атомами кластера достигается субнанометровый уровень шероховатости поверхности при минимальном повреждении приповерхностной структуры мишени [4–7].

Как известно, коэффициент распыления Y определяется энергией, приходящейся на один атом в кластере, E/N , т.к. распыление мишени при бомбардировке кластерными ионами зависит от отношения кинетической энергии кластеров E к их среднему размеру N [8–10]. В итоге при изменении энергии атома кластера от нескольких единиц до сотен электронвольт коэффициент распыления Y увеличивается практически на 3 порядка — от 0.001 до 1 [8, 9]. Это объясняется тем, что доля кинетической энергии кластерных ионов, переданная атомам мишени, растет с увеличением удель-

ной энергии кластера E/N . Это приводит к резкому увеличению количества выбитых атомов мишени [10, 11]. На основании этого в данной работе были выбраны два кардинально отличающихся режима: высоко- ($E/N = 105 \text{ эВ/атом}$) и низкоэнергетический ($E/N = 10 \text{ эВ/атом}$) режимы обработки с одинаковой дозой облучения — $5.3 \times 10^{15} \text{ ион/см}^2$ (см. табл. 1).

Германий широко используется в различных приложениях радиоэлектроники и оптики, а наибольшее применение германий находит в производстве транзисторов, диодов, оптики тепловизионных камер, линз, оптоволокон и др. [12, 13]. Модификация и диагностика германия для современных приложений остается актуальной задачей в настоящее время. В данной работе исследовано влияние бомбардировки кластерных ионов на топографию поверхности монокристаллического германия с применением функции спектральной плотности мощности (СПМ, power spectral density, PSD) шероховатости. СПМ-функция позволяет оценить эффективную шероховатость поверхности σ_{eff} с учетом латеральных размеров неровностей на поверхности [14–16].

1. ЭКСПЕРИМЕНТ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ

В данной работе бомбардировка поверхности пластин монокристаллического германия проводилась интенсивным несепарированным по размерам кластеров ионно-кластерным пучком аргона. Принципиальная схема экспериментальной установки КЛИУС представлена и кратко описана в ра-

* E-mail: i.nikolaev@nsu.ru

Таблица 1. Главные параметры режимов обработки

Режим обработки	Средний размер кластерных ионов N , атом/кластер	Энергия атома в кластере E/N , эВ/атом	Плотность тока ионно-кластерного пучка j , мкА/см ²	Доза облучения, ион/см ²
1	210	105	0.10	5.3×10^{15}
2	1000	10	0.45	

боте [14]. Для удаления атомарных ионов Ag^+ и небольших кластерных ионов ($N < 10$ атомов) из ионно-кластерного пучка использовался дефлектор на постоянных магнитах (магнитный сепаратор) с индукцией магнитного поля 0.6 Тл. Методика определения среднего размера кластерных ионов N описана в работе [8]. Бомбардировка выполнялась при падении кластерных ионов под углом 0° от нормали к поверхности мишени. Поверхность исходных образцов отполирована механическим методом.

Измерения топографии поверхности образцов проводились с помощью атомно-силового микроскопа (АСМ) NTEGRA Prima HD (NT-MDT) в полуконтактном режиме. Использовались высокоточные АСМ-зонды ETALON HA_NC (NT-MDT) с радиусом закругления менее 10 нм. Обзорные АСМ-изображения размером 100×100 мкм были получены с пространственным разрешением 512×512 пикселей, остальные размеры области сканирования (2×2 , 10×10 , 40×40 мкм) получены с разрешением 1024×1024 пикселей. Для повышения достоверности данных топографии поверхности АСМ-измерения проводились в нескольких областях поверхности мишени. Для формирования границы области обработки использовалась маска, прикрывающая часть поверхности образца. Глубина травления определялась как величина перепада высот на границе исходной и обработанной областей. Были измерены по две области на левой и правой границах области обработки размером 100×100 мкм. Значения глубины травления усреднялись по трем измерениям в каждой области. В данной работе глубина травления составила 420 и 160 нм для высоко- и низкоэнергетического режимов соответственно. Средние скорости травления поверхности монокристаллического Ge составили 3 и 5 нм/мин в режимах 1 и 2 соответственно.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 1 представлены 2D АСМ-изображения поверхности монокристаллического германия до и после ионно-кластерной бомбардировки. Как видно из рис. 1, после ионно-кластерной обработки сохраняется характерный вид борозд от механической полировки. Тем не менее на масштабе 10×10 мкм максимальный перепад высот R_t снижается на 22.5% после режима 1 и на 34% после режима 2 по сравнению с исходной поверхностью. После обработки

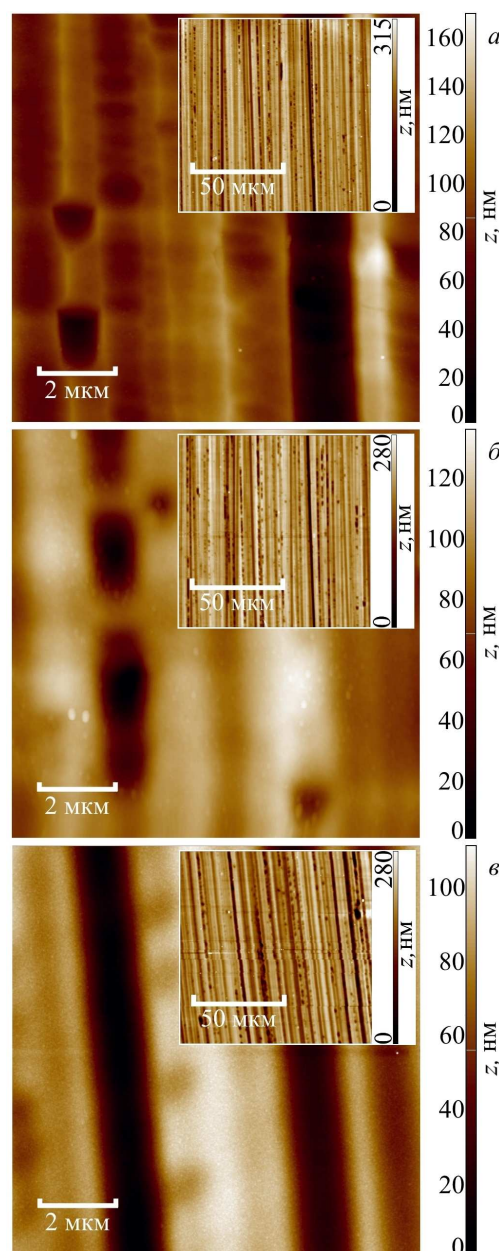


Рис. 1. АСМ-изображения поверхности монокристаллического германия при размерах области сканирования 10×10 и 100×100 (вставки) мкм: *a* — исходная поверхность, *b* — после обработки в режиме 1, *в* — после обработки в режиме 2

борозды становятся менее резкими на АСМ-изображениях, что также свидетельствует о сглаживании, т.к. граница перехода между каждой бороздой ста-

новится более плавной. На малых масштабах сканирования (2×2 мкм) поверхность монокристаллического германия становится мелкозернистой после ионно-кластерной бомбардировки в обоих режимах обработки (рис. 2). Данное явление может быть связано с наноструктурированием поверхности германия, наблюдаемом в работах [17, 18] после обработки германия мономерными ионами при нормальном угле падения ионов к поверхности. В работах [17, 18] продемонстрировано, что вид наноструктурирования поверхности германия сильно различается в зависимости от энергии ионов, дозы облучения и температуры мишени. Отмечено, что увеличение температуры мишени способствует наноструктурированию поверхности при обработке мономерными ионами. Известно, что коллективное взаимодействие атомов каждого кластерного иона с атомами на поверхности мишени сопровождается высоким локальным энерговыделением. Как результат, происходит резкий локальный нагрев материала мишени в области взаимодействия [1, 3], что также может способствовать наноструктурированию поверхности германия при нормальном угле падения кластеров.

Для исходной и обработанных поверхностей монокристаллического германия были построены обобщенные СПМ-функции (рис. 3). Для этого были получены СПМ-функции на каждом размере области сканирования (2×2 , 10×10 , 40×40 , 100×100 мкм), из которых строилась одна обобщенная СПМ-функция, как это показано в работе [14]. СПМ-функции были вычислены вдоль оси X — практически перпендикулярно направлению борозд от механической полировки. Обобщенная СПМ-функция позволяет корректно оценить шероховатость поверхности мишени в широком диапазоне латеральных размеров неровностей, в нашем случае от 10 нм до 50 мкм. Как видно из рис. 3, для высокоэнергетического режима наблюдается снижение СПМ-функции в диапазоне пространственных частот $\nu = 1 - 8$ мкм $^{-1}$, что соответствует сглаживанию неровностей на поверхности мишени с латеральным размером от 1 мкм до 125 нм. Для низкоэнергетического режима диапазон снижения — $\nu = 0.7 - 2.5$ мкм $^{-1}$, что соответствует латеральному размеру неровностей от 1.4 мкм до 400 нм. Для пространственных частот ν от 14 до 35 мкм $^{-1}$ (неровности размером 30–70 нм) при высокоэнергетическом режиме и от 5 до 35 мкм $^{-1}$ (30–200 нм) при низкоэнергетическом режиме наблюдается небольшой рост СПМ-функции, что отражает указанный выше эффект формирования мелкозернистой топографии поверхности (рис. 2). В нашем случае нет ярко выраженных СПМ-пииков, что говорит о том, что как у борозд от механической полировки, так и у мелкозернистой топографии нет определенной частоты (периода).

Ранее мы показали, что для исходно сверхгладких образцов (среднеквадратичная шероховатость $R_q \leq 1$ нм) ионно-кластерная бомбардировка приводит к сглаживанию поверхности различных ма-

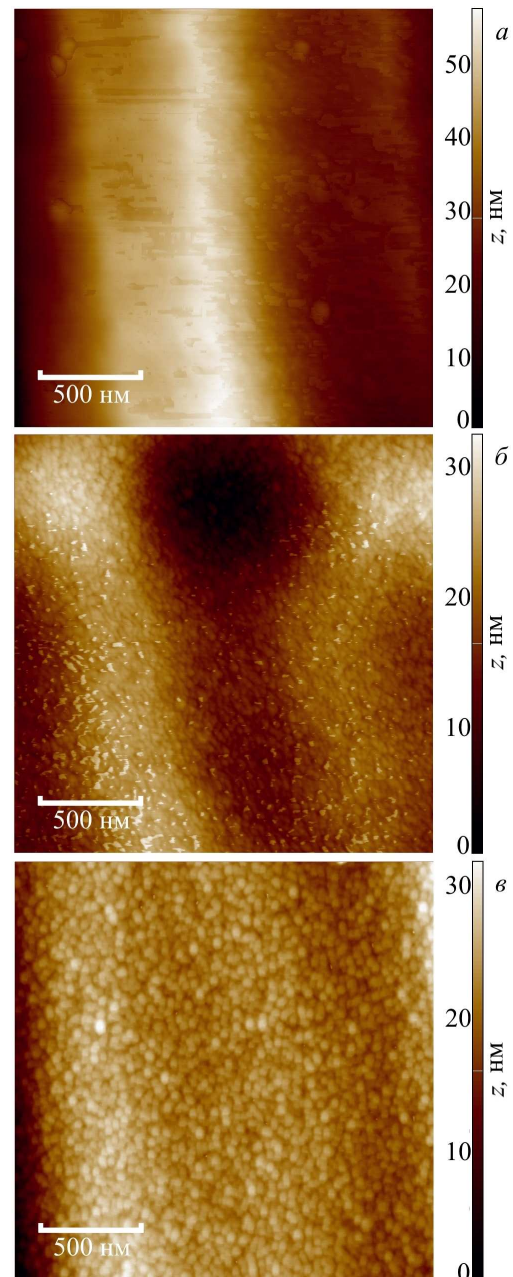


Рис. 2. АСМ-изображения поверхности монокристаллического германия при размере области сканирования 2×2 мкм после обработки: *a* — исходная поверхность, *b* — после обработки в режиме 1, *c* — после обработки в режиме 2

териалов (плавленый кварц, нелинейно-оптические монокристаллы КТР и LBO) в диапазоне пространственных частот $\nu = 0.2 - 130$ мкм $^{-1}$ [6, 14, 19]. На примере более грубой поликристаллической пленки AlN с исходной $R_q = 20$ нм нами было показано, что кластерные ионы способны эффективно сглаживать неровности во всем измеряемом диапазоне $\nu = 0.02 - 130$ мкм $^{-1}$ [20]. Во всех указанных случаях более эффективное сглаживание поверхности кластерными ионами наблюдалось при использовании низко-энергетического режима обработки.

Средние значения среднеквадратичной R_q и эффективной σ_{eff} шероховатости поверхности при

Таблица 2. Характеристики шероховатости поверхности монокристаллического германия

Размер области сканирования, мкм	Параметры шероховатости	Режим обработки		
		Исходная поверхность	После режима 1	После режима 2
2 × 2	$\langle R_q \rangle$, нм	11.5	5.7 (-50%)	3.7 (-68%)
	$\langle \sigma_{eff} \rangle$, нм	9.5	5.0 (-47%)	3.7 (-61%)
10 × 10	$\langle R_q \rangle$, нм	30.0	20.0 (-33%)	23.0 (-23%)
	$\langle \sigma_{eff} \rangle$, нм	32.0	21.0 (-34%)	25.0 (-22%)
40 × 40	$\langle R_q \rangle$, нм	49.0	41.0 (-16%)	42.0 (-14%)
	$\langle \sigma_{eff} \rangle$, нм	53.0	45.0 (-15%)	47.0 (-11%)
100 × 100 (обзорные)	$\langle R_q \rangle$, нм	39.0	35.0 (-10%)	40.0 (+2.5%)
	$\langle \sigma_{eff} \rangle$, нм	42.5	39.0 (-8%)	44.0 (+3.5%)
–	σ_{eff}^{total}	55.0	46.0 (-16%)	50.0 (-9%)

$\langle R_q \rangle$ — среднеквадратичная шероховатость,
 $\langle \sigma_{eff} \rangle$ — средняя эффективная шероховатость,
 σ_{eff}^{total} — эффективная шероховатость, обобщенная по всему измеренному диапазону пространственных частот ν . В скобках указан процент снижения величины параметра шероховатости по сравнению с исходной поверхностью.

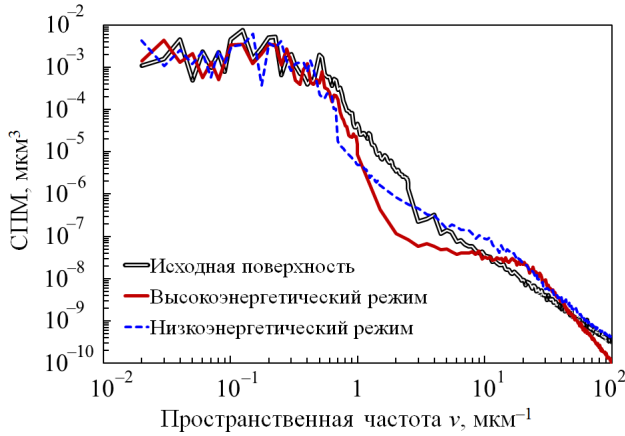


Рис. 3. Функция спектральной плотности мощности шероховатости до и после обработки ионно-кластерным пучком аргона

различных размерах области сканирования до и после ионно-кластерной бомбардировки показаны в табл. 2. Стоит отметить, что наибольшие значения параметров шероховатости поверхности наблюдаются на размере области сканирования 40 × 40 мкм, т.к. основной вклад в шероховатость вносят борозды от механической полировки с характерными размерами 2–30 мкм ($\nu = 0.03 - 0.50 \text{ мкм}^{-1}$, см. СПМ-пики на рис. 3). На обзорных АСМ-изображениях размером 100 × 100 мкм значения среднеквадратичной R_q и эффективной σ_{eff} шероховатости получились ниже, чем на масштабе 40 × 40 мкм (табл. 2), что неудивительно, т.к. их пространственное разрешение было меньше в 5 раз. Параметры шероховатости поверхности мишени на малом масштабе (2 × 2 мкм) отображают шероховатость лишь части поверхности грубых борозд от механической

полировки, что некорректно для оценки искомой шероховатости мишени в целом. Однако это позволяет оценить, как изменилась топография после ионно-кластерной бомбардировки в области высоких частот (рис. 2). Максимальное снижение параметров шероховатости поверхности германия наблюдается на масштабе 2 × 2 мкм — на 47–50% и 61–68% после обработки высоко- и низкоэнергетическими кластерными ионами соответственно. Это происходит за счет эффективного сглаживания небольших (высотой несколько десятков нм) остаточных борозд от механической полировки (рис. 2). В отличие от малых масштабов на размерах 10 × 10, 40 × 40 и 100 × 100 мкм к лучшему сглаживанию поверхности приводит бомбардировка высокоэнергетическими кластерными ионами. В частности, обобщенная эффективная шероховатость σ_{eff}^{total} уменьшается до 46 нм, что на 16% меньше исходной, и на 8% меньше, чем после режима 2. Погрешность измерений шероховатости поверхности составляла около 3%. Стоит уточнить, что после режима 2 на размерах 100 × 100 мкм наблюдается соизмеримое с погрешностью измерений отклонение средних параметров шероховатости поверхности от исходных значений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере монокристаллического германия изучены особенности обработки поверхности грубополированного материала газоструйными ионно-кластерными пучками. Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, бомбардировка исходно грубой ($R_q \sim 50 \text{ нм}$) поверхности германия кластерными ионами приводит к сглаживанию в ограниченном диапазоне латеральных размеров неровностей как со стороны максимальных,

так и со стороны минимальных размеров. Наибольшее сглаживание наблюдается в диапазоне размеров от 125 нм до 1.4 мкм при глубине распыления порядка сотен нанометров. Во-вторых, наибольшая эффективность сглаживания грубо полированной поверхности германия достигается в высокоэнергетическом режиме обработки при удельной энергии кластеров около 100 эВ/атом. Таким образом, характер процесса сглаживания грубо полированной поверхности германия существенно отличается как от распыления исходных сверхгладких (исходная

шероховатость $R_q \leq 1$ нм), так и от менее шероховатых поверхностей (исходная $R_q \sim 20$ нм). Полученные результаты полезны для практического применения газоструйных ионно-кластерных пучков в технологических приложениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-79-10061 (<https://rscf.ru/project/23-79-10061/>) с использованием оборудования ЦКП «Прикладная физика» НГУ.

- [1] Yamada I. Materials processing by cluster ion beams. History, theory, and applications. Boca Raton: CRC Press, 2015.
- [2] Попок V.N. // *Mater. Sci. Eng. R.* **72**. 137 (2011).
- [3] Иешкин А.Е., Толстогузов А.Б., Коробейщиков Н.Г. и др. // *УФН.* **192**. 722. (2022). (Ieshkin A.E., Tolstoguzov A.B., Korobeishchikov N.G. et al. // *Phys. Usp.* **65**. 677 (2022)).
- [4] Kirkpatrick A., Kirkpatrick S., Walsh M. et al. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* **307**. 281 (2013).
- [5] Ieshkin A.E., Kireev D.S., Ermakov Yu.A. et al. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* **421**. 27 (2018).
- [6] Коробейщиков Н.Г., Николаев И.В., Роеико М.А. // *Письма в ЖТФ.* **45**. № 6. 30. (2019). (Korobeishchikov N.G., Nikolaev I.V., Roenko M.A. // *Tech. Phys. Lett.* **45**, N 3. 274 (2019)).
- [7] Иешкин А.Е., Шемухин А.А., Ермаков Ю.А., Черныш В. // *Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астр.* **43**. № 2. 72 (2016). (Ieshkin A.E., Shemukhin A.A., Ermakov Yu.A., Chernysh V.S. // *Moscow Univ. Phys. Bull.* **71**. N 1. 87 (2016)).
- [8] Korobeishchikov N.G., Nikolaev I.V., Roenko M.A., Atuchin V.V. // *Appl. Phys. A.* **124**. 833 (2018).
- [9] Seah M. // *J. Phys. Chem. C* **117**. 12622 (2013).
- [10] Paruch R.J., Postawa Z., Garrison B.J. // *J. Vac. Sci. Technol. B* **34**. 03H105 (2016).
- [11] Korobeishchikov N.G., Stishenko V., Nikolaev I.V., Yakovlev V.V. // *Plasma Chem. Plasma Proc.* **42**. 1223. (2022).
- [12] Haller E.E. // *Mater. Sci. Semic. Proc.* **8**. N 4-5. 408 (2006).
- [13] Toriumi A. and Nishimura T. // *Jpn. J. Appl. Phys.* **57**. N 1. 010101 (2018).
- [14] Korobeishchikov N.G., Nikolaev I.V., Roenko M.A. // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B.* **438**. 1 (2019).
- [15] Chkhalo N.I., Kirsanov A.V., Luchinin G.A. et al. // *Appl. Opt.* **57**. 6911. (2018).
- [16] Duparré A., Ferre-Borrull J., Gliach S. et al. // *Appl. Opt.* **41**. N 1. 154 (2002).
- [17] Erb D.J., Pearson D.A., Škerek T. et al // *Phys. Rev. B.* **109**. 045439 (2024).
- [18] Erb D.J., Schultz R., Ilinov A. et al // *Phys. Rev. B.* **102**. 165422 (2020).
- [19] Korobeishchikov N.G., Nikolaev I.V., Atuchin V.V. et al. // *Surf. Interfaces.* **27**. 101520 (2021).
- [20] Nikolaev I.V., Geydt P.V., Korobeishchikov N.G. et al. // *Nanomaterials.* **12**. 670 (2022).

Effect of Cluster Ion Bombardment on the Roughly Polished Surface of Single-Crystal Germanium Wafers

I.V. Nikolaev^a, N.G. Korobeishchikov, A.V. Lapega

Department of Applied Physics, Faculty of Physics, Novosibirsk State University Novosibirsk 630090, Russia
E-mail: ^a*i.nikolaev@nsu.ru*

The surface treatment of single-crystal germanium with an argon cluster ion beam has been investigated. The initial surface of germanium wafers was bombarded by argon cluster ions with high (105 eV/atom) and low (10 eV/atom) specific energy. Using an atomic force microscope, images were obtained and the surface topography was compared before and after cluster ion bombardment. Using the power spectral density function of roughness, surface smoothing is demonstrated in the range of spatial frequencies: 1) $\nu = 1 - 8 \mu\text{m}^{-1}$ — for the high-energy mode; 2) $\nu = 0.7 - 2.5 \mu\text{m}^{-1}$ — for low-energy mode.

PACS: 79.20.Rf, 41.75.Ak.

Keywords: cluster ion beam, surface treatment, surface smoothing, single-crystal germanium, power spectral density function of roughness.

Received 18 March 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin.* 2024. **79**, No. 3. Pp. .

Сведения об авторах

1. Николаев Иван Владимирович — канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник; тел.: (383) 306-66-12, e-mail: i.nikolaev@nsu.ru.
2. Коробейщиков Николай Геннадьевич — доктор физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник; тел.: (383) 306-66-12, e-mail: korobei@nsu.ru.
3. Лапега Алина Витальевна — мл. науч. сотрудник; тел.: (383) 306-66-12, e-mail: a.lapega@nsu.ru.