

Improving the quality of 100 mm Ge substrates for mass production of multi junction solar cells

T. V. Kulakovskaya¹, D. V. Topakov¹, A. A. Trofimov^{2,3,*}, A. M. Kosyakova²,
A. E. Goncharov², V. A. Malygin², K. A. Gladysheva², V. A. Antonova^{2,4},
and A. S. Sukhanova^{2,4}

¹ Germanium, JSC, Krasnoyarsk, 660123 Russia

² RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

* E-mail: aa-trofimov@yandex.ru

³ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

⁴ University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

Received 30.01.2026; revised 12.02.2026; accepted 20.02.2026

Being a strategic material, germanium finds its application in various high-tech fields, one of which is the production of cascade photovoltaic converters based on A_3B_5/Ge compounds for solar cells of space-based applications, where Ge is used as a substrate and at the same time serves as a narrow-gap subcell. The energy efficiency of such photoconverters manufactured using the MOCVD method is determined, among other things, by the quality of preparation of the substrate material: crystalline perfection, geometric characteristics, surface roughness and degree of purity of Ge wafers. Improving the listed parameters has a positive effect on obtaining high-quality epitaxial layers and the yield of suitable products. This work is devoted to the research carried out Ge substrates with a diameter of 100 mm and a thickness of 140 microns, which made it possible to adjust the technological production process based on the results and led to an increase in the efficiency of photoconversion of mass-produced materials using the MOCVD method of cascade solar cells GaInP/GaAs/Ge, achieving an efficiency of 29 %, which corresponds to the world level.

Keywords: Ge wafers, surface roughness, surface defects, solar cell.

REFERENCES

1. Claeys C. and Simoen E. Germanium-based technologies: from materials to devices. Elsevier Science, 2007.
2. Poslanie Prezidenta RF Federal'nomu Sobraniyu, Moskva, 2024 [in Russian].
3. Rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 17.01.2020 № 20-r Ob utverzhdenii Strategii razvitiya elektronnoj promyshlennosti Rossijskoj Federacii na period do 2030 goda i plana meropriyatij po realizacii Strategii [in Russian].
4. Korotaev V. V., Mel'nikov G. S., Miheev S. V., Samkov V. M., and Soldatov Yu. I. Osnovy teplovideniya. SPb.: ITMO, 2012 [in Russian].
5. Burlakov I. D., Boltar' K. O., Kuznecov S. A., and Ponomarenko V. P. Materialy XXVI Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii po fotoelektronike i priboram nochnogo videniya. Moskva, NPO Orion, 2022 [in Russian].
6. Rogalski A. Infrared Detectors. USA: CRC Press, 2019.
7. Kaplunov I. A. and Rogalin V. E., Fotonika, № 1, 88–106 (2019) [in Russian].
8. Miheev S. V. Osnovy infrakrasnoj tekhniki. SPb: Universitet ITMO, 2017 [in Russian].
9. Kul'chickij N., Naumov A., and Starcev V., Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes, № 6 (00197), 114–121 (2020) [in Russian].
10. Optiko-elektronnaya stanciya krugovogo obzora "Feniks", Voennyj parad, № 3 (57) (2003) [in Russian].
11. Anoshin K. E., Gasanov A. A., and Naumov A. V., Cvetnaya metallurgiya, № 2, 67–76 (2016) [in Russian].
12. Alferov Zh. I., Andreev V. M., and Rumyanecov V. D., Fizika i tekhnika poluprovodnikov **38** (8), 937–948 (2004) [in Russian].
13. Kalyuzhnyj N. A., Lantranov V. M., Mintairov S. A., Emel'yanov V. M., SHvarc M. Z., and Andreev V. M., Osnovnye dostizheniya FTI im. A. F. Ioffe RAN, 2012. <https://www.ioffe.ru/ru/nauka/rezultaty/dostizheniya/92/> [in Russian].
14. Skachkov A. F. and YURko G. I. Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: materialy Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Rostov-na-Donu: Izd-vo YUFU, 2015, Vol. 2 [in Russian].
15. Spicyn V. I., Ryabov A. I., Stel'mah N. S., and Pi-rogovala G. N., Izvestiya AN SSSR. Neorganicheskie materialy, № 13 (1), 27–33 (1977) [in Russian].
16. Fernandez J., Janz S., Suwito D., Oliva E., and Dimroth F. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. USA: San Diego, CA, 2008.
17. Kalyuzhnyj N. A., Gudovskih A. S., Evstropov V. V., Lantratov V. M., Mintairov S. A., Timoshina N. H., SHvarc M. Z., and Andreev V. M., Fizika i tekhnika poluprovodnikov **44** (11), 1568–1576 (2010) [in Russian].
18. Naumova A. A., Lebedev A. A., ZHalnin B. V., Slyshchenko E. V., and Vagapova N. T., Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij **19** (1), 137–145 (2018) [in Russian].
19. Nikiforov A. I., Pahanov N. A., Pchelyakov O. P., and Latyshev A. V., Vestnik Rossijskogo universiteta družby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya **25** (1), 52–56 (2024) [in Russian].
20. Slyshchenko E. V., Naumova A. A., Lebedev A. A., Genali M. A., Vagapova N. T., and ZHalnin B. V., Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij **19** (2), 308–324 (2018) [in Russian].
21. Sigov A. S., Matyuhin V. F., and Red'ko I. Ya. Tezisy dokladov X Mezhdunarodnogo kongressa Energoberezhenie i energoeffektivnost'. S.-Pb., 50–71 (2021) [in Russian].
22. Andreev V. M., Barinov V. A., Varfolomeev S. D., Lachuga YU. F., Matyuhin V. F., Panchenko V. YA., Red'ko I. YA., Sigov A. S., and Stennikov V. A., Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya **21** (4), 224–237 (2020) [in Russian].
23. Sigov A. S. and Matyuhin V. F., Tezisy dokladov Nacional'noj nauchno-tehnicheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Perspektivnye materialy i tekhnologii» («PMT – 2023»). Moskva, 2023 [in Russian].
24. Mangum J. S., Rice A. D., Chen J., Chenenko J., Wong E., Braun A. K., Johnston S., Guthrey H., Geisz J. F., Ptak A. J., and Packard C. E., Advanced Energy Materials **12** (29), 2201332 (2022).
25. Hossain J., Moon M. A., Mondal B. K., and Halim M. A., Optics & Laser Technology **143**, 107306 (2021).
26. Strobl G. F. X., Ebel L., and Fuhrman D. IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). USA: Denver, CO, 3595–3600 (2014).
27. Lombardero I., Miyashita N., Ochoa M., Okada Y., and Algora C. IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference. USA: Chicago, IL, 2019. ISSN: 0160-8371.
28. Kagan M. B. Elektronnye i elektromekhanicheskie sistemy i ustrojstva: sb. nauch. tr. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2016, pp. 411–416 [in Russian].
29. Ryabceva M. V., Lebedev A. A., Naumova A. A., Bolotin A. M., Vagapova N. T., and Cherenkov P. G., Inzhenernyj zhurnal: nauka i innovacii. Elektronnoe nauchno-tehnicheskoe izdanie **3** (123) (2022). DOI: 10.18698/2308-6033-2022-3-2162 [in Russian].
30. Dimroth F. and Kurtz S., MRS Bull., № 32 (3), 230–235 (2007).
31. Rakwal D. and Bamberg E., J. materials processing technology **209** (8), 3740–3751 (2009).
32. Alimov O. M., Anoshin K. E., and Naumov A. V., Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoj tekhniki **18** (4), 240–245 (2015) [in Russian].
33. Arickx P., Kurstjens R., Geens W., and Dessein K., E3S Web of Conferences **16** (11), 03010 (2017).
34. Geens W., Dessein K., Köstler W., Meusel M., Taylor S., Mijlemans P., and Strobl G. Seventh European Space Power Conference. Italy: Stresa, 2005. ISBN: 92-9092-900-6. Vol. 589. id. 8. 2005ESASP.589E...8G.
35. Wang G., Guan Y., Mei H., Mei D., Yang G., Govani J., and Khizar M., Journal of Crystal Growth **393**, 54–58 (2014).
36. Andreev V. M., Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya, № 21 (4), 271–280 (2020) [in Russian].
37. Sizov A. L., Burlakov I. D., Ikovleva N. I., Korotaev E. D., and Mirofyanchenko A. E., Vestnik MITHT. 2013. T. 8. № 5. 94-98 (2013) [in Russian].

Об авторах

Кулаковская Татьяна Владимировна, заместитель генерального директора по науке и производству, Акционерное общество «Германий» (660123, Россия, г. Красноярск, Транспортный проезд, д. 1, стр. 107). E-mail: site_1@krasgermanium.com SPIN-код: 7264-7496, AuthorID: 965208

Топakov Дмитрий Валерьевич, начальник участка механической обработки германия, Акционерное общество «Германий» (660123, Россия, г. Красноярск, Транспортный проезд, д. 1, стр. 107). E-mail: Site_3@krasgermanium.com

Трофимов Александр Александрович, к.т.н., начальник отдела развития материалов, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, Москва, просп. Вернадского, 78). E-mail: aa-trofimov@yandex.ru SPIN-код: 3716-5536, AuthorID: 818356

Косякова Анастасия Михайловна, инженер 2 категории Научно-исследовательского центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: usova.am@phystech.edu SPIN-код: 3864-5151, AuthorID: 1210174

Гончаров Андрей Евгеньевич, инженер 1 категории Научно-исследовательского центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). SPIN-код: 3511-9194, AuthorID: 1178583

Малыгин Владислав Анатольевич, инженер 2 категории подразделения НТЦ КФЭ, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: mva1431@yandex.ru SPIN-код: 9416-8272, AuthorID: 1240051

Гладышева Кристина Анатольевна, инженер 2 категории Научно-исследовательского центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: kgl.a@mail.ru SPIN-код: 4899-4464, AuthorID: 1240264

Антонова Валерия Евгеньевна, инженер 2 категории Научно-исследовательского центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: avaleriya98@mail.ru SPIN-код: 5008-0965, AuthorID: 1304533

Суханова Анна Сергеевна, инженер 2 категории Научно-исследовательского центра, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9); Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (119049, Россия, Москва, Ленинский просп., д. 4, стр. 1). E-mail: sukhanova11@mail.ru SPIN-код: 3007-4250. AuthorID: 1245396