

УДК 621.315.592  
EDN: WFZTVK

PACS: 81.10-h

**Повышение качества 100 мм Ge-подложек при серийном производстве многопереходных фотоэлектрических преобразователей**© Т. В. Кулаковская<sup>1</sup>, Д. В. Топаков<sup>1</sup>, А. А. Трофимов<sup>2,3,\*</sup>, А. М. Косякова<sup>2</sup>,  
А. Е. Гончаров<sup>2</sup>, В. А. Малыгин<sup>2</sup>, К. А. Гладышева<sup>2</sup>, В. А. Антонова<sup>2,4</sup>, А. С. Суханова<sup>2,4</sup><sup>1</sup> Акционерное общество «Германий», г. Красноярск, 660123 Россия<sup>2</sup> АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

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

<sup>3</sup> МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия<sup>4</sup> НИТУ «МИСИС», Москва, 119049 Россия

Статья поступила в редакцию 30.01.2026; после доработки 12.02.2026; принята к публикации 20.02.2026  
Шифр научной специальности 2.2.2, 2.2.3

**Проведены исследования отечественных Ge-подложек диаметром 100 мм и толщиной 140 мкм, что позволило по результатам скорректировать технологический производственный процесс и привело к увеличению эффективности фотопреобразования серийно изготавливаемых с применением метода МОС-гидридной эпитаксии каскадных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge – достигнутый КПД составляет 29 %, что находится на уровне мировых аналогов.**

**Ключевые слова:** подложки Ge, шероховатость поверхности, дефекты поверхности, солнечные элементы.

DOI: 10.51368/2307-4469-2026-14-1-3-19

**Введение**

Германий (Ge) по праву считается одним из основных элементов технического прогресса, поскольку с его применением в производстве диодов и транзисторов завершилась эпоха ламп в радиоаппаратуре. Долгое время этот материал являлся основным в полупроводниковой промышленности, впоследствии его доля в электронике сократилась по причине доминирующего положения кремния (Si).

Сегодня германий применяется в таких наукоемких сферах как космические исследования, волоконно-оптические линии связи, инфракрасная техника и тепловидение [1], что обуславливает его место среди важнейших стратегических редких металлов, являющихся важным фактором развития экономики, обеспечения безопасности государства и входящих

в перечень национальных проектов развития технологического суверенитета [2, 3].

Современная элементная база твердотельной фотоники предполагает применение монокристаллического германия высокой чистоты. Одной из значимых областей, в которых германий успешно применяется, является создание оптики для тепловизионных приборов инфракрасного (ИК) диапазона и других инфракрасных оптико-электронных систем различного назначения [4–6].

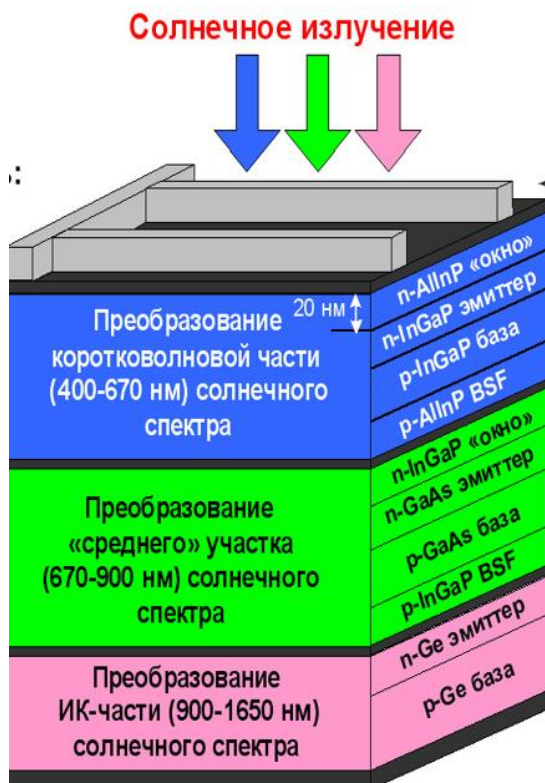
Элементы оптики для ИК приборов из монокристаллического германия удобны в изготовлении и эксплуатации, что обеспечивается свойствами этого материала: отсутствие токсичности и взаимодействия с атмосферной влагой, прочность, обладание хорошими теплофизическими характеристиками, высокая твердость. Это позволяет обрабатывать герма-

ний для получения оптических деталей высокой точности, которые хорошо просветляются даже однослойными покрытиями (до 98 % пропускания излучения) [7]. Германий пропускает излучение ИК-диапазона 2–16 мкм с высоким коэффициентом преломления, что обеспечивает высокую оптическую мощность ИК-систем в длинноволновом ИК-диапазоне 8–12 мкм. Именно в этом диапазоне расположен максимум спектральной излучательной способности замаскированной техники и теплового излучения тела человека, что обуславливает преимущественное применение ИК-систем длинноволнового диапазона спектра для поиска и обнаружения объектов военного и гражданского назначения по их собственному излучению [8, 9]. При этом максимальная дальность действия таких приборов зависит от диаметра объектива. Из монокристаллов германия изготавливают большие по размеру линзы – диаметром более 250 мм [10].

Развитие глобальных спутниковых сетей и других телекоммуникационных проектов обеспечило повышение интереса к германию [11]. Энергоустановками подавляющего большинства существующих и перспективных

зарубежных и отечественных аппаратов космического базирования являются солнечные батареи на основе полупроводниковых каскадных фотоэлектрических преобразователей [12] из  $A_3B_5$  соединений GaInP/GaAs/Ge (рис. 1) [13]. В таких солнечных элементах германий применяется в качестве подложки и одновременно выполняет роль узкозонного субэлемента, так как германиевый  $p-n$ -переход в составе каскадных фотоэлектрических преобразователей распространяет чувствительность последнего до длины волны 1800 нм.

Следствием повышенной механической прочности германия является возможность понижения толщины структур солнечных элементов, а, следовательно, и их массы. Это обстоятельство позволяет увеличить удельную энергоэффективность солнечных батарей, что является важным фактором развития космической отрасли. Солнечные элементы с германиевым  $p-n$ -переходом в качестве подложки, помимо большей эффективности фотопреобразования, обладают повышенной в сравнении с солнечными элементами на кремнии радиационной стойкостью, что диктует повышенный интерес к ним для космического применения [14, 15].



**Рис. 1.** Схема разработанного в ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН каскадного фотоэлектрического преобразователя на основе  $A_3B_5$  соединений GaInP/GaAs/Ge для космических солнечных батарей

**Fig. 1.** Schematic diagram of a cascade photovoltaic converter based on  $A_3B_5$  GaInP/GaAs/Ge compounds for space solar batteries developed at the A. F. Ioffe Physicotechnical Institute of the Russian Academy of Sciences

Германий является подходящим подложечным материалом для получения слоев полупроводниковых соединений  $A_3B_5$  эпитаксиальными методами. Применение Ge-подложек при создании каскадных фотоэлектрических преобразователей GaInP/GaAs/Ge обеспечивает номинальное совпадение постоянных кристаллических решеток подложки и GaAs (0,566 нм и 0,565 нм, соответственно), а также сходство коэффициентов термического расширения и химическую совместимость, что в результате приводит к отсутствию фазовых переходов с эпитаксиально выращиваемыми компонентами на такой изопериодной подложке, минимуму ростовых дефектов в слоях GaAs, вызванных рассогласованием кристаллической структуры, и, несмотря на многообразие материалов, присутствующих в полупроводниковой структуре солнечного элемента, благоприятному формированию в ходе эпитаксиальных процессов единого с германиевой подложкой монокристалла [16, 17, 18].

Каскадные фотоэлектрические преобразователи для космических аппаратов на основе гетероструктур GaInP/GaAs/Ge имеют КПД около 30 % [19, 20]. В настоящее время актуален вопрос улучшения энергомассовых характеристик солнечных батарей, что приобретает особенное значение при построении перспективного солнечного аэрокосмического многофункционального энерготехнологического комплекса с дистанционной передачей энергии по СВЧ и лазерным каналам [21]. Такие комплексы предполагают применение большого числа солнечных батарей с высокой мощностью генерируемой энергии. Решение этой задачи возможно при увеличении КПД преобразования солнечной энергии в электрическую и снижении веса солнечных элементов [22, 23].

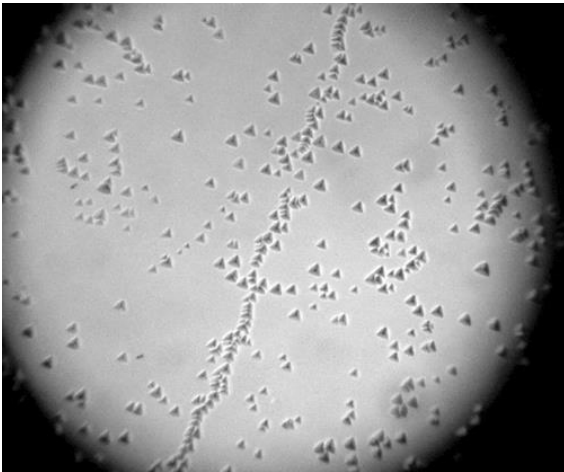
Зарубежными исследовательскими группами ведутся разработки, направленные на решение обеих этих задач как в части повышения эффективности каскадных фотоэлектрических преобразователей [24, 25], так и снижения массогабаритных характеристик путем уменьшения толщины германиевой подложки [26, 27]. Отечественными научными коллективами также достигнуты некоторые успехи в исследованиях по совершенствованию энергомассовых характеристик фотоэлек-

трических преобразователей [28, 29]. Например, разработана технология уменьшения толщины подложки посредством свободного химического травления от начальных 180 мкм до 50 мкм, что привело к снижению удельной массы фотоэлектрических преобразователей со  $116 \text{ мг/см}^2$  до  $63 \text{ мг/см}^2$  при сохранении электрофизических характеристик приборов [19]. Применение таких сверхтонких солнечных элементов в совокупности со сверхлегкими углепластиковыми каркасами для солнечных батарей способно снизить удельную массу готовой конструкции до рекордных  $1 \text{ кг/м}^2$ . Таким образом, технология прецизионного утонения германиевой подложки открывает дополнительную возможность создания высокоэффективных тонких и легких солнечных элементов на массово производимых в настоящее время гетероструктурах  $A_3B_5/\text{Ge}$  с высоким процентом выхода годных.

Вместе с тем эффективность солнечных элементов также зависит от качества подложечного материала. Необходимыми требованиями к германиевым подложкам для применения в производстве трехкаскадных фотоэлектрических преобразователей являются низкая плотность дислокаций (на уровне  $200\text{--}250 \text{ см}^2$ ) и отсутствие дислокационных дефектов типа малоугловых границ (скопления дислокаций) при диаметре кристалла 100 мм и более [30, 31]. Для изготовления германиевых подложек с такими характеристиками требуются монокристаллы с высокосовершенной структурой, так как наличие дислокаций приводит к несоответствию параметров кристаллических решеток германия и соединений  $A_3B_5$ , препятствуя росту высококачественных эпитаксиальных слоев на Ge-подложке. Получение крупногабаритных малодислокационных монокристаллов является сложной задачей как по причине физических свойств германия, так и вследствие определения необходимых технологических условий и режимов выращивания (рис. 2) [32].

С другой стороны, качество чистоты поверхности полированных подложек (epi-ready), количество и размер поверхностных дефектов, следы высыхания, невидимые невооруженным взглядом, могут привести к локальному неравномерному эпитаксиальному росту [33], что в свою очередь является одной

из актуальных проблем при создании Ge подложек. Эта проблема может быть вызвана шероховатостью поверхности, кристаллическими ямками, частицами загрязнений или неоднородными слоями собственного оксида. Площадь и плотность этих дефектов будут определять влияние на эпитаксиальный рост и конечную производительность солнечного элемента.



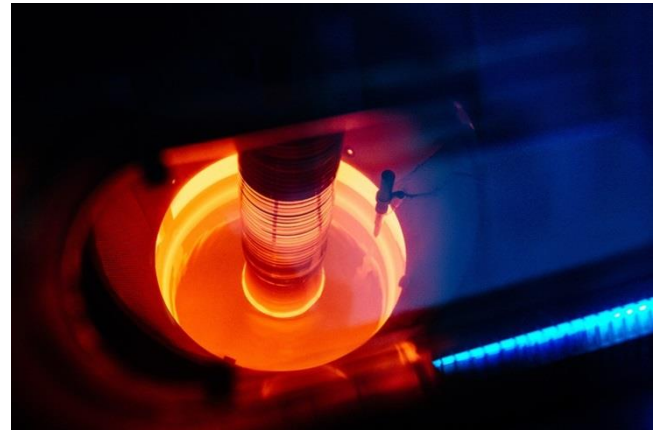
**Рис. 2.** Характерная дислокационная картина в кристалле германия с малоугловой границей. Плоскость (111), увеличение  $\times 1000$

**Fig. 2.** Characteristic dislocation pattern in a germanium crystal with a low-angle boundary. Plane (111), magnification  $\times 1000$

Германий, предназначенный для применения в оптических инфракрасных системах, а также высококачественные подложки для создания каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе гетероструктур  $A_3B_5/Ge$ , производят немногие предприятия на мировой арене. Одним из крупнейших мировых производителей широкой номенклатуры германиевой продукции является АО «Германий» (г. Красноярск) и обладает полным производственным циклом от извлечения германия из сырья с содержанием Ge от 5 % до изготовления подложек, пригодных к эпитаксиальным процессам. Для выделения очень чистого германия полупроводниковой чистоты проводится зонная плавка методом горизонтальной направленной кристаллизации в атмосфере проточного водорода (рис. 3а). Далее монокристаллический германий получают методом Чохральского из расплава в атмосфере аргона на монокристаллическую затравку (рис. 3б).



а)



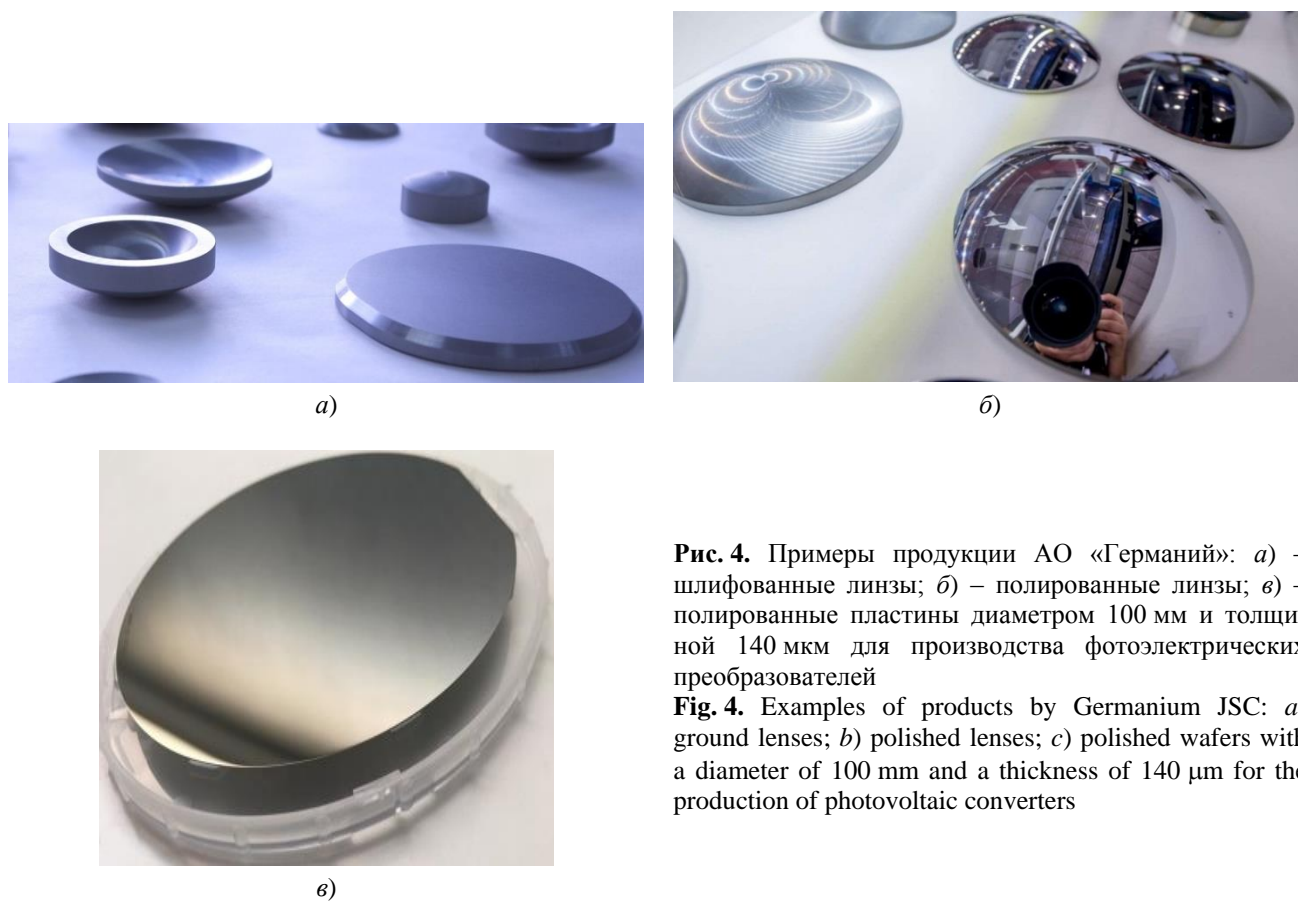
б)

**Рис. 3.** Получение германия полупроводникового качества в АО «Германий»: а) – глубокая очистка поликристаллического германия зонной плавкой; б) – выращивание методом Чохральского монокристалла с определенными электрофизическими и оптическими параметрами

**Fig. 3.** Production of semiconductor-grade germanium at Germanium JSC: a) – deep purification of polycrystalline germanium by zone melting; b) – growing a single crystal with specific electrophysical and optical parameters using the Czochralski method

Применяемые в АО «Германий» технологии позволяют получать германий не только для оптических применений, но и монокристаллический германий специального назначения: легированный галлием, для полупроводниковых детекторов, светоизлучающих диодов, для электроники и солнечной энергетики (рис. 4).

Производственная линия получения полированных подложек из германия диаметром 100 мм и толщиной 140 мкм для производства фотоэлектрических преобразователей  $GaInP/GaAs/Ge$  оснащена всем необходимым оборудованием и включает в себя все этапы, требуемые для изготовления высококачественной продукции (рис. 5).



**Рис. 4.** Примеры продукции АО «Германий»: а) – шлифованные линзы; б) – полированные линзы; в) – полированные пластины диаметром 100 мм и толщиной 140 мкм для производства фотоэлектрических преобразователей

**Fig. 4.** Examples of products by Germanium JSC: a) ground lenses; b) polished lenses; c) polished wafers with a diameter of 100 mm and a thickness of 140 μm for the production of photovoltaic converters



**Рис. 5.** Технологический маршрут производства подложек в АО «Германий», предназначенных для проведения эпитаксиальных процессов при создании фотоэлектрических преобразователей GaInP/GaAs/Ge

**Fig. 5.** Technological route for the production of wafers at Germanium JSC, intended for epitaxial processes in the creation of GaInP/GaAs/Ge photovoltaic converters

Среди зарубежных производителей высокотехнологичной германиевой продукции одной из лидирующих является компания Umicore (Бельгия), которая, помимо прочего, производит полированные подложки Ge класса «epi-ready», предназначенные для эпитаксиальных процессов, диаметром 100 мм и толщиной 140 мкм, на которых методом MOCVD формируются трехкаскадные сол-

нечные элементы для солнечных панелей [34]. Монокристаллы германия изготавливаются также методом Чохральского. Для повышения эффективности каскадных фотопреобразователей уделяется внимание снижению плотности дислокаций в выращенных кристаллах [35], а также исследуются и оптимизируются технологические процессы повышения чистоты изготовленных подложек (рис. 6) [33].



**Рис. 6.** Фотографии пластин из германия, на разных стадиях производства, созданных и подготовленных компанией Umicore, и исследованные с помощью прибора KLA-Tencor Candela: чистая, загрязненная и повторно очищенная пластина (слева направо)

**Fig. 6.** Germanium wafers at different stages of production, created and prepared by Umicore, and examined using the KLA-Tencor Candela instrument: clean, contaminated and re-cleaned wafer (left to right)

Таким образом, развитие солнечной энергетики является проблемой глобального характера и актуальной задачей, вызванной поиском технологических решений, способных понизить стоимость солнечной энергии.

В России разработка технологий каскадных фотоэлектрических преобразователей на германиевых подложках и внедрение их в серийное производство космических солнечных батарей (рис. 7) [13, 36] способствовало развитию отечественного производства энергоэффективных и радиационно стойких солнечных элементов нового поколения, что придало импульс развитию программ исследования космоса, космической телекоммуникации и космических технологий в целом.

В условиях текущих санкционных ограничений и необходимости развития отечественных наукоемких технологий для обеспечения импортозамещения и технологического суверенитета страны повышение качества подложек из германия для производства фотоэлектрических преобразователей в целях обеспечения энергоэффективными силовыми установками специальной техники косми-

ческого базирования является актуальной задачей.



**Рис. 7.** Произведенные в России солнечные батареи с полупроводниковыми каскадными фотоэлектрическими преобразователями на основе соединений  $A_3B_5/Ge$ . Рабочая поверхность  $\sim 10 \text{ м}^2$

**Fig. 7.** Solar panels produced in Russia with semiconductor cascade photovoltaic converters based on  $A_3B_5/Ge$  compounds. Working surface area  $\sim 10 \text{ м}^2$

В рамках технологического сотрудничества исследование специально подготовленных опытных партий германиевых подложек производства АО «Германий» (г. Красноярск)

было проведено на технических мощностях АО «НПО «Орион» (Москва) с помощью имеющегося аналитического и контрольно-измерительного оборудования, что позволило по полученным результатам оперативно корректировать производственные технологические процессы, обеспечивая стабильное повышение качества и увеличение выхода годных полированных подложек Ge.

### Материалы и методы

В рамках настоящего исследования проводилась характеристика полированных пластин Ge диаметром 100 мм и толщиной 140 мкм с целью оценки влияния условий технологических процессов на различных этапах производства на качество продукции и установления возможности оптимизации технологических режимов для повышения выхода годных пластин, удовлетворяющих требованиям МОС-гидридной эпитаксии при серийном производстве каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе соединений  $A_3B_5/Ge$ .

Полированные пластины Ge изготовлены в АО «Германий» (г. Красноярск) по промышленной технологии собственной разработки с применением современного технологического и контрольно-измерительного оборудования. Необходимым требованием к германиевым подложкам является низкая плотность дислокаций (не более  $300 \text{ см}^{-2}$ ). На пластинах производства АО «Германий» плотность дислокаций подтверждена на уровне около  $150 \text{ см}^{-2}$ .

Исследования и характеристика представленных пластин проводились в АО «НПО «Орион» (Москва) на высокотехнологичном аналитическом оборудовании.

По результатам исследований технологами АО «Германий» принимались решения о необходимости корректирования и оптимизации производственных процессов технологического маршрута изготовления полированных пластин.

Технологическая апробация полированных пластин повышенного качества осуществлялась на базе российского разработчика и серийного производителя солнечных батарей для космических аппаратов, эксплуатирующихся на всех типах орбит, в рамках и по

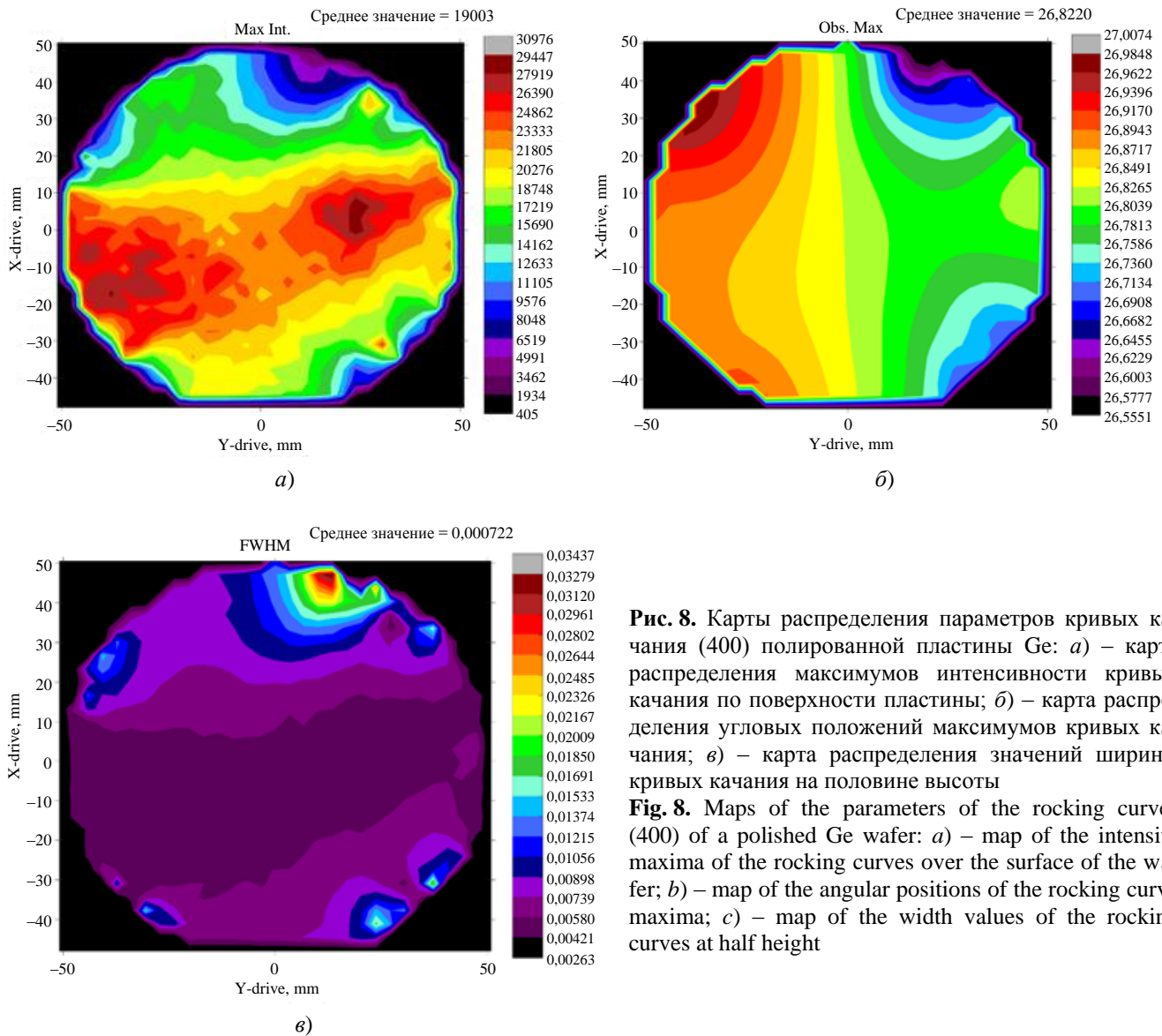
технологии производства каскадных фотоэлектрических преобразователей на основе соединений  $A_3B_5/Ge$ . Изготовленные с применением метода МОС-гидридной эпитаксии на подложках германия каскадные фотоэлектрические преобразователи подвергались измерениям электрофизических и фотоэлектрических параметров для оценки повышения энергоэффективности при применении в производственных процессах новых улучшенных Ge-подложек.

По результатам обратной связи от производителя солнечных батарей технологами АО «Германий» оперативно принимались решения, направленные на улучшение эксплуатационных характеристик полированных пластин и изготавливалась новая опытная партия для проведения исследований качества подложек.

Кристаллическое совершенство опытных партий пластин Ge исследовалось методом рентгеновской дифрактометрии по схеме, аналогичной в работе [37]. Дифрактометр высокого разрешения Bruker Discover D8 обладает модульной архитектурой и способен функционировать в широком диапазоне различных конфигураций с быстрым переключением между ними, что делает его универсальным инструментом для материаловедения и, помимо прочего, позволяет изучать структуру поверхности и проследивать структурные изменения вглубь образца, проводить неразрушающий контроль качества промышленных монокристаллов для электроники и оптики.

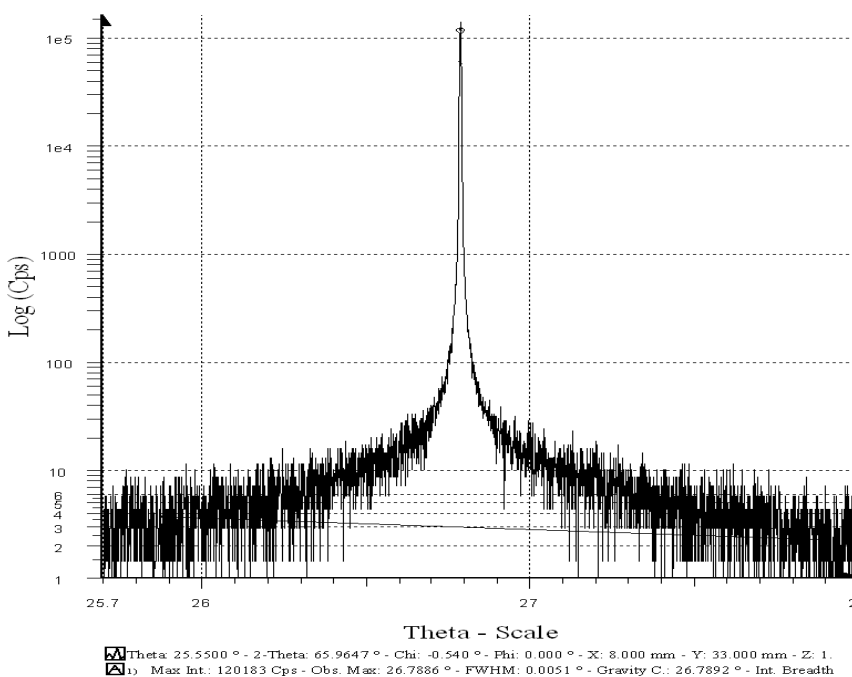
Проводилось картирование и запись набора кривых дифракционного отражения в различных точках на поверхности пластин (рис. 8).

Значения ширины на полувысоте лежат в относительно узком диапазоне, не считая краев, и они уже близки к характерным значениям (в данной схеме прибора должно быть около  $0,0040^\circ$ ). Такие значения могут говорить о довольно высоком кристаллическом совершенстве и минимальном нарушенном слое. Значения угловых положений максимумов лежат в широком диапазоне, середина образца отличается от краев на всех построенных картах, что может быть связано с креплением образца. Для примера на рис. 9 приведена отдельная экспериментальная кривая качания (400).



**Рис. 8.** Карты распределения параметров кривых качания (400) полированной пластины Ge: *а)* – карта распределения максимумов интенсивности кривых качания по поверхности пластины; *б)* – карта распределения угловых положений максимумов кривых качания; *в)* – карта распределения значений ширины кривых качания на половине высоты

**Fig. 8.** Maps of the parameters of the rocking curves (400) of a polished Ge wafer: *a)* – map of the intensity maxima of the rocking curves over the surface of the wafer; *b)* – map of the angular positions of the rocking curve maxima; *c)* – map of the width values of the rocking curves at half height



**Рис. 9.** Экспериментальная кривая качания (400) полированной пластины Ge. Интенсивность = 120 183 отсч/с; FWHM = 0,0051°; Obs. Max. = 26,7886°

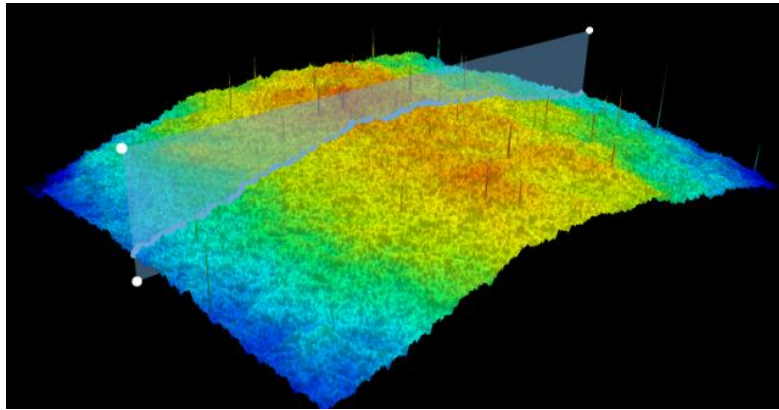
**Fig. 9.** Experimental rocking curve (400) of a polished Ge wafer. Intensity = 120,183 cps; FWHM = 0.0051°; Obs. Max. = 26.7886°

Данная кривая характеризуется высоким значением отраженной интенсивности, немного увеличенным значением FWHM (ширины на полувысоте), что может говорить о довольно высоком кристаллическом совершенстве и малом нарушенном слое полированной пластины.

Оценка морфологии и шероховатости поверхности полированных пластин в 5 точках проводилась при помощи оптического профилометра с применением интерферометрического объектива  $\times 50$  DI с разрешением 0,01 нм (рис. 10). Размер кадра составляет  $337 \times 282$  мкм. Sensofar S Neox является метрологическим инструментом для широкого спектра исследований материалов и разрабо-

тан для получения быстрых неинвазивных измерений микро- и наногометрии поверхностей различных конфигураций и применяется в научно-исследовательской деятельности, обеспечивая возможность получения псевдоцветного изображения с качественной информацией о профиле поверхности. Интерферометры фазового сдвига предназначены для измерения шероховатости очень гладких и равномерных поверхностей с разрешением менее нанометра.

Значения среднеарифметических (Ra) и среднеквадратических (Rq) параметров шероховатости поверхности, измеренные в 5 точках на пластине, представлены в таблице.



**Рис. 10.** Морфология поверхности полированной пластины Ge, исследованная методом оптической профилометрии

**Fig. 10.** Surface morphology of a polished Ge wafer studied by optical profilometry

Таблица

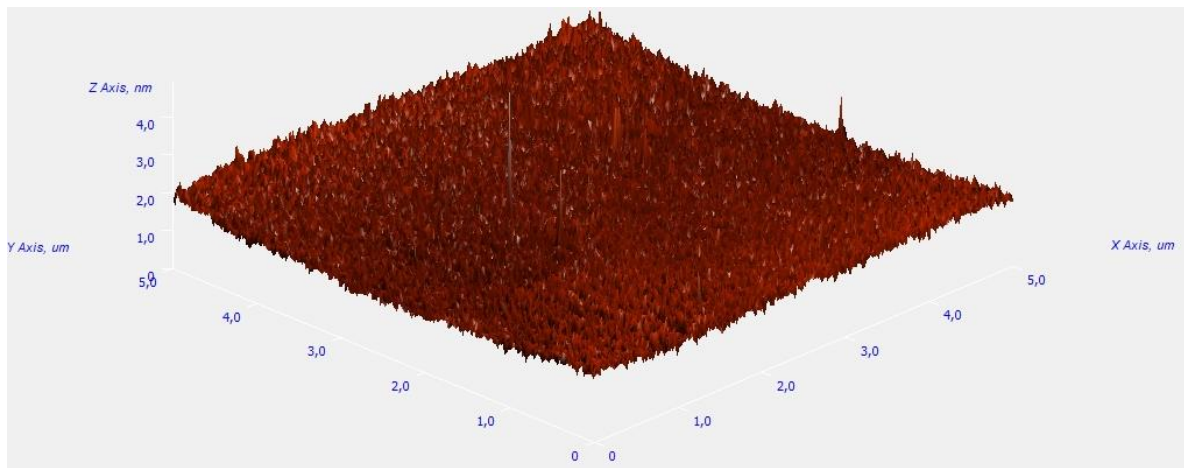
**Значения шероховатости поверхности полированной пластины Ge**

| Параметр шероховатости поверхности | точка 1 | точка 2 | точка 3 | точка 4 | точка 5 |
|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Ra, нм                             | 0,12    | 0,15    | 0,13    | 0,13    | 0,15    |
| Rq, нм                             | 0,16    | 0,17    | 0,16    | 0,16    | 0,19    |

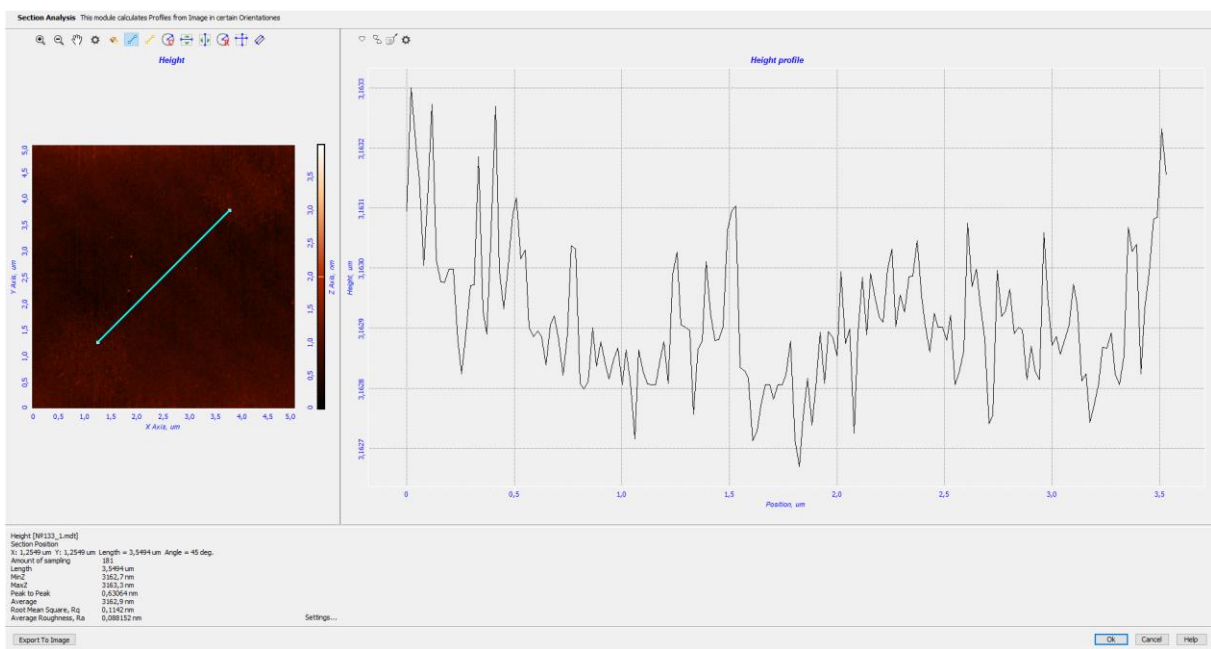
Анализ параметров поверхности полированных пластин выявил отсутствие значительных расхождений шероховатости поверхности в различных точках по пластине. В целом шероховатость поверхности полированной пластины Ge находится на субнаношероховатом уровне в десятые доли нанометра.

Дополнительно качество полированных пластин Ge и измерение линейных размеров на-

но-рельефа поверхности анализировались методом атомно-силовой микроскопии также в 5 точках на представленных образцах (рис. 11). Метод предоставляет возможность исследовать пространственные свойства объектов больших диаметров и проводить серийные измерения в полуавтоматическом режиме с накоплением массивов данных.



a)



б)

**Рис. 11.** Исследования полированной пластины Ge методом атомно-силовой микроскопии на участке  $5 \times 5$  мкм: а) – морфология поверхности; б) – измерения шероховатости поверхности на длине 3,5 мкм составили  $R_a = 0,088$  нм,  $R_q = 0,1$  нм

**Fig. 11.** Atomic force microscopy studies of a polished Ge wafer over a  $5 \times 5$   $\mu\text{m}$  area: a) surface morphology; b) surface roughness measurements over a length of 3.5  $\mu\text{m}$  were  $R_a = 0.088$  nm,  $R_q = 0.1$  nm

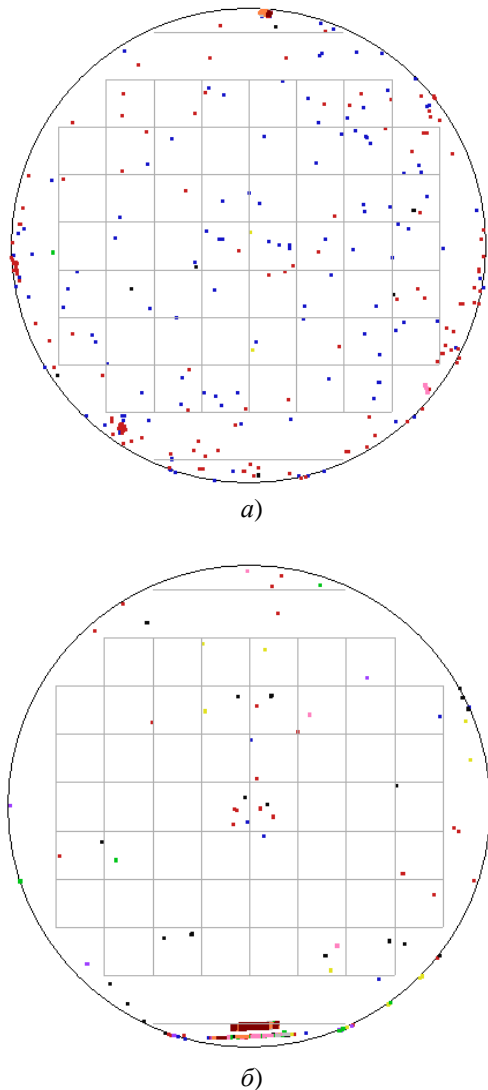
Представленные результаты свидетельствуют о высоком качестве подготовки поверхности полированных пластин Ge. Корреляция значений шероховатости поверхности, измеренных различными методами, повышает достоверность.

Степень чистоты поверхности пластин класса «eri-ready» является важной и неотъемлемой частью подготовки подложек и подлежит обязательному контролю в ходе производственного цикла. Оптический анализатор поверхности применяется для управления процессом производства сложных полупроводников и, сочетая

два лазерных луча и четыре независимых метода обнаружения дефектов поверхности пластин, обеспечивает исключительную чувствительность к частицам и царапинам на оптоэлектронных и полупроводниковых пластинах, одновременно измеряя интенсивность рассеяния, топографические изменения, отражательную способность поверхности и фазовый сдвиг для автоматического обнаружения и классификации широкого спектра дефектов.

Оптический анализатор поверхности не позволяет работать с пластинами толщиной 140 мкм, вследствие чего для оценки чистоты

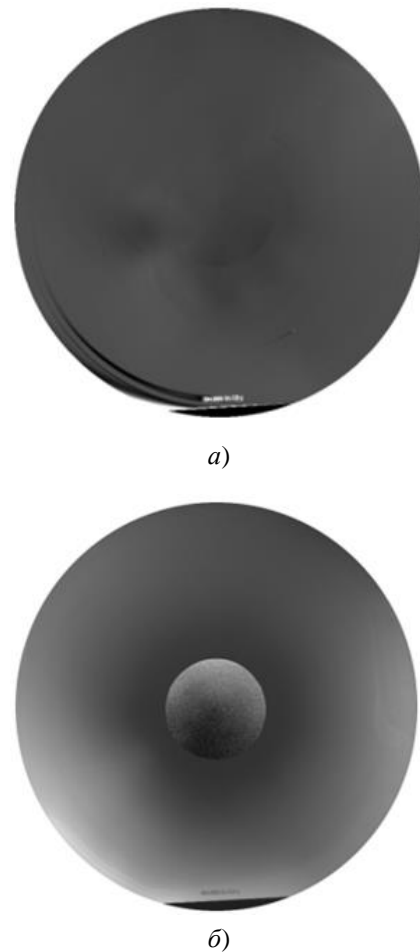
поверхности и количества дефектов АО «Германий» были подготовлены пластины толщиной 400 мкм по оптимизированному производственному циклу. Распределение дефектов на пластине наглядно представляется в виде карты, которая для исследуемых в настоящей работе полированных пластин Ge имела вид, представленный на рис. 12.



**Рис. 12.** Количество дефектов, зафиксированных детектором на поверхности исследуемых полированных пластин Ge: *a*) – до проведения совместных исследовательских работ; *b*) – после корректирования технологических процессов отмывки пластин по результатам исследования

**Fig. 12.** The number of defects recorded by the detector on the surface of the studied polished Ge wafers: *a*) – before the joint research work; *b*) – after adjusting the technological processes for washing the wafers based on the results of the study

В нижней части пластины на рис. 12 цветное скопление, определенное системой в качестве дефектов, обусловлено наличием лазерной маркировки в области базового среза пластины, применяемой в производственном цикле «АО «Германий», которая также заметна на изображениях пластины в режимах зеркального отражения и фазового сдвига (рис. 13).



**Рис. 13.** Изображения полированной пластины Ge в режимах зеркального отражения (*a*) и фазового сдвига (*b*)

**Fig. 13.** Images of a polished Ge wafer in mirror reflection (*a*) and phase shift (*b*) modes

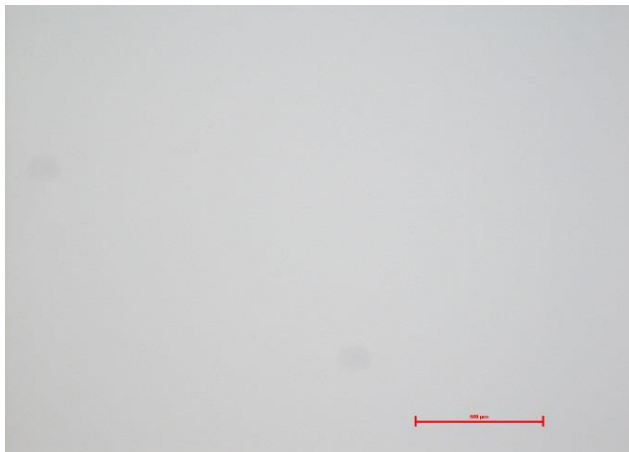
Все найденные дефекты на пластинах не обнаружены при визуальном осмотре образца невооруженным глазом. В ходе анализа полученных результатов дефекты имеющие «хвосты» (см. рис. 13*a*) идентифицированы как неоднородности, так как образец во время измерения вращается со скоростью 5000 об/мин, что сдвигает частички на поверхности пластины, и детектор фиксирует след от движения.

Для установки природы возникновения дефектов пластины дополнительно исследовались с помощью оптической микроскопии при увеличении  $\times 5$  в светлом поле, темном поле и в дифференциально-интерференционном контрасте (рис. 14). Модульная конструкция микроскопа Nikon Eclipse LV обеспечивает универсальность применения и широкий спектр методов анализа при разработке технологических процессов и контроля качества в процессе производства изделий микроэлектроники.

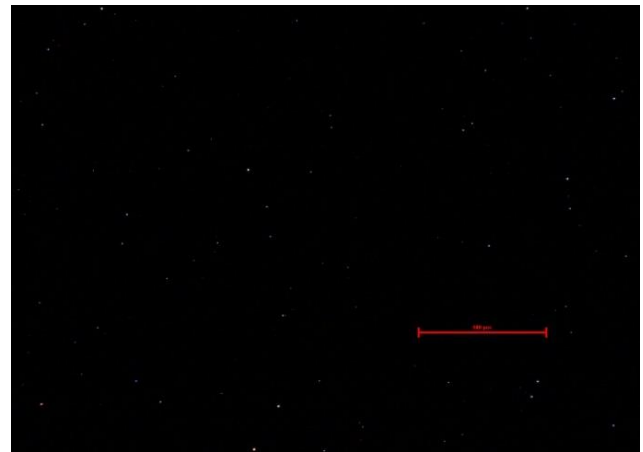
В результате было выявлено отсутствие царапин и повреждений поверхности, а также обнаружено и подтверждено наличие неких неоднородностей на поверхности образца.

С целью установления типа выявленных потенциальных дефектов пластины исследовались на сканирующем электронном микроскопе (рис. 15). Он предназначен для всесторонних исследований в области материаловедения, предлагает широкий функционал в области обработки изображений и аналитики и входит в перечень оснащения современных многоцелевых лабораторий.

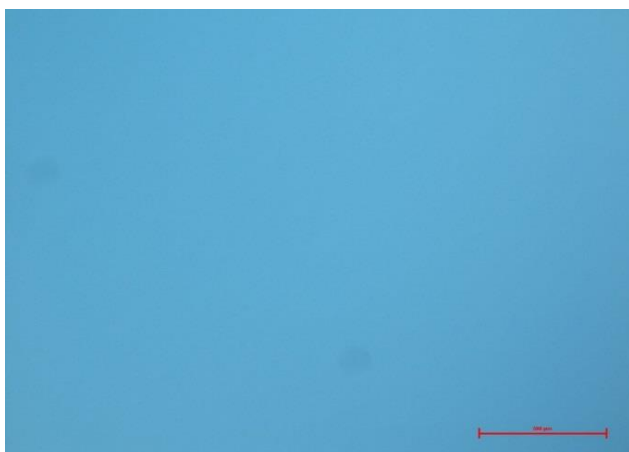
Анализ неоднородностей показал, что обнаруженные дефекты не являются частью кристаллической структуры полированных пластин, а представляют собой частицы пыли на поверхности, либо неоднородности, обусловленные технологическими причинами (например, частицы клея от ламинирующей пленки или воска от приклеивания пластин к носителю).



а)



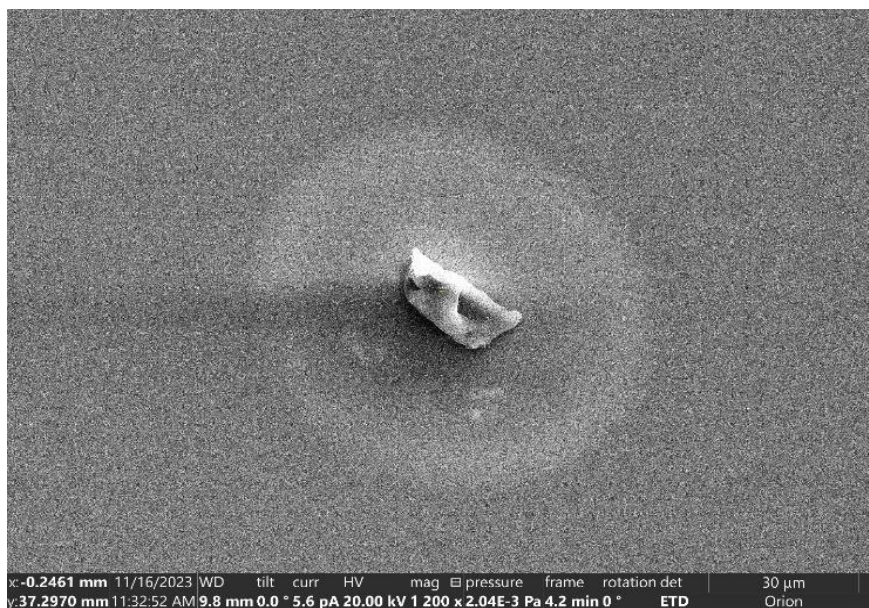
б)



в)

**Рис. 14.** Исследования полированных пластин Ge при помощи оптического микроскопа в режимах светлого поля (а), темного поля (б) и дифференциально-интерференционном контрасте (в)

**Fig. 14.** Studies of polished Ge wafers using an optical microscope in bright field (a), dark field (b) and differential interference contrast (c) modes



а)



б)

**Рис. 15.** Примеры загрязнений, обнаруженные на пластинах Ge, при исследовании с помощью сканирующего электронного микроскопа

**Fig. 15.** Examples of contamination found on Ge wafers when examined using a scanning electron microscope

### Заключение

Таким образом, в ходе исследования опытных партий полированных Ge-подложек, изготовленных в АО «Германий», установлено высокое кристаллическое совершенство исследуемых образцов, что свидетельствует о качестве производственных процессов выращивания монокристаллов методом Чохральского.

Исходя из данных, полученных на оптическом профилометре и атомно-силовом мик-

роскопе, шероховатость поверхности пластин находится на уровне единиц ангстрем, что является достаточным для проведения эпитаксиальных процессов методами МОС-гидридной и молекулярно-лучевой эпитаксии.

Исследования различными методами микроскопии показали отсутствие царапин и других структурных дефектов на поверхности исследуемых пластин.

Применение результатов исследования полированных пластин при помощи оптиче-

ского анализатора поверхности для корректирования технологических процессов отмывки пластин обеспечило в настоящее время чистоту поверхности полированных Ge-подложек на уровне мировых аналогов.

Итогом научно-технического сотрудничества и проведенных исследований является повышение технологичности производственных процессов на всех этапах серийного изготовления наукоемкой продукции для солнечных батарей аппаратов космического базирования. Применение результатов исследований для корректировки технологических процессов производства полированных пластин Ge диаметром 100 мм и толщиной 140 мкм, изготовленных в АО «Германий», привело к увеличению эффективности фотообразования трехкаскадных солнечных элементов GaInP/GaAs/Ge, изготавливаемых с применением метода МОС-гидридной эпитаксии. Наблюдается стабилизация всех основных электрических параметров солнечных элементов: плотности тока короткого замыкания, напряжения холостого хода. Достигнутое значение КПД составляет около 29 % и приближено к мировому уровню.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Claeys C., Simoen E.* Germanium-based technologies: from materials to devices. – Elsevier Science, 2007.
2. Послание Президента РФ Федеральному Собранию. – Москва, 2024.
3. Распоряжение Правительства РФ от 17.01.2020 № 20-р Об утверждении Стратегии развития электронной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года и плана мероприятий по реализации Стратегии.
4. *Коротаев В. В., Мельников Г. С., Михеев С. В., Самков В. М., Солдатов Ю. И.* Основы тепловидения. – СПб.: ИТМО, 2012.
5. *Бурлаков И. Д., Болтарь К. О., Кузнецов С. А., Пономаренко В. П.* / Материалы XXVI Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. – Москва, НПО Орион, 2022.
6. *Rogalski A.* Infrared Detectors. – USA: CRC Press, 2019.
7. *Каплунов И. А., Рогалин В. Е.* / Фотоника. 2019. № 1. С. 88–106.
8. *Михеев С. В.* Основы инфракрасной техники. – СПб: Университет ИТМО, 2017.
9. *Кульчицкий Н., Наумов А., Старцев В.* / Электроника: наука, технология, бизнес. 2020. № 6 (00197). С. 114–121.
10. Оптико-электронная станция кругового обзора "Феникс" / Военный парад. 2003. № 3 (57).
11. *Аношин К. Е., Гасанов А. А., Наумов А. В.* / Цветная металлургия. 2016. № 2. С. 67–76.
12. *Алферов Ж. И., Андреев В. М., Румянцев В. Д.* / Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. № 8. С. 937–948.
13. *Калюжный Н. А., Лантранов В. М., Минтауров С. А., Емельянов В. М., Шварц М. З., Андреев В. М.* / Основные достижения ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН. 2012. <https://www.ioffe.ru/ru/nauka/rezultaty/dostizheniya/92/>
14. *Скачков А. Ф., Юрко Г. И.* / Перспективные системы и задачи управления: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2015. Т. 2.
15. *Спицын В. И., Рябов А. И., Стельмах Н. С., Пирогова Г. Н.* / Известия АН СССР. Неорганические материалы. 1977. № 13 (1). С. 27–33.
16. *Fernandez J., Janz S., Suwito D., Oliva E., Dimroth F.* / 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – USA: San Diego, CA. 2008.
17. *Калюжный Н. А., Гудовских А. С., Евстропов В. В., Лантратов В. М., Минтауров С. А., Тимошина Н. Х., Шварц М. З., Андреев В. М.* / Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. № 11. С. 1568–1576.
18. *Наумова А. А., Лебедев А. А., Жалнин Б. В., Слыщенко Е. В., Вагапова Н. Т.* / Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. № 1. С. 137–145.
19. *Никифоров А. И., Паханов Н. А., Пчеляков О. П., Латышев А. В.* / Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2024. Т. 25. № 1. С. 52–56.
20. *Слыщенко Е. В., Наумова А. А., Лебедев А. А., Генали М. А., Вагапова Н. Т., Жалнин Б. В.* / Сибирский журнал науки и технологий. 2018. Т. 19. № 2. С. 308–324.
21. *Сигов А. С., Матюхин В. Ф., Редько И. Я.* / Тезисы докладов X Международного конгресса Энергосбережение и энергоэффективность. – С.-Пб, 2021. С. 50–71.
22. *Андреев В. М., Баринов В. А., Варфоломеев С. Д., Лачуга Ю. Ф., Матюхин В. Ф., Панченко В. Я., Редько И. Я., Сигов А. С., Стенников В. А.* / Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2020. Т. 21. № 4. С. 224–237.
23. *Сигов А. С., Матюхин В. Ф.* / Тезисы докладов Национальной научно-технической конференции с международным участием «Перспективные материалы и технологии» («ПМТ - 2023»). – М., 2023.
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., Packard C. E.* / Advanced Energy Materials. 2022. Vol. 12. № 29. P. 2201332.
25. *Hossain J., Moon M. A., Mondal B. K., Halim M. A.* / Optics & Laser Technology. 2021. Vol. 143. P. 107306.
26. *Strobl G. F. X., Ebel L., Fuhrman D.* / IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC). – USA: Denver, CO, 2014. P. 3595–3600.
27. *Lombardero I., Miyashita N., Ochoa M., Okada Y., Algora C.* / IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference. – USA: Chicago, IL, 2019. ISSN: 0160-8371.

28. Каган М. Б. / Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. С. 411–416.
29. Рябцева М. В., Лебедев А. А., Наумова А. А., Болотин А. М., Ваганова Н. Т., Черенков П. Г. / Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2022. № 3 (123). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-3-2162>
30. Dimroth F., Kurtz S. / MRS Bull. 2007. № 32 (3). P. 230–235.
31. Rakwal D. / J. materials processing technology. 2009. Vol. 209. № 8. P. 3740–3751.
32. Алимов О. М., Аношин К. Е., Наумов А. В. / Известия вузов. Материалы электронной техники. 2015. Т. 18. № 4. С. 240–245.
33. Arickx P., Kurstjens R., Geens W., Dessein K. / E3S Web of Conferences. 2017. Vol. 16 (11). P. 03010.
34. Geens W., Dessein K., Köstler W., Meusel M., Taylor S., Mijlemans P., 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., Khizar M. / Journal of Crystal Growth. 2014. Vol. 393. P. 54–58.
36. Андреев В. М. / Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2020. № 21 (4). С. 271–280.
37. Сизов А. Л., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Коротаев Е. Д., Мирофьянченко А. Е. / Вестник МИТХТ. 2013. Т. 8. № 5. С. 94–98.

PACS: 81.10-h

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

T. V. Kulakovskaya<sup>1</sup>, D. V. Topakov<sup>1</sup>, A. A. Trofimov<sup>2,3,\*</sup>, A. M. Kosyakova<sup>2</sup>,  
A. E. Goncharov<sup>2</sup>, V. A. Malygin<sup>2</sup>, K. A. Gladysheva<sup>2</sup>, V. A. Antonova<sup>2,4</sup>,  
and A. S. Sukhanova<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Germanium, JSC, Krasnoyarsk, 660123 Russia

<sup>2</sup> RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

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

<sup>3</sup> MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

<sup>4</sup> 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. Rasporozhenie 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 tekhnologii **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 tekhnologii **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