

Микро- и нанoeлектроника. Физика конденсированного состояния
Micro- and nanoelectronics. Condensed matter physics

УДК 67.02

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-69-79>

EDN HEGGBA



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Поиск технологических решений,
направленных на снижение количества дефектов
изображения в гибридном приборе ближнего
инфракрасного диапазона

А.А. Егоренков[@], И.В. Данилова, М.И. Бибинова,
С.Н. Челышков, А.Н. Вязников, К.С. Баталов

АО «ЦНИИ «Электрон», Санкт-Петербург, 194223 Россия

[@] Автор для переписки, e-mail: a.egorenkov@niielectron.ru

• Поступила: 11.08.2025 • Доработана: 24.10.2025 • Принята к опубликованию: 04.02.2026

Резюме

Цели. Основная цель работы – уменьшение дефектов изображения, получаемого в гибридном фотоприемнике с диапазоном чувствительности 0.95–1.65 мкм на основе фотокатода из фосфида индия/арсенида галлия-индия (InP/InGaAs). Для этого необходимо улучшить качество поверхности фотокатода перед взрывной фотолитографией, а также обеспечить высокую воспроизводимость фотолитографического процесса.

Методы. Для достижения поставленной цели проведена серия экспериментов по очистке поверхности и по усовершенствованию технологического процесса взрывной фотолитографии. Для подготовки поверхности опробованы следующие методы: химическое травление поверхности InGaAs, покрытие поверхности фотокатода защитным слоем фоторезиста перед резкой пластины, использование различных способов удаления фоторезиста (в диметилформамиде и плазме), внедрение механической очистки поверхности. Для усовершенствования фотолитографии проведены эксперименты со временем и способами сушки фоторезиста, проведено варьирование режимов экспонирования и проявления, заменен фоторезист.

Результаты. Изготовленные по усовершенствованной технологии образцы демонстрируют более чем девятикратное снижение среднего процента дефектов от общей площади поверхности фотокатода по сравнению со старыми образцами: с 0.317% до 0.035%. Благодаря улучшению качества поверхности фотокатода изображение в готовом приборе стало более однородным, количество дефектов изображения значительно уменьшилось. Обеспечена высокая воспроизводимость процесса.

Выводы. Усовершенствованная технология подготовки поверхности, а также уменьшение толщины фоторезиста, используемого во взрывной фотолитографии, привело к увеличению однородности изображения в гибридном приборе, а также к уменьшению дефектов. Предлагаемый подход может быть применен при серийном производстве гибридных высокочувствительных фотоприемников ближнего инфракрасного (ИК) диапазона и позволяет им быть конкурентоспособными с мировыми аналогами.

Ключевые слова: фотоприемники ближнего ИК-диапазона, InP/InGaAs-фотокатод, очистка поверхности InGaAs, взрывная фотолитография

Для цитирования: Егоренков А.А., Данилова И.В., Бибинова М.И., Челышков С.Н., Вязников А.Н., Баталов К.С. Поиск технологических решений, направленных на снижение количества дефектов изображения в гибридном приборе ближнего инфракрасного диапазона. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):69–79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-69-79>, <https://www.elibrary.ru/HEGGBA>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Search of technological solutions aimed at reducing the number of image defects in a hybrid SWIR device

Artyom A. Egorenkov[®], Irina V. Danilova, Maria I. Bibinova,
Sergei N. Chelyshkov, Alexei N. Vyaznikov, Konstantin S. Batalov

NRI Electron, Saint Petersburg, 194223 Russia

[®] Corresponding author, e-mail: a.egorenkov@nrielectron.ru

• Submitted: 11.08.2025 • Revised: 24.10.2025 • Accepted: 04.02.2026

Abstract

Objectives. The primary aim of this study is to minimize image defects in a hybrid photodetector with a sensitivity range of 0.95–1.65 μm , based on an InP/InGaAs photocathode. In order to achieve this, the surface quality of the photocathode must be improved prior to lift-off photolithography. In addition, the photolithographic process must be made highly reproducible.

Methods. In order to achieve this goal, a series of experiments on surface cleaning and improvement of the lift-off photolithography process were conducted. The following surface preparation methods were tested: chemical etching of the InGaAs surface; coating the photocathode surface with a protective photoresist layer before cutting the plate; using various photoresist removal methods (in dimethylformamide and plasma); and mechanical surface cleaning. In order to improve photolithography, experiments were conducted on drying times and photoresist methods, exposure and development modes were varied, and photoresist was replaced.

Results. Samples manufactured using the improved technology demonstrate a more than ninefold reduction in the average percentage of defects on the photocathode surface from 0.317% to 0.035%. Thanks to the improved quality of the photocathode surface, the image in the finished device is more uniform and the number of image defects significantly decreased. The process is highly reproducible.

Conclusions. Improvements in surface preparation technology, coupled with a reduction in the thickness of the photoresist used in lift-off photolithography lead to greater uniformity of images in hybrid devices and fewer defects. The proposed approach can be used for the mass production of high-sensitivity near-infrared hybrid photodetectors, making them competitive with those produced elsewhere.

Keywords: SWIR photodetectors, InP/InGaAs photocathode, surface cleaning of InGaAs, lift-off photolithography

For citation: Egorenkov A.A., Danilova I.V., Bibinova M.I., Chelyshkov S.N., Vyaznikov A.N., Batalov K.S. Search of technological solutions aimed at reducing the number of image defects in a hybrid SWIR device. *Russian Technological Journal*. 2026;14(2):69–79. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2026-14-2-69-79>, <https://www.elibrary.ru/HEGGBA>

Financial disclosure: The authors have no financial or proprietary interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из популярных диапазонов съемки является коротковолновый инфракрасный (ИК) диапазон, излучение в котором имеет свойства, схожие с видимым диапазоном излучения. Однако коротковолновый ИК-диапазон является перспективным во множестве применений благодаря его уникальным особенностям:

- прозрачность некоторых материалов¹;
- использование в качестве подсветки невидимого излучения (излучение ночного неба, лазерное излучение с длиной волны 1.55 мкм, являющееся безопасным для зрения) [1];
- возможность различать объекты, имеющие одинаковый цвет в видимом диапазоне [2];
- по сравнению с видимым диапазоном возможность наблюдения на более дальних расстояниях и при плохой видимости (смог, дождь, туман) [3].

Камеры, работающие в ближнем ИК-диапазоне, имеют широкий спектр применений как в научных исследованиях, так и в гражданской и военно-оборонной промышленности. Например, в электронной промышленности они используются для проверки печатных плат и солнечных панелей на наличие дефектов²; в пищевой промышленности – для проверки качества продуктов [4]; в военно-оборонной промышленности – при разведывательно-тактических операциях для обнаружения замаскированных объектов и слежения [5]; в медицине – для анализа тканей неинвазивными способами и визуализации подкожных тканей [6].

Перспективными фоточувствительными устройствами, работающими в коротковолновом ИК-диапазоне, являются гибридные фотоприемники, которые состоят из фотокатода и твердотельного чувствительного к электронам элемента (анода) в едином вакуумном объеме (рис. 1). Фотокатод, работающий в режиме «на пропускание», поглощает кванты излучения, за счет чего внутри его объема генерируются электронно-дырочные пары. Далее электроны, двигаясь к эмитирующей поверхности, выходят в вакуум и ускоряются полем. Таким образом, анод (чувствительная к электронам матрица прибора с переносом заряда (ППЗ)) регистрирует поток электронов, интенсивность которого прямо пропорциональна интенсивности излучения, поглощенного фотокатодом.

¹ Edmund Optics. What is SWIR? https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/imaging/what-is-swir/?srsltid=AfmBOopNG8OgK_q1N35-W5tpY9aS7jqGYNeYn3mLq96-xOienoMu9u2T. Дата обращения 04.06.2025. / Accessed June 04, 2025.

² HWYL En-Vision Technology. SWIR Cameras: What Are They? [Imaging & Application Guide]. <https://hwyl.in/swir-cameras/>. Дата обращения 10.06.2025. / Accessed June 10, 2025.

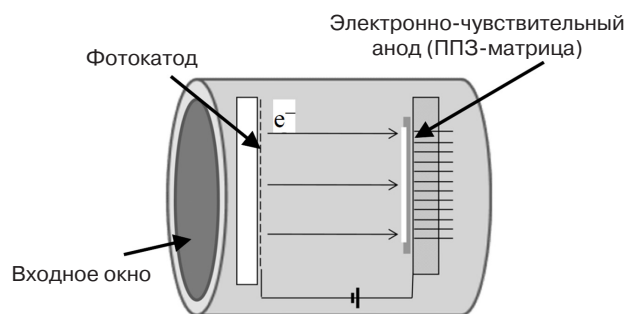


Рис. 1. Схема гибридного прибора [7]

Такой тип приборов работает на основе внешнего фотоэффекта, в связи с чем появляется необходимость нахождения такой системы в условиях вакуума. Однако преимуществом, по сравнению с твердотельными аналогами, является усиление сигнала за счет генерации ускоренными электронами большого количества электронно-дырочных пар в объеме анода. Также стоит отметить вариативность гибридной технологии, а именно, многообразие возможных фотокатодов [8–10] и анодов внутри единой конструкции.

В данной работе в качестве фотокатода выступает гетероструктура на основе фосфида индия/арсенида галлия-индия (InP/InGaAs), рабочий диапазон длин волн составляет 0.95–1.65 мкм. Для переноса фотозаряда из активного слоя фотокатода в эмиттерный слой с большей шириной запрещенной зоны на его поверхность наносится металлический слой (электрод) для формирования барьера Шоттки. При приложении внешнего напряжения барьер между активным и эмиттерными слоями снижается, и фотоэлектроны получают возможность перейти в эмиттер и затем – в вакуум [11, 12]. Для снижения работы выхода электронов с поверхности фотокатода в вакуумный промежуток применяется активация поверхности слоем цезия и кислорода Cs/O [13, 14].

Для создания металлического электрода применяется контактная обратная (взрывная) фотолитография. Однако в процессе работы выявились проблемы, связанные с загрязнением поверхности фотокатода частицами перед фотолитографией. Крупные и мелкие частицы препятствуют созданию равномерного электрода в процессе фотолитографии, что приводит к дефектам изображения в готовом приборе. Также частицы видны на итоговом изображении, формируемом камерой (рис. 2).

В области, выделенной красным прямоугольником (рис. 2), можно наблюдать дефекты, характерные для неравномерности электрода. Черные прямоугольные области – это остатки металла, которые не были удалены во время взрывной фотолитографии. В области, ограниченной синим прямоугольником, видны темные линии. Предполагается, что это

следы от кисти, которой убирались остатки металла после фотолитографии. В [15] наличие темных точек и линий на изображениях электронно-оптических преобразователей видимого и ИК-диапазонов связывают с поверхностными загрязнениями фотокатода.

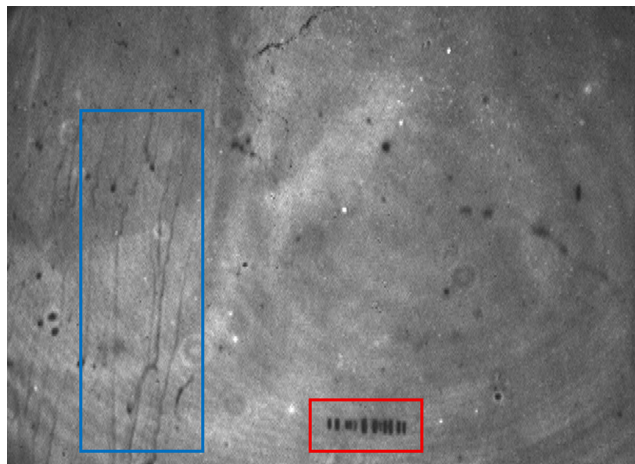


Рис. 2. Дефекты изображения, вызванные загрязнением поверхности и неоднородностью электрода

В технологии производства гибридного фотоприемника ближнего ИК-диапазона в АО «ЦНИИ «Электрон»³ используются пластины с гетероструктурой InP/InGaAs. Из одной пластины можно сделать фоточувствительные области для четырех приборов. Из-за хрупкости пластины ее резку необходимо проводить до процесса фотолитографии. Во время резки на поверхности адсорбируются различные мелкие и крупные частицы, которые впоследствии необходимо удалить, потому что они препятствуют созданию контакта при экспонировании, следовательно, увеличивают процент дефектов изображения. Также для наилучшей работоспособности фотокатодов с отрицательным электронным средством необходима атомарно-чистая поверхность [16], которая позволит обеспечить равномерность нанесения слоя Cs/O для активации поверхности [17], а также увеличит срок службы фотокатода [18].

Поиск подходящего метода очистки, эффективно для удаления загрязнений с поверхности образцов, имеет важное значение для создания качественных фотокатодов. Существует несколько методов очистки: химическая, плазменная и ионная. Среди них химическая очистка является наиболее привлекательным методом из-за дешевизны и простоты реализации процесса. Для травления полупроводников группы III–V широко применяются растворы кислот. Среди кислотных травителей комбинация соляной кислоты HCl и перекиси

водорода H_2O_2 (HCl/H_2O_2) считается одной из наиболее подходящих, поскольку она обеспечивает наименьшую степень анизотропии при травлении [19, 20]. Увеличение концентрации H_2O_2 в растворах травителя приводит к значительному увеличению скорости травления [21], что является нежелательным для наших применений, т.к. может изменить толщину внешнего эпитаксиального слоя гетероструктуры. Поэтому необходимо использовать низкие концентрации H_2O_2 для обеспечения невысоких скоростей травления. В [20] для более эффективной очистки наночастиц с поверхности InGaAs было предложено использовать раствор $HCl + H_2O_2 + ADS$ (лаурил сульфат аммония). Добавление ADS понижает дзета-потенциал поверхности, что приводит к уменьшению адсорбции частиц.

Помимо загрязнения поверхности, возникали проблемы с невоспроизводимостью фотолитографического процесса от эксперимента к эксперименту (не всегда удавалось полностью удалить избыточный слой металла для формирования нужного рисунка). Возможной причиной непротекания взрыва может являться использование позитивного фоторезиста, который создает положительный наклон стенок (рис. 3а). При напылении металлический слой осаждается на стенках фоторезиста, препятствуя проникновению растворителя для удаления фоторезиста и металлической пленки вместе с ним. Это делает процесс взрывной фотолитографии затруднительным или невыполнимым. В общем случае для обратной фотолитографии применяют негативные фоторезисты, которые создают отрицательный наклон стенок (рис. 3б), способствующий удалению излишней металлизации⁴.

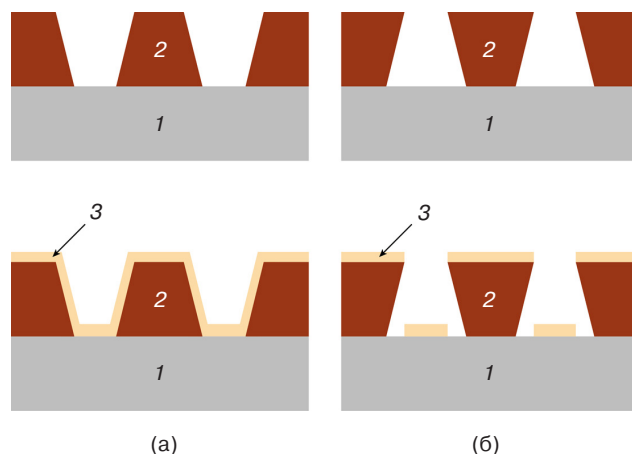


Рис. 3. Схематичное изображение стенок фоторезиста: (а) положительный наклон, (б) отрицательный наклон, где 1 – подложка, 2 – фоторезист, 3 – металл

⁴ Обращенная, взрывная литография фоторезист ФПН-20-ИЗО. <https://www.frast.ru/obrashchennaya-vzryvnaya>. Дата обращения 25.09.2025. [Image reversal (lift-off) photoresist FPN-20-ISO. <https://www.frast.ru/obrashchennaya-vzryvnaya>. Accessed September 25, 2025. (In Russ.).]

³ <https://www.niielectron.ru/>. Дата обращения 25.09.2025. / Accessed September 25, 2025. (In Russ.).

Для применения негативных фоторезистов необходимо изменить фотошаблон и заменить используемые растворители, что требует дополнительной технологической отработки. Разработка таких технологических изменений является предметом будущих исследований.

В настоящей статье представлены результаты экспериментов по очистке поверхности после резки, выбрана оптимальная последовательность действий для получения наиболее чистой поверхности фотокатода. Также представлены результаты экспериментов по улучшению воспроизводимости процесса взрывной фотолитографии. В результате был выбран новый фоторезист, с использованием которого взрыв происходит на каждом образце.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Ранее подготовка поверхности фотокатода и последующая обратная фотолитография проводились следующим образом:

- резка вручную двухдюймовой пластины фотокатода InP/InGaAs на образцы размером 20×22 мм;
- мойка пластин в деионизованной воде в ультразвуковой установке УЗУ-0.25 (производитель – Ульяновское приборостроительное производственное объединение, СССР) в течение 5 мин;
- во время процесса фотолитографии использовался положительный фоторезист ФП-9120-1.0 (производитель – АО «НИОПИК», Россия) с толщиной 1.1–1.3 мкм;
- фотолитографические операции (экспонирование и проявление) и напыление металлического слоя с последующим взрывом проводились в разные дни.

1.1. Подготовка поверхности перед фотолитографией

Эксперименты по очистке поверхности проводились на InP/InGaAs-фотокатодах, а также на кремниевых пластинах диаметром 3 дюйма.

Для снижения загрязнений на поверхности фотокатода в технологическом процессе подготовки поверхности был проведен ряд экспериментов:

1. Травление поверхности InGaAs раствором $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl} + \text{ADS}$ составом 0.001 М перекиси водорода, 0.05 М соляной кислоты и 0.05 мМ ADS.
2. Автоматизированная резка пластин на образцы размером 20×22 мм.
3. Покрытие пластины фоторезистом перед резкой.
4. Снятие фоторезиста в диметилформамиде с последующей обработкой в плазме для удаления остатков фоторезиста.

5. Процесс очистки поверхности: механическая мойка пластины в деионизованной воде, затем мойка в ультразвуковой ванне в течение 5 мин, механическая отмывка в деионизованной воде.

1.2. Процесс фотолитографии

С целью улучшения протекания взрывной фотолитографии проведены следующие эксперименты:

1. Изменение режимов сушки фоторезиста: Инфракрасная сушка, сушка на горячей плите при температуре $T = 105^\circ\text{C}$ в течение 1 мин, сушка в термостате при $T = 115^\circ\text{C}$ при разном времени выдержки: 3, 5, 10 и 20 с. Также для некоторых фотокатодов был опробован способ создания «отрицательного наклона» профиля стенок фоторезиста путем дополнительного подсушивания пластины после засветки: в течение 1 мин на горячей плите для одного и в течение 5 мин в термостате для другого.
2. Изменение режимов экспонирования (разная экспозиция, разная мощность лампы) и, соответственно, проявления (разная концентрация проявителя и время проявления).
3. Уменьшение времени пролеживания образца между процессами экспонирования, проявления, напыления металла и взрыва.
4. Использование другого позитивного фоторезиста с меньшей толщиной пленки: ФП-9120-0.4 (производитель – АО «НИОПИК», Россия) с толщиной 0.4 мкм вместо ФП-9120-1.0 с толщиной 1 мкм.

1.3. Визуализация экспериментов

Снимки образцов получены с помощью оптических микроскопов МБС-1 (производитель – Лыткаринский завод оптического стекла, СССР) и NORGAU NVM-2010 (производитель – NORGAU, Россия).

Для получения изображения готового прибора при равномерной засветке использовался измерительный стенд, структурная схема которого приведена на рис. 4.

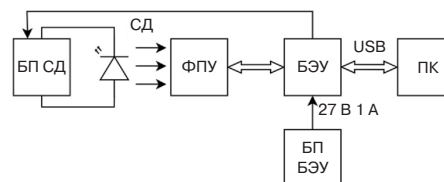


Рис. 4. Структурная схема измерительного стенда для получения изображения готового прибора: БП – блоки питания; СД – светодиод с центральной длиной волны излучения 1.55 мкм; ФПУ – фотоприемное устройство на базе гибридного прибора; БЭУ – блок электронного управления; USB (universal serial bus) – универсальная последовательная шина; ПК – персональный компьютер для управления и вывода изображения

2. РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате травления поверхности образца InP/InGaAs, нарезанного вручную, в растворе $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl} + \text{ADS}$ в ультразвуковой установке в течение 5 мин успешной очистки поверхности фотокатода от мелких и крупных частиц произведено не было. Как видно на рис. 5, были удалены лишь некоторые крупные частицы. Возможно, некоторые из них поменяли свое положение на поверхности.

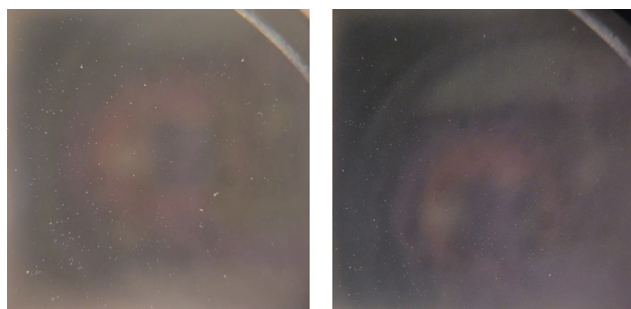


Рис. 5. Поверхность фотокатода InP/InGaAs: (а) до травления в растворе $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HCl} + \text{ADS}$, (б) после травления. Площадь поля зрения $20 \times 22 \text{ мм}^2$

Положительный результат был получен при замене ручной резки на автоматизированную. Автоматизированная резка привела к значительному уменьшению количества крупных частиц, адсорбированных на поверхности образца (рис. 6).

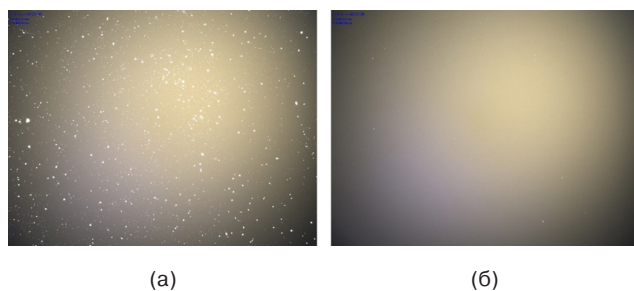


Рис. 6. Поверхность Si после: (а) ручной резки, (б) автоматизированной резки. Снимок при увеличении 0.7, площадь поля зрения $6.311 \times 6.312 \text{ мкм}^2$

Однако на поверхности все еще сохраняется большое количество мелких частиц размером примерно $10 \pm 5 \text{ мкм}$ (рис. 7а), количество которых можно уменьшить при покрытии поверхности образца фоторезистом перед процессом резки (рис. 7б). Количество мелких частиц, адсорбирующихся на поверхности во время резки, уменьшается. Однако на поверхности образца после покрытия

фоторезистом и после снятия фоторезиста в диметилформамиде появляются загрязнения из мелких частиц, которые образуют овалообразные узоры, состоящие из частиц размером $10 \pm 3 \text{ мкм}$. Данные частицы не удаляются при отмывке поверхности. Возможно, данные частицы являются не до конца удаленным диметилформамидом.

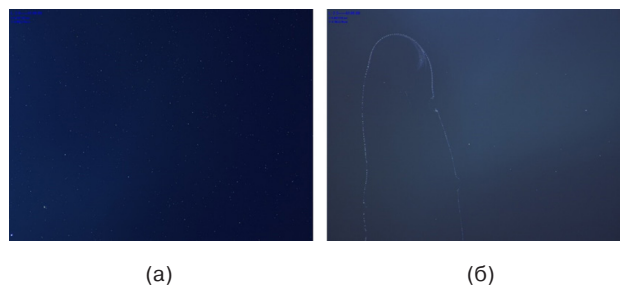


Рис. 7. Поверхность Si после автоматизированной резки образца: (а) без фоторезиста, (б) в фоторезисте. Снимок при увеличении 2.0, площадь поля зрения $2.21 \times 2.21 \text{ мкм}^2$

При использовании кислородной плазмы для удаления фоторезиста [22] на поверхности отсутствуют данные узоры, но в результате поверхность является недостаточно чистой (рис. 8).

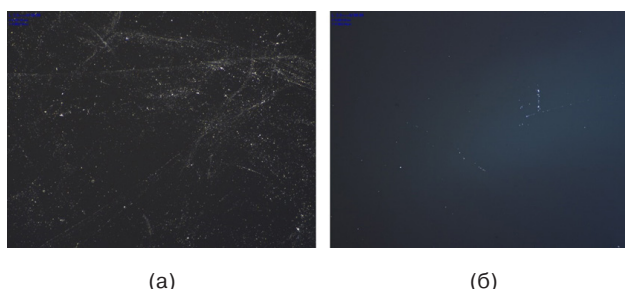


Рис. 8. Поверхность Si после плазмохимического травления: (а) неотмытая, (б) после отмывки. Снимок при увеличении 2.0, площадь поля зрения $2.21 \times 2.21 \text{ мкм}^2$

Поэтому применяется следующий способ подготовки поверхности:

1. Исходная двухдюймовая пластина покрывается слоем фоторезиста ФП-9120-1.0.
2. Производится автоматическая резка на образцы необходимого размера.
3. Защитный слой фоторезиста ФП-9120-1.0 удаляется в диметилформамиде, затем дополнительно происходит удаление остатков фоторезиста в кислородной плазме.
4. Финишная отмывка образцов с применением механической очистки, а также в деионизованной воде в ультразвуковой установке.

Изменения в проведении фотолитографического процесса (сушка, экспонирование, проявление) не повлияли на процесс взрыва, удаления излишней

металлизации не происходило. Однако изменение толщины фоторезиста привело к положительным результатам.

При использовании нового фоторезиста меньшей толщины ФП-9120-0.4 и при проведении процесса взрывной фотолитографии (экспонирование и проявление рисунка, напыление металла, удаление излишнего металла) в течение одного дня удастся добиться повторяемости процесса взрывной фотолитографии, чего не удавалось добиться ранее. При использовании прошлого фоторезиста большей толщины ФП-9120-1.0 не всегда удавалось добиться полного удаления излишнего металла и создания необходимого рисунка на поверхности фотокатода.

Предполагается, что уменьшение толщины фоторезиста делает его стенки более крутыми. Поэтому удаление металла (его «взрыв») начал происходить более успешно и на данный момент воспроизводится при создании фоточувствительной области на каждом фотокатод. Такую тенденцию также можно проследить в [23], где стенки фоторезиста становились более пологими при увеличении его толщины.

Фотолитографический рисунок, полученный с применением нового технологического подхода, является более однородным и с меньшим количеством дефектов по сравнению с образцами, полученными по старой технологии.

Для количественной оценки эффективности нового технологического подхода был проведен анализ данных по площади и проценту дефектов (таблица). Выборка из 12 образцов, сделанных с применением нового технологического подхода, показывает низкий процент по количеству дефектов от площади рабочей зоны. Здесь Н1–Н12 – образцы, изготовленные по новой технологии, С1–С3 – образцы, изготовленные по старой технологии.

Среднее значение процента дефектов при использовании измененной технологии для образцов из группы Н1–Н8 составило 0.086%, а для группы Н9–Н12 было равно 0.035%. Это в 9 раз ниже по сравнению с показателем для группы старой технологии С1–С3, который составлял 0.317%. Стандартное отклонение для новой технологии также значительно меньше – 0.039% и 0.019% против 0.127%, что указывает на высокую воспроизводимость процесса.

Из диаграммы на рис. 9 видно, что рабочая зона образцов Н9–Н12 имеет наименьший процент дефектов. При подготовке к фотолитографии данные образцы дополнительно подвергались механической отмывке после 5 мин в ультразвуковой ванне.

Таким образом, усовершенствованный технологический процесс не только снижает дефектность, но и обеспечивает более стабильные результаты при серийном производстве.

Таблица. Площадь и процент дефектов в рабочей области на фотокатод

Номер образца	Суммарная площадь дефектов, мм ²	Процент дефектов от площади рабочей зоны 130 мм ² , %
Н1	0.059	0.05
Н2	0.107	0.01
Н3	0.073	0.06
Н4	0.102	0.08
Н5	0.080	0.06
Н6	0.102	0.08
Н7	0.031	0.02
Н8	0.395	0.04
Н9	0.020	0.02
Н10	0.076	0.06
Н11	0.020	0.02
Н12	0.076	0.06
С1	0.349	0.27
С2	0.600	0.46
С3	0.288	0.22

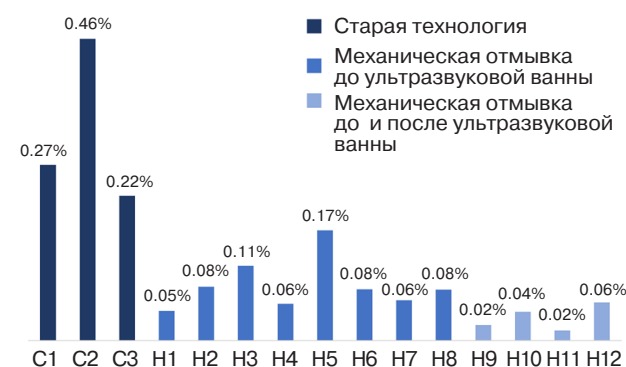


Рис. 9. Распределение доли дефектов от общей площади образцов

По сравнению с рис. 2, изображение на готовом приборе (рис. 10) значительно улучшилось. Изображение стало более однородным, черные точки от загрязнений практически отсутствуют, темные прямоугольники отсутствуют полностью.

Результаты показывают, что снижение толщины фоторезиста и исключение длительного межоперационного хранения образцов существенно уменьшают количество дефектов. Наибольший вклад в улучшение качества вносит комплекс мер: защита поверхности фоторезистом перед резкой, использование плазменной очистки, последовательное выполнение этапов экспонирования, напыления и удаления излишнего металла, а также уменьшение толщины используемого фоторезиста.

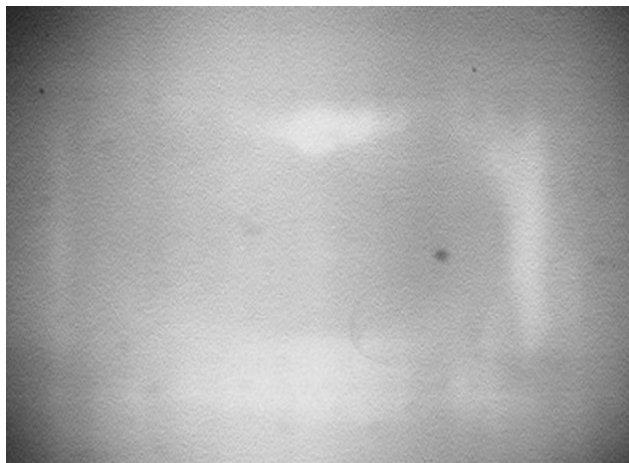


Рис. 10. Изображение готового прибора с фотокатодом, полученным по усовершенствованной технологии

Достигнутый уровень доли дефектов по данным измерений фотокатодов соответствует лучшим мировым образцам твердотельных фотоприемников ближнего ИК-диапазона IMX991 от компании SONY⁵.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена усовершенствованная технология подготовки поверхности и проведения фотолитографии для гибридных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

Достигнуто снижение среднего процента дефектов более чем в 9 раз – с 0.317% до 0.035%, что соответствует лучшим мировым образцам твердотельных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

В результате улучшено качество изображения в готовом приборе. Изображение является более однородным, с меньшим количеством дефектов (черных точек, линий и разводов).

Обеспечена высокая воспроизводимость процесса (снижение стандартного отклонения более чем в 6 раз), что позволяет масштабировать предложенную технологию для серийного производства гибридных фотоприемников ближнего ИК-диапазона.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллективу АО «ЦНИИ «Электрон» за помощь в проведении исследования.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank the staff of NRI “Electron” for their help in conducting the research.

Вклад авторов

А.А. Егоренков – формулирование целей и задач исследования, научное руководство работой и координация выполнения исследования.

И.В. Данилова – участие в интерпретации результатов, выбор технологических маршрутов очистки поверхности, практическая отработка и оптимизация режимов на экспериментальных образцах, редактирование статьи.

М.И. Бибинова – выбор технологических маршрутов фотолитографии, практическая отработка и оптимизация режимов на экспериментальных образцах.

С.Н. Челышков – экспериментальные измерения параметров образцов и процессы напыления.

А.Н. Вязников – сбор, обработка и статистический анализ экспериментальных данных, подготовка сводных таблиц и выборок.

К.С. Баталов – разработка методики эксперимента и верификация полученных результатов.

Authors' contributions

A.A. Egorenkov – formulating the aims and objectives of the research, scientific guidance and coordinating the research.

I.V. Danilova – interpreting the results, selecting technological routes for surface cleaning, practical testing and optimizing the modes on experimental samples, editing the article.

M.I. Bibinova – selecting technological routes of photolithography, practical testing and optimizing the modes on experimental samples.

S.N. Chelyshkov – conducting experimental measurements of sample parameters and deposition processes.

A.N. Vyaznikov – collecting, processing and statistical analysis of experimental data, preparing tables and samples.

K.S. Batalov – developing the experimental methods and verifying the obtained results.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Криксунов Л.З. *Справочник по основам инфракрасной техники*. М.: Сов. Радио; 1978, 400 с.
2. Hansen M.P., Douglas S.M. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications. In: *Proceedings of SPIE 6939 Defense and Security Symposium (Thermosense XXX)*. 2008. P. 69390I-1–69390I-11. <https://doi.org/10.1117/12.777776>
3. Айнбунд М.Р., Егоренков А.А., Пашук А.В. Особенности изображений воды, льда, снега, предметов и человека, формируемых гибридной телевизионной камерой в ближнем инфракрасном диапазоне. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*. 2021;21(5):619–625. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625>

⁵ NPK Photonica. IMX991-AABA-C. <https://www.npk-photonica.ru/product/21366/>. Дата обращения 09.08.2025. / Accessed August 09, 2025. (In Russ.).

4. Song H., Yeo S., Jin Y., Park I., Ju H., Nalcakan Y., Kim S. Short-Wave Infrared (SWIR) Imaging for Robust Material Classification: Overcoming Limitations of Visible Spectrum Data. *Appl. Sci.* 2024;14(23):11049. <https://doi.org/10.3390/app142311049>
5. Pavlovic M.S., Milanovic P.D., Stankovic M.S., Peric D.B., Popadic I.V., Peric M.V. Deep Learning Based SWIR Object Detection in Long-Range Surveillance Systems: An Automated Cross-Spectral Approach. *Sensors.* 2022;22(7):2562. <https://doi.org/10.3390/s22072562>
6. Wilson R.H., Nadeau K.P., Jaworski F.B., Tromberg B.J., Durkina A.J. Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization. *J. Biomed. Opt.* 2015;20(3):030901. <http://doi.org/10.1117/1.JBO.20.3.030901>
7. Егоренков А.А., Зубков В.И., Соломонов А.В., Миронов Д.Е., Пашук А.В., Айнбург М.Р. Гибридный матричный фотоприемник для ИК-области спектра. *Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"*. 2021;4:15–22. <https://www.elibrary.ru/wvtgwi>
8. Enloe W., Sheldon R., Reed L., Amith A. Electron-bombarded CCD image intensifier with a GaAs photocathode. In: *Proceedings of Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology*. 1992. P. 41–49. <https://doi.org/10.1117/12.60337>
9. Zhang Y., Chen J., Yang J., Fu M., Cao Y., Dong M., Yu J., Dong S., Yang X., Shao L., Hu Z., Cai H., Liu C., Huang F. Sensitive SWIR Organic Photodetectors with Spectral Response Reaching 1.5 μm . *Adv. Mater.* 2024;36(41):2406950. <https://doi.org/10.1002/adma.202406950>
10. Costello K.A., Davis G.A., Weiss R.E., Aebi V.W. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron, In: *Proceedings SPIE 1449 (Electron Image Tubes and Image Intensifiers II)*. 1991. P. 40–50. <https://doi.org/10.1117/12.44264>
11. Мусатов А.Л., Израэльянц К.Р., Коротких В.Л., Филиппов С.Л., Руссу Е.В., Дякону И.И. Эмиссионные характеристики полупроводниковых гетероструктур с барьером Шоттки InGaAs-InP-Ag. *Физика и техника полупроводников*, 1990;24(9):1523–1530.
12. Aebi V., Costello K., Davis G., LaRue R., Weiss R. Near IR Photocathode Development. In: *Proceedings of 1997 Meeting of the IRIS Specialty Group on Active System*. 1997. Tucson. US.
13. Wang X., Shi M., Su L., Yang L., Deng X., Zhang Y., Tan H. NEA GaAs photocathode for electron source: From growth, cleaning, activation to performance. *Mater. Today Phys.* 2025;52:101680. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2025.101680>
14. Sun Y., Liu Z., Pianetta P. Surface dipole formation and lowering of the work function by Cs adsorption on InP(100) surface. *Vac. Sci. Technol. A*. 2007;25(5):1351–1356. <https://doi.org/10.1116/1.2753845>
15. Долгих А.В., Леонов И.А. Сканирующая эллипсометрия высокого разрешения как метод контроля чистоты поверхности ОЭС-фотокаодов при производстве электронно-оптических преобразователей. *Прикладная физика*. 2007;4:121–123. <https://www.elibrary.ru/iadlst>
16. Терещенко О.Е., Шайблер Г.Э., Ярошевич А.С., Шевелев С.В., Терехов А.С., Лундин В.В., Заварин Е.Е., Бесюлькин А.И. Низкотемпературная методика очистки поверхности p-GaN(0001) для фотоэмиттеров с эффективным отрицательным электронным средством. *Физика твердого тела*. 2004;46(10):1881–1885. <https://www.elibrary.ru/rczyer>
17. Machuca F., Liu Z., Sun Y., Pianetta P., Spicer W.E., Pease R.F.W. Simple method for cleaning gallium nitride (0001). *Am. Vac. Soc. A*. 2002;20(5):1784–1786. <https://doi.org/10.1116/1.1503782>
18. Pastuszka S., Terekhov A.S., Wolf A. 'Stable to unstable' transition in the (Cs, O) activation layer on GaAs (100) surfaces with negative electron affinity in extremely high vacuum. *Appl. Surf. Sci.* 1996;99(4):361–365. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(96\)00106-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(96)00106-7)
19. Jin M., Zhang Y., Chen X., Hao G., Chang B., Shi F. Effect of surface cleaning on spectral response for InGaAs photocathodes. *Appl. Opt.* 2015;54(36):10630–10635. <https://doi.org/10.1364/AO.54.010630>
20. Choi I-C., Kim H-T., Yerriboina N.P., Lee J.H., Teugels L., Kim T-G., Park J-G. Post-CMP Cleaning of InGaAs Surface for the Removal of Nanoparticle Contaminants for Sub-10nm Device Applications. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2019;8(5):3028–3034. <https://doi.org/10.1149/2.0051905jss>
21. Na J., Lim S. Elemental behaviors of InGaAs surface after treatment in aqueous solutions. *Microelectron. Eng.* 2019;212: 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.04.002>
22. Brussaard G.J.H., Letourneur K.G.Y., Schaepkens M., van de Sanden M.C.M., Schram D.C. Stripping of photoresist using a remote thermal Ar/O₂ and Ar/N₂/O₂ plasma. *J. Vac. Sci. Technol. B*. 2003;21(1):61–66. <https://doi.org/10.1116/1.1532021>
23. Kim J.H., Choi N., Kim Y.-H., Kim T.-S. Thickness dependence of the lithographic performance in 193nm photoresists. In: *Proceedings of SPIE 6153, Advances in Resist Technology and Processing XXIII*. 2006. V. 615337. <https://doi.org/10.1117/12.655777>

REFERENCES

1. Kriksunov L.Z. *Spravochnik po osnovam infrakrasnoi tekhniki (Handbook of the Fundamentals of Infrared Technology)*. Moscow: Sovetskoe Radio; 1978, 400 p. (In Russ.).
2. Hansen M.P., Douglas S.M. Overview of SWIR detectors, cameras, and applications. In: *Proceedings of SPIE 6939 Defense and Security Symposium (Thermosense XXX)*. 2008. P. 69390I-1–69390I-11. <https://doi.org/10.1117/12.777776>
3. Ainbund M.R., Egorenkov A.A., Pashuk A.V. Features of images of water, ice, snow, objects and a human formed by a hybrid television camera in the near-infrared range. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki = Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics*. 2021;21(5):619–625 (in Russ.). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2021-21-5-619-625>

4. Song H., Yeo S., Jin Y., Park I., Ju H., Nalcakan Y., Kim S. Short-Wave Infrared (SWIR) Imaging for Robust Material Classification: Overcoming Limitations of Visible Spectrum Data. *Appl. Sci.* 2024;14(23):11049. <https://doi.org/10.3390/app142311049>
5. Pavlovic M.S., Milanovic P.D., Stankovic M.S., Peric D.B., Popadic I.V., Peric M.V. Deep Learning Based SWIR Object Detection in Long-Range Surveillance Systems: An Automated Cross-Spectral Approach. *Sensors.* 2022;22(7):2562. <https://doi.org/10.3390/s22072562>
6. Wilson R.H., Nadeau K.P., Jaworski F.B., Tromberg B.J., Durkina A.J. Review of short-wave infrared spectroscopy and imaging methods for biological tissue characterization. *J. Biomed. Opt.* 2015;20(3):030901. <http://doi.org/10.1117/1.JBO.20.3.030901>
7. Egorenkov A.A., Zubkov V.I., Solomonov A.V., Mironov D.E., Pashuk A.V., Ainbund M.R. Hybrid matrix photodetector for infrared spectral range. *Izvestiya SPbGETU "LETP" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University.* 2021;4:15–22 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/wvtgwi>
8. Enloe W., Sheldon R., Reed L., Amith A. Electron-bombarded CCD image intensifier with a GaAs photocathode. In: *Proceedings of Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology.* 1992. P. 41–49. <https://doi.org/10.1117/12.60337>
9. Zhang Y., Chen J., Yang J., Fu M., Cao Y., Dong M., Yu J., Dong S., Yang X., Shao L., Hu Z., Cai H., Liu C., Huang F. Sensitive SWIR Organic Photodetectors with Spectral Response Reaching 1.5 μm . *Adv. Mater.* 2024;36(41):2406950. <https://doi.org/10.1002/adma.202406950>
10. Costello K.A., Davis G.A., Weiss R.E., Aebi V.W. Transferred electron photocathode with greater than 5% quantum efficiency beyond 1 micron. In: *Proceedings SPIE 1449 (Electron Image Tubes and Image Intensifiers II).* 1991. P. 40–50. <https://doi.org/10.1117/12.44264>
11. Musatov A.L., Izraelyants K.R., Korotkikh V.L., Filippov S.L., Russu E.V., Dyakonov I.I. Emission characteristics of semiconductor heterostructures with a Schottky barrier InGaAs-InP-Ag. *Phizika i tehnika poluprovodnikov = Physics and Technics of Semiconductors.* 1990;24(9):1523–1530 (in Russ.).
12. Aebi V., Costello K., Davis G., LaRue R., Weiss R. Near IR Photocathode Development. In: *Proceedings of 1997 Meeting of the IRIS Specialty Group on Active System.* 1997. Tucson. US.
13. Wang X., Shi M., Su L., Yang L., Deng X., Zhang Y., Tan H. NEA GaAs photocathode for electron source: From growth, cleaning, activation to performance. *Mater. Today Phys.* 2025;52:101680. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2025.101680>
14. Sun Y., Liu Z., Pianetta P. Surface dipole formation and lowering of the work function by Cs adsorption on InP(100) surface. *Vac. Sci. Technol. A.* 2007;25(5):1351–1356. <https://doi.org/10.1116/1.2753845>
15. Dolgikh A.V., Leonov I.A. High resolution scanning ellipsometry as test method of NEA-photocathode surface cleanliness in image intensifier tubes manufacture. *Prikladnaya Fizika = Applied Physics.* 2007;4:121–123 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/iadlst>
16. Tereshchenko O.E., Shaibler G.É., Yaroshevich A.S., et al. Low-temperature method of cleaning *p*-GaN(0001) surfaces for photoemitters with effective negative electron affinity. *Phys. Solid State.* 2004;46(10):1949–1953. <https://doi.org/10.1134/1.1809437>
[Original Russian Text: Tereshchenko O.E., Shaibler G.É., Yaroshevich A.S., Shevelev S.V., Terekhov A.S., Lundin V.V., Zavarin E.E., Besyulkin A.I. Low-temperature method of cleaning *p*-GaN(0001) surfaces for photoemitters with effective negative electron affinity. *Fizika Tverdogo Tela.* 2004;46(10):1881–1885 (in Russ.). <https://www.elibrary.ru/rczyer>]
17. Machuca F., Liu Z., Sun Y., Pianetta P., Spicer W.E., Pease R.F.W. Simple method for cleaning gallium nitride (0001). *Am. Vac. Soc. A.* 2002;20(5):1784–1786. <https://doi.org/10.1116/1.1503782>
18. Pastuszka S., Terekhov A.S., Wolf A. ‘Stable to unstable’ transition in the (Cs, O) activation layer on GaAs (100) surfaces with negative electron affinity in extremely high vacuum. *Appl. Surf. Sci.* 1996;99(4):361–365. [https://doi.org/10.1016/0169-4332\(96\)00106-7](https://doi.org/10.1016/0169-4332(96)00106-7)
19. Jin M., Zhang Y., Chen X., Hao G., Chang B., Shi F. Effect of surface cleaning on spectral response for InGaAs photocathodes. *Appl. Opt.* 2015;54(36):10630–10635. <https://doi.org/10.1364/AO.54.010630>
20. Choi I-C., Kim H-T., Yerriboina N.P., Lee J.H., Teugels L., Kim T-G., Park J-G. Post-CMP Cleaning of InGaAs Surface for the Removal of Nanoparticle Contaminants for Sub-10nm Device Applications. *ECS J. Solid State Sci. Technol.* 2019;8(5): 3028–3034. <https://doi.org/10.1149/2.0051905jss>
21. Na J., Lim S. Elemental behaviors of InGaAs surface after treatment in aqueous solutions. *Microelectron. Eng.* 2019;212: 27–36. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2019.04.002>
22. Brussaard G.J.H., Letourneur K.G.Y., Schaepkens M., van de Sanden M.C.M., Schram D.C. Stripping of photoresist using a remote thermal Ar/O₂ and Ar/N₂/O₂ plasma. *J. Vac. Sci. Technol. B.* 2003;21(1):61–66. <https://doi.org/10.1116/1.1532021>
23. Kim J.H., Choi N., Kim Y.-H., Kim T.-S. Thickness dependence of the lithographic performance in 193nm photoresists. In: *Proceedings of SPIE 6153, Advances in Resist Technology and Processing XXIII.* 2006. V. 615337. <https://doi.org/10.1117/12.655777>

Об авторах

Егоренков Артём Александрович, начальник научно-исследовательского отдела, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: a.egorenkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

Данилова Ирина Владимировна, инженер, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: i.danilova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-7160-8308>

Бибинова Мария Ивановна, инженер-технолог, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: m.bibinova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0007-0006-867X>

Челышков Сергей Николаевич, инженер, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: s.chelyshkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0664-1808>

Вязников Алексей Николаевич, генеральный директор, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: a.vyaznikov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0003-7248-5852>

Баталов Константин Сергеевич, заместитель начальника научно-исследовательского отдела, АО «ЦНИИ «Электрон» (194223, Россия, Санкт-Петербург, пр-т Тореца, д. 68, лит. Р). E-mail: k.batalov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4140-8794>

About the Authors

Artyom A. Egorenkov, Head of Scientific Research Department, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: a.egorenkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0084-564X>

Irina V. Danilova, Engineer, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: i.danilova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-7160-8308>

Maria I. Bibinova, Engineer, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: m.bibinova@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0007-0006-867X>

Sergei N. Chelyshkov, Engineer, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: s.chelyshkov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0000-0002-0664-1808>

Alexei N. Vyaznikov, CEO, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: a.vyaznikov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0003-7248-5852>

Konstantin S. Batalov, Deputy Head of the Research Department, JSC “NRI Electron” (68, Toreza pr., Saint Petersburg, 194223 Russia). E-mail: k.batalov@niielectron.ru. <https://orcid.org/0009-0009-4140-8794>