

УДК 621.383.4/5: 621.315.59
EDN: IJAWECPACS: 07.07 Df, 07.57.-c, 81.05.Ea,
81.65.Rv**Характеристики малоформатных матричных фотоприемников***А. А. Лопухин, Е. В. Пермикина, К. В. Барышева, А. Н. Гришина*

Исследованы малоформатные матричные фотоприемники спектрального диапазона $3\div 5$ мкм на основе матриц фотодиодов из антимонида индия с минимальной дефектностью и однородной чувствительностью. Показано, что отбор пластин из слитков InSb для изготовления МФЧЭ в соответствии с анализом статистических данных и применение группового утоньшения и отмывки позволили получить 22 % бездефектных от общего числа матричных фотоприемников (МФП) при бездефектной центральной области. Установлено, что обработка ионами аргона смотрящей стороны фотодиодной матрицы существенно улучшает однородность распределения чувствительности по площади МФП.

Ключевые слова: матричные фотоприемные устройства (МФПУ); средневолновый спектральный диапазон; антимонид индия; дефектность; однородность чувствительности; групповое утоньшение; ионное травление; рекомбинация.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-1-60-63

Введение

Фотоприемные устройства (ФПУ) на основе фотодиодных матриц из антимонида индия (InSb) широко применяются в современных тепловизионных и теплопеленгационных системах для среднего инфракрасного спектрального диапазона [1]. В настоящее время для распознавания высокоскоростных объектов наиболее востребованы малоформатные матричные ФПУ. Малая фотоэлектрическая взаимосвязь фоточувствительных элементов (ФЧ) малоформатных матриц позволяет получать тепловизионные изображения с четкими

очертаниями, уменьшая размытие границ объектов. На утоньшенных МФЧЭ (матричных фоточувствительных элементах) ближняя взаимосвязь в области 3×3 элемента не превышает 5 % [2]. Хорошая однородность чувствительности по площади фотодиодной матрицы и минимизация до нуля числа фотоэлектрических дефектов позволяют с максимальной точностью распознавать объекты [3, 6].

Структура малоформатных МФП (матричных фотоприемников) на основе InSb представляет собой матрицу формата 64×64 фоточувствительных элементов, гибридизированную с БИС-считывания на растре и фильтром. Для улучшения квантового выхода наносится просветляющее покрытие со стороны засветки МФЧЭ. Толщина матрицы ФЧЭ $10\div 20$ мкм определяется балансом между достижением оптимального квантового выхода и взаимосвязью, обусловленной боковой диффузией неосновных носителей заряда [4].

Лопухин Алексей Алексеевич, нач. участка, к.т.н.
E-mail: alexmatr0@mail.ru
Пермикина Елена Вячеславовна, вед. инженер.
Барышева Ксения Владимировна, инженер 1 кат.
Гришина Анна Николаевна, инженер 1 кат.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Статья поступила в редакцию 12.12.2024
После доработки 10.01.2025
Принята к публикации 1.02.2025
Шифр научной специальности: 1.3.11

© Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Барышева К. В.,
Гришина А. Н., 2025

Дефектность МФЧЭ

Статистическая обработка и анализ данных по дефектности МФЧЭ, полученных из

пластин слитков антимонида индия, показали, что для изготовления фотодиодных матриц с оптимальными характеристиками наиболее пригодны пластины, взятые из середины слитков. Отбор пластин для изготовления МФЧЭ в соответствии с анализом статистических данных позволил увеличить процент выхода бездефектных МФПУ.

На рисунке 1 показано интегральное распределение дефектности матричных фотоприемников. От общего числа МФП бездефектные фотоприемники составили 22 %, а с одним фотоэлектрическим дефектом 48 % (при бездефектной центральной области) для группового утоньшения. Видно, что дефектность большей части МФП не превышает 10-ти элементов. В среднем, дефектность составила ≈ 2 шт. (измерено 368 МФП).

Улучшение однородности распределения чувствительности (токовой или вольто-

вой) по площади матрицы фоточувствительных элементов определяется однородностью МФЧЭ по толщине, так как число поглощаемых фотонов и генерируемых носителей заряда локально в объеме полупроводниковой матрицы и зависит от ее толщины. Для получения матриц ФЧЭ с однородной толщиной и реализации массового изготовления фотоприемников наиболее оптимально применение группового утоньшения и отмывки МФП [5]. Групповая химико-динамическая полировка при утоньшении фотодиодных матриц со стороны засветки позволила сократить краевые эффекты, связанные с переутоньшением матриц по периметру МФЧЭ, благодаря чему сократились области пониженной чувствительности на краях матриц. МФП на основе таких матриц позволили получить более однородные изображения для улучшения распознаваемости объектов.

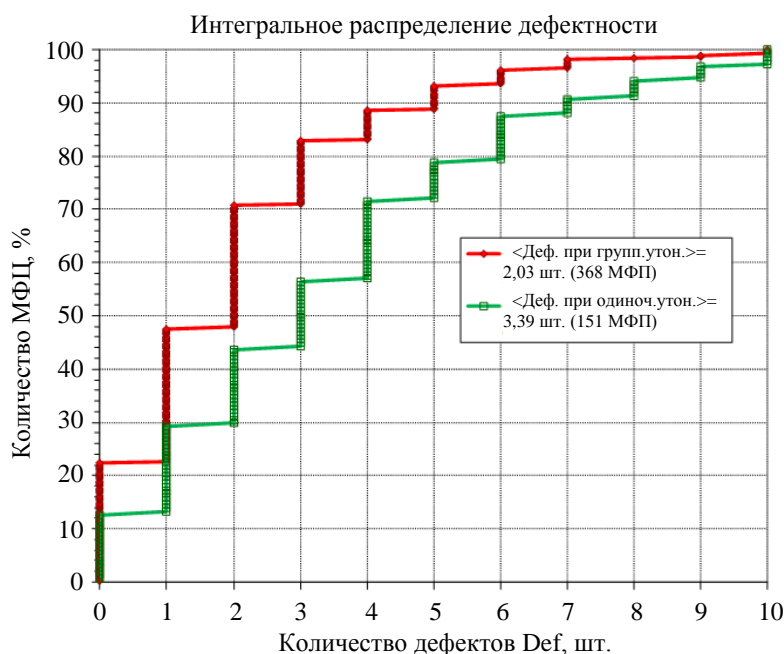


Рис. 1. Интегральные распределения дефектности матричных фотоприемников

Однородность чувствительности

На рисунке 2 показаны интегральные распределения разброса чувствительности матричных фотоприемников, изготовленных при одиночном и групповом утоньшении матриц ФЧЭ. В среднем разброс чувствительности при групповых методах обработки уменьшился до 3,7 % (4,2 % – при одиночном утоньшении).

Другим фактором, влияющим на улучшение однородности чувствительности, явля-

ется максимальное сокращение областей с повышенной скоростью рекомбинации фотогенерированных носителей тока, определяемой высокой плотностью дополнительных энергетических уровней в запрещенной зоне. При падении оптического излучения со стороны просветленной поверхности МФЧЭ часть фотоносителей может собираться на длине диффузии на границе раздела матрица ФЧЭ – просветляющее покрытие и рекомбинировать вследствие высокой плотности электронных состояний.

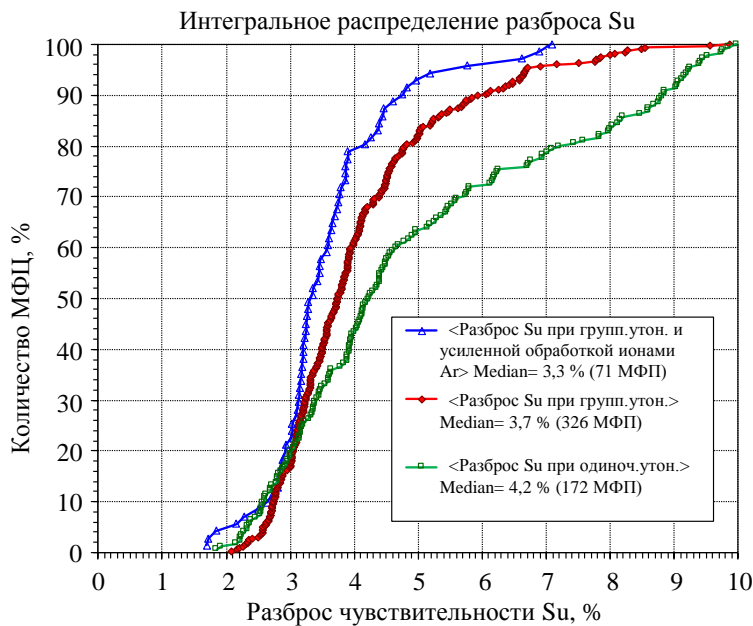


Рис. 2. Интегральные распределения разброса чувствительности матричных фотоприемников

Рекомбинация носителей заряда возникает из-за неоднородных по толщине и составу окисных пленок на поверхности матриц ФЧЭ, а также других дефектов, образующихся при технологической обработке, предполагает появление дополнительных состояний в запрещенной зоне, приводящих к повышению скорости рекомбинации в локализованных участках матрицы, что способствует увеличению разброса чувствительности.

Применение ионной обработки низкоэнергетическим потоком положительно заряженных ионов аргона (высокочастотное катодное распыление ионами аргона с энергией менее 0,25 кэВ удаляет нарушенный слой толщиной не менее 0,5 мкм) поверхности МФЧЭ позволяет удалить механически поврежденный, а также частично или полностью (в зависимости от числа ионных обработок) нарушенный слой материала, изменить величину поверхностного заряда, препятствуя стеканию подвижных носителей заряда в приповерхностную область и дальнейшей их рекомбинации [6, 7]. Обработка ионами аргона перед просветлением создает на поверхности с тыльной стороны матрицы положительный встроенный заряд, обеспечивающий существенный изгиб запрещенной зоны полупроводника, но не более ширины запрещенной зоны, который формирует отталкивающее поле для неосновных носителей заряда. Именно поэтому образующийся в процессе воздействия низкоэнергетическим потоком положительно заряженных ионов аморфный припо-

верхностный слой толщиной менее 50 Å [8] с большой величиной поверхностной рекомбинации не оказывает существенного влияния на эффективную скорость рекомбинации и не создает дополнительных темновых токов фотодиодов.

Благодаря усиленной ионной обработке тыльной поверхности [6, 7] улучшилась однородность чувствительности по площади МФП при групповом утоньшении (см. рис. 2). Ионная обработка удалила значительную часть нарушенного поверхностного материала и инициировала большой положительный встроенный заряд на границе раздела со стороны падающего излучения. Увеличение поверхностного потенциала сформировало отталкивающее поле для неосновных носителей заряда и подавило рекомбинацию фотонесителей на поверхности, благодаря чему разброс чувствительности (токовой или вольтовой) по площади МФЧЭ уменьшился в несколько раз.

Выводы

1. Показано, что отбор пластин из слитков InSb для изготовления МФЧЭ в соответствии с анализом статистических данных и применение группового утоньшения и отмычки позволяют получить 22 % бездефектных от общего числа матричных фотоприемников при бездефектной центральной области.

2. Установлено, что обработка ионами аргона смотрящей стороны фотодиодной матрицы существенно улучшает однородность

распределения чувствительности по площади МФП.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Яковлева Н. И., Власов П. В., Лазарев П. С. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 2. С. 170–182.
2. Болтарь К. О., Власов П. В., Лазарев П. С., Лопухин А. А., Чишко В. Ф. / Прикладная физика. 2020. № 1. С. 18–24.
3. Лопухин А. А., Болтарь К. О., Гришина А. Н., Шиишгин С. Е. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 14–22.
4. Лопухин А. А., Болтарь К. О., Власов П. В., Ерошенков В. В., Чишко В. Ф., Коцавцев Н. Ф., Ларионов Н. А. / Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 5. С. 334–340.

5. Лопухин А. А., Ерошенков В. В., Иродов Н. А., Савостин А. В., Барышева К. В., Власов П. В., Пермикина Е. В., Гришина А. Н. Способ группового изготовления утоньшенной гибридной сборки для матричного фотоприемника. Патент № 2811380 (РФ). 2023.

6. Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Болтарь К. О., Гришина А. Н. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 421–431.

7. Власов П. В., Гришина А. Н., Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Шиишгин С. Е. Способ изготовления утоньшенного многоэлементного фотоприемника на основе антимолибдита индия с улучшенной однородностью и повышенной механической прочностью. Патент № 2811379 (РФ). 2023.

8. Chulkyun Seok, Minkyung Choi, Sehun Park, Jinwook Jung, Yongjo Park, In-Sang Yang, Euijoon Yoona / ECS Solid State Letters. 2014. Vol. 3 (3). P. P27–P29.

PACS: 07.07 Df, 07.57.-c, 81.05.Ea, 81.65.Rv

Small-format InSb FPA characterization

A. A. Lopukhin, E. V. Permikina, K. V. Barysheva and A. N. Grishina

Orion R&P Association, JSC
9 Kosinskaya st., Moscow, 111538, Russia

Received 12.12.2024; revised 10.01.2025; accepted 1.02.2025

Small-format InSb FPA uniformity of sensitivity and defective elements distribution are investigated. Group of thinning make it possible to obtain 22 % defect-free of total number and the defects-free central region FPA. Ionic milling backside of the FPA before anti-reflective coating can significantly suppress the recombination of photo carriers, as well as decreases of sensitivity spread over the array area in several times.

Keywords: Focal Plane Array (FPA); mid-infrared range; indium antimonide; defects; uniformity of sensitivity; group of thinning; ionic milling; recombination.

REFERENCES

1. Boltar K. O., Burlakov I. D., Iakovleva N. I., Vlasov P. V. and Lazarev P. S., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **10** (2), 170–182 (2022) [in Russian].
2. Boltar K. O., Vlasov P. V., Lazarev P. S., Lopukhin A. A. and Chishko V. F., Applied Physics, № 1, 18–24 (2020) [in Russian].
3. Lopukhin A. A., Boltar K. O., Grishina A. N. and Shishigin S. E., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **10** (1), 14–22 (2022) [in Russian].
4. Lopukhin A. A., Boltar K. O., Vlasov P. V., Eroshenko V. V., Chishko V. F., Koshchavtsev N. F. and Lariyonov N. A., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **8** (5), 334–340 (2020) [in Russian].
5. Lopukhin A. A., Eroshenko V. V., Irodov N. A., Savostin A. V., Barysheva K. V., Vlasov P. V., Permikina E. V. and Grishina A. N. Method of group fabrication of a thinned hybridized assembly for a matrix photodetector. Patent № 2811380 (RF). 2023.
6. Lopukhin A. A., Permikina E. V., Boltar K. O. and Grishina A. N., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **11** (5), 421–431 (2023) [in Russian].
7. Vlasov P. V., Grishina A. N., Lopukhin A. A., Permikina E. V. and Shishigin S. E. A method for manufacturing a thinned multi-element photodetector based on indium antimonide with improved uniformity and increased mechanical strength. Patent № 2811379 (RF). 2023.
8. Chulkyun Seok, Minkyung Choi, Sehun Park, Jinwook Jung, Yongjo Park, In-Sang Yang and Euijoon Yoona, ECS Solid State Letters **3** (3), P27–P29 (2014).