

УДК 53  
EDN: GMNUEJPACS: 07.07.Df, 07.57.-c,  
81.05.Ea, 81.65.Rv

## Тестовые структуры для исследования зависимости фотоэлектрических характеристик крупноформатных МФПУ от топологии элементов на основе InSb

© А. А. Лопухин<sup>1,\*</sup>, Е. В. Пермикина<sup>1</sup>, К. В. Барышева<sup>1</sup>, В. В. Лопатин<sup>2</sup><sup>1</sup> АО «НПО «Орион», Москва, 111538 Россия

\* E-mail: alexmatr0@mail.ru

<sup>2</sup> Фонд перспективных исследований, Москва, 121059 Россия

Статья поступила в редакцию 3.09.2025, после доработки 15.09.2025; принята к публикации 20.10.2025  
Шифр научной специальности: 1.3.5

*С целью получения и сравнения основных фотоэлектрических характеристик МФПУ в пределах одной крупноформатной матрицы, разработаны топологии тестовых матричных структур на основе InSb с квадратной и круглой формами фоточувствительной области, шагом элементов 10, 12, 15 и 20 мкм, предназначенных для гибридизации с БИС считывания формата 1280×1024 и шагом 12 мкм. Представлена структура комплекта фотошаблонов с матричными тестовыми элементами для реализации клиновидного утоньшения с целью получения сверхтонких структур с контролируемой толщиной для повышения прочности и минимизации взаимосвязи. Проанализированы возможности реализации предложенных тестовых структур.*

**Ключевые слова:** матричные фотоприемные устройства (МФПУ); матрица фоточувствительных элементов (МФЧЭ); антимонид индия; взаимосвязь; сканирующая маска; топология; тестовая матричная структура.

DOI: 10.51368/1996-0948-2025-5-25-32

### Введение

В современных МФПУ среднего ИК спектрального диапазона с высокой разрешающей способностью и полем зрения при обнаружении тепловых объектов используются фотодиодные матрицы из InSb [1]. Оптическое излучение, падающее со стороны просветленной поверхности матрицы фоточувствительных элементов, генерирует фототок в объеме МФЧЭ, при этом часть фотоносителей при большой длине диффузии может собираться в соседних элементах, увеличивая фотоэлектрическую взаимосвязь. При уменьшении шага элементов фотоэлектрическая взаимосвязь становится критическим параметром, а также неизбежно увеличивается отношение периметра к площади и усиливается влияние поверхностных токов утечки на ха-

рактеристики. Для решения проблемы взаимосвязи применяются структуры с тонкой фоточувствительной областью, что требует упрочнения МФЧЭ [2, 3, 4] и выбора компромисса между величиной взаимосвязи и квантовым выходом фотоприемника. Однородность фотоэлектрических характеристик элементов матрицы ФЧЭ (в особенности, крупноформатной) непосредственно определяется сложностью её изготовления.

С другой стороны, современные мегапиксельные МФПУ построены по гибридной схеме, где наиболее сложной и дорогостоящей частью является большая интегральная схема (БИС) считывания, требующая длительного периода разработки, проектирования, тестирования и отладки.

В связи с этим с целью получения максимально достоверной информации о зависи-

мости фотоэлектрических характеристик матричных ФЧЭ (взаимосвязь, обнаружительная способность, квантовый выход и т. д.) от шага элементов, толщины фоточувствительной структуры, топологии фоточувствительной области (меза, планар, меза-планар), формы фоточувствительных областей (квадрат, круг) предложено использовать матричные тестовые структуры МФЧЭ с различной топологией, гибридные с большой интегральной схемой считывания формата 1280×1024 и шагом 12 мкм. Для того, чтобы уменьшить влияние большого технологического разброса, связанного с неоднородностями материала по площади пластины, тестовые структуры рас-

полагаются в пределах одной матрицы, и сравниваются фотоэлектрические характеристики геометрически близко расположенных друг к другу элементов, отличающихся топологией и шагом (рис. 1). Сравнение фотоэлектрических характеристик в пределах одной матрицы позволяет более точно устанавливать «тонкие» различия между элементами.

Исследование фотоэлектрических характеристик МФЧЭ, гибридного с мегапиксельной БИС считывания, также позволяет выявить особенности функционирования интегральной схемы и, при необходимости, скорректировать разработанную БИС считывания.

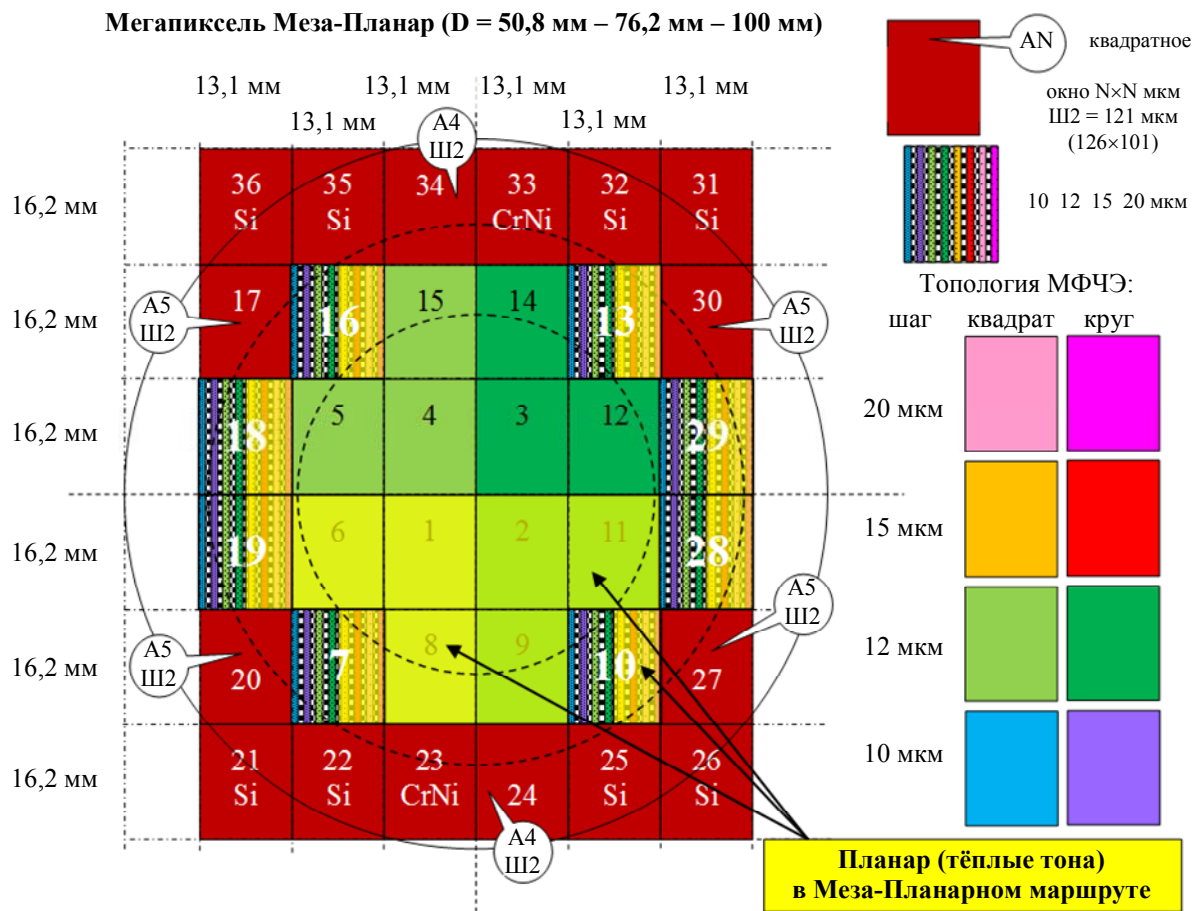


Рис. 1. Расположение тестовых структур на пластине МФЧЭ из InSb (меза-планарный вариант)

### Топология матричных тестовых структур

На рисунке 1 представлены 8 матричных тестовых структур (№№ 7, 10, 13, 16, 18, 19, 28, 29), отличающихся квадратной и круглой формами фоточувствительной области и шагом элементов: 10, 12, 15 и 20 мкм в пределах одной матрицы. В рамках меза-планарного

маршрута возможно реализовать области элементов в виде полос вдоль длинной стороны одной матрицы, как показано на рисунке 2, для архитектур, позволяющих совмещать такие варианты, и проводить их «тонкое» сравнение (рис. 1, 2). Желтыми и теплыми тонами обозначены планарные варианты фоточувствительных элементов, светло-голу-

быми (рис. 2 слева) – структурные массивы фотодиодов с изменяемой площадью для

определения качества пассивации матриц ФЧЭ [5, 6].

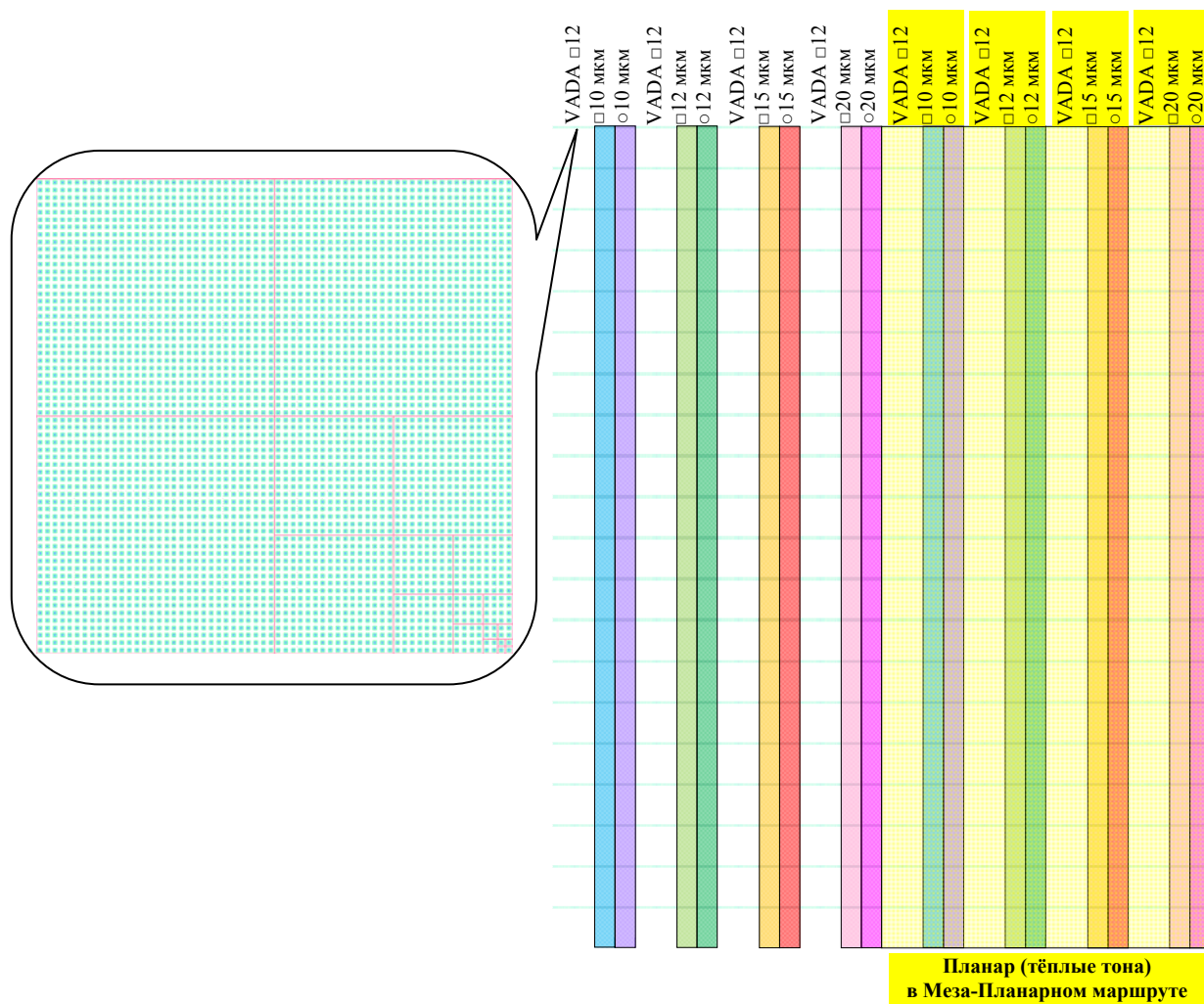


Рис. 2. Варианты тестовых структур МФЧЭ в пределах одной матрицы: 1/2 матрицы слева – меза (холодные тона); 1/2 матрицы справа – планар (теплые тона)

Реализация тестовых матричных структур возможна одновременно с изготовлением МФЧЭ формата 1280×1024 и шагом 12 мкм на пластинах и эпитаксиальных структурах антимонида индия диаметрами 76,2 мм и 100 мм. Однако получение угловых элементов тестовых матриц возможно и на пластинах диаметром 50,8 мм при дальнейшей гибридации этих угловых элементов на один БИС считывания и утоньшении сборки. Таким образом, тестовые структуры не ограничивают получение максимального количества годных рабочих матриц ФЧЭ в рамках данных диаметров пластин.

Для изготовления МФЧЭ необходимы шесть основных фотошаблонов. В таблице

приведены минимальные размеры, обеспечиваемые каждым из фотошаблонов с учетом шага ФЧЭ. Фотошаблон для формирования окон предлагается одновременно использовать для получения сканирующих масок и хром-никелевых зеркал на периферии пластин из кремния диаметром 100 мм (ФШ «Окно+Si»). Сканирующие маски могут применяться для исследования распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника [7, 8], а хром-никелевые зеркала использоваться при измерении темнового тока для определения эффективности пассивации крупноформатных МФЧЭ [5, 6]. Данные тестовые структуры обозначены на рисунке 1 темно-красным цветом.

Таблица

Минимальные размеры	шаг = 20 мкм	шаг = 15 мкм	шаг = 12 мкм	шаг = 10 мкм
1. ФШ «Меза»	1 мкм	1 мкм	1 мкм	1 мкм
2. ФШ «Планар»	2 мкм	2 мкм	2 мкм	2 мкм
3. ФШ «Окно+Si»	4 мкм	4 мкм	4 мкм	3 мкм
4. ФШ «CrNi»	7 мкм	7 мкм	7 мкм	6 мкм
5. ФШ «In»	7 мкм	7 мкм	7 мкм	6 мкм
6. ФШ «Канавка»	5 мкм	5 мкм	5 мкм	5 мкм

Основной топологической особенностью МФЧЭ является квадратная или круглая форма элементов (рис. 3). При достижении хорошей чувствительности и максимального квантового выхода квадратная или круглая форма fotocувствительной области имеют свои преимущества, обусловленные шагом элементов в матричной структуре. С уменьшением шага более оптимальной является круглая форма вследствие роста влияния периметра, особенно в планарном варианте, где боковая часть  $p$ - $n$ -перехода приводит к увеличению темнового тока, по сравнению с вариантом мезы. С другой стороны, из-за плотной упаковки элементов в МФЧЭ в случае круглой формы возникает значительная область, требующая пассивации поверхности для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации и увеличения квантового выхода. Выбранный ряд шагов 10, 12, 15 и 20 мкм позволит выявить основные тенденции фотоэлектрических параметров МФЧЭ.

На рисунке 3 представлены изображения угловых фрагментов совмещения топологий верхних слоев БИС считывания формата 1280×1024 с шагом 12 мкм с учетом 4-х рядов общих контактов и не менее двух неопрашиваемых рядов, выполняющих функцию «охранных колец» с целью подавления краевых эффектов, обусловленных боковой диффузией неосновных носителей заряда, с топологией МФЧЭ для шагов 10 мкм (а), 12 мкм (б), 15 мкм (в), 20 мкм (г) с квадратной и круглой формами fotocувствительных элементов. Видно, что периоды из 6, 5, 4, 3 элементов МФЧЭ соответствуют шагам 10, 12, 15, 20 мкм и равны периоду из 5-ти элементов БИС считывания с шагом 12 мкм. На рисунке 3а показан вариант наилучшего совмещения квадрат-

ной и круглой области In микроконтактов формата 5×5 элементов, в пределах которой возможно получение основных фотоэлектрических параметров МФПУ для шага 10 мкм. При этом каждый шестой элемент МФЧЭ должен изготавливаться без In микроконтактов и замыкаться по CrNi дорожкам на общий контакт на периферии, образуя решетку замкнутых  $p$ - $n$ -переходов для предотвращения краевых эффектов, обусловленных боковой диффузией неосновных носителей заряда. С целью обеспечения наилучшего контакта и отсутствия замыканий для шага МФЧЭ 15 мкм (рис. 3в) определено смещение от центра мезы размером 1 мкм в направлении по диагонали к центру каждого элемента группы 4×4 элементов МФЧЭ. Аналогично, для шага МФЧЭ 20 мкм (рис. 3г) определено смещение от центра мезы размером 2 мкм в направлении от центра каждого краевого элемента группы 3×3 элементов МФЧЭ.

Изменяемые топологические параметры элементов (квадрат, круг, шаг) в пределах одной матрицы были реализованы в виде полос вдоль длинных сторон кристаллов с целью клиновидного утоньшения вдоль этих полос после гибридизации с БИС считывания для измерения зависимостей фотоэлектрических характеристик от толщины. Из этих зависимостей можно извлечь такие параметры как объемную диффузионную длину, судить о механизмах возникновения темнового тока, получить информацию о рекомбинации на границе эпитаксиального роста с подложкой и т. д. Для точного измерения толщины по интерференции в каждом элементе предполагается использовать поэлементное измерение спектральных характеристик [9].

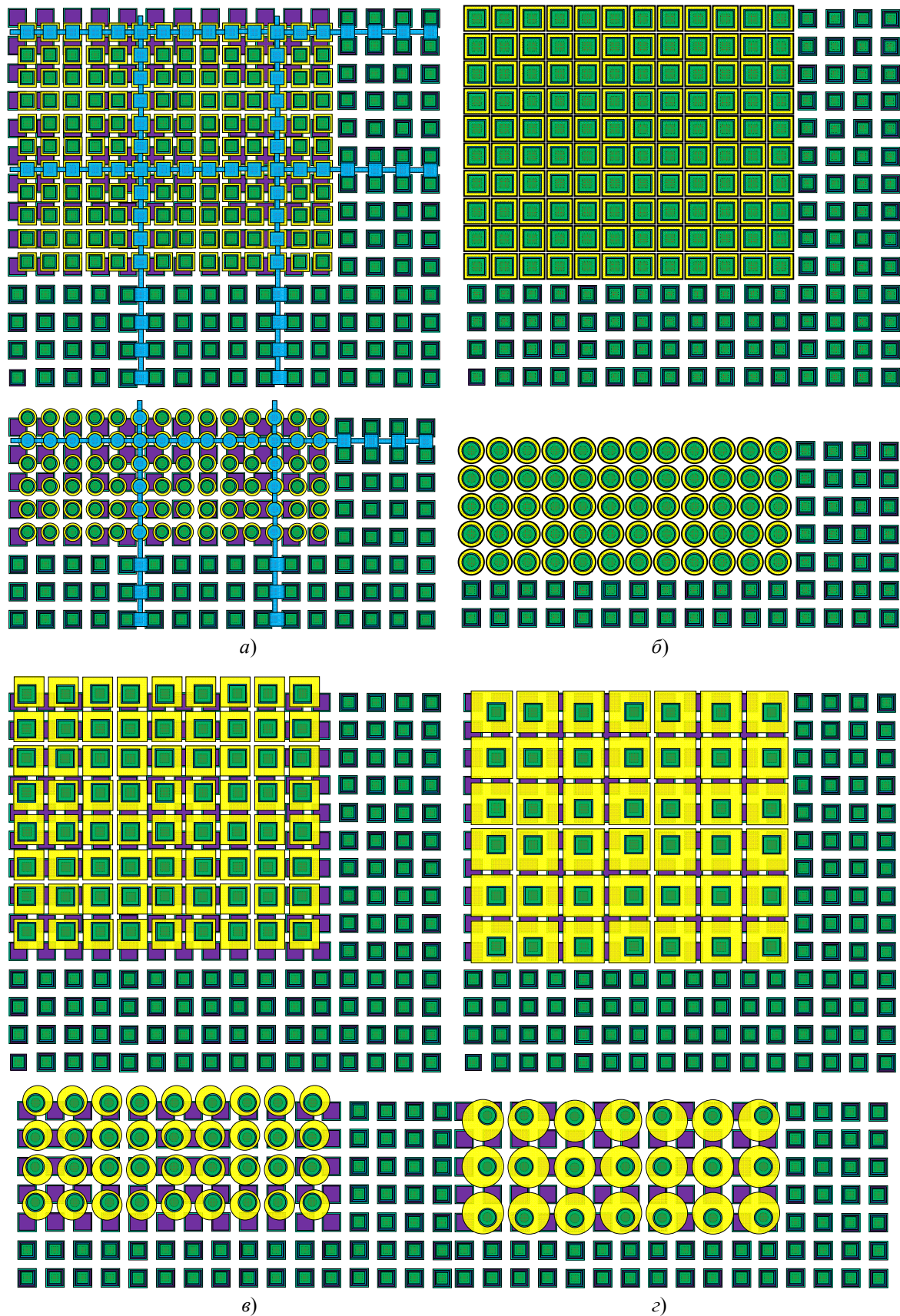
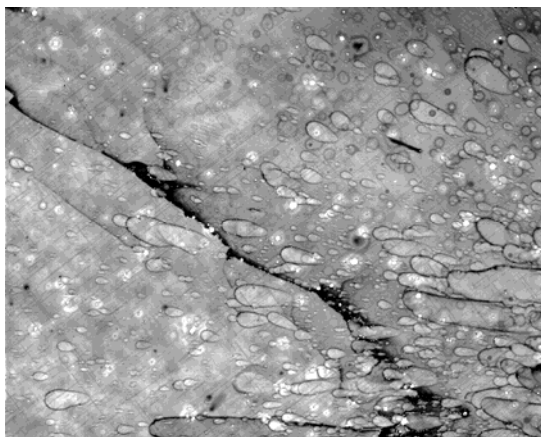


Рис. 3. Изображения угловых фрагментов совмещения топологий верхних слоев БИС считывания формата  $1280 \times 1024$  элементов с шагом 12 мкм (CrNi –  $\square$ , In –  $\blacksquare$ ) с топологиями МФЧЭ формата  $1536 \times 1228$  с шагом 10 мкм (а), формата  $1280 \times 1024$  с шагом 12 мкм (б), формата  $1024 \times 819$  с шагом 15 мкм (в), формата  $768 \times 614$  с шагом 20 мкм (з) для квадратной (выше) и круглой (ниже) топологий

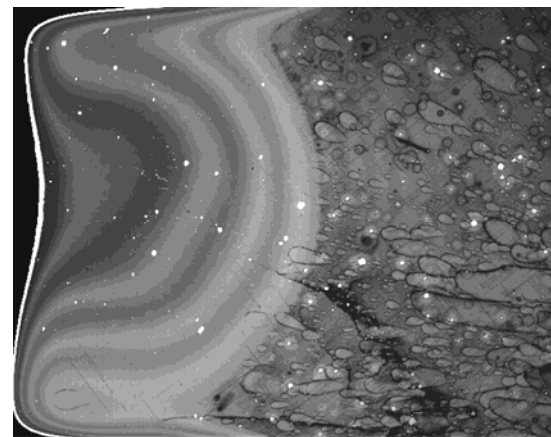
### Клиновидный тест

Особое значение имеет исследование взаимосвязи фотоэлектрических элементов и квантового выхода фотоприемника в зависимости от толщины фоточувствительной области. Как известно, с уменьшением толщины фоточувствительной области фотоэлектрическая взаимосвязь между элементами уменьшается, но вместе с этим уменьшение числа фотоносителей приводит к понижению квантового выхода и, соответственно, чувствительности фотоприемника. Определение оптимального соотношения толщины и взаимосвязи элементов возможно, исследуя распределение чувствительности ФЧЭ по площади утоньшенных клиновидным образом

матриц с применением сканирующих масок из кремния [7, 8]. Смотрящую сторону матрицы ФЧЭ без просветления с изменяющейся толщиной необходимо предварительно обработать ионами аргона для исключения поверхностной рекомбинации [3, 4]. На рисунке 4 приведен пример изображений выходного сигнала эпитаксиального образца с толщиной поглощающего слоя 4 мкм, выращенного на высоколегированной подложке антимонода индия ориентации (100), с имплантированными  $p-n$ -переходами формата  $640 \times 512$  с шагом 15 мкм до и после утоньшения клиновидным образом слева направо от  $\sim 0$  до  $\sim 14$  мкм без антиотражающего покрытия с ионной обработкой  $Ag^+$ .



а)



б)



в)

**Рис. 4.** Пример распределения величины выходного сигнала МФПУ с толщиной поглощающего слоя 4 мкм, выращенного эпитаксиально на высоколегированной подложке антимонода индия ориентации (100), с имплантированными  $p-n$ -переходами формата  $640 \times 512$  с шагом 15 мкм: а) – до утоньшения; б) – утоньшенного клиновидным образом слева направо от  $\sim 0$  до  $\sim 14$  мкм без антиотражающего покрытия с ионной обработкой  $Ag^+$  при фоновой засветке и в) – без фоновой засветки

На рисунке 4а представлено распределение величины выходного сигнала эпитаксиального образца до утоньшения при фоновой засветке. Светлые участки соответствуют утечкам  $p-n$ -переходов, а темные – соответствуют рекомбинации в  $n$ -области. После утоньшения со стороны подложки клиновид-

ным образом на фотоэлектрическом изображении, полученном в фоновом режиме, хорошо видна граница эпитаксиального роста (рис. 4б) с разрешением по толщине  $\sim 20$  нм, ограниченным шагом матрицы 15 мкм и величиной клина. В левой части изображения хорошо различимы 4 интерференционные поло-

сы, соответствующие клиновидной толщине эпитаксиального слоя от 0 до 4 мкм после утоньшения при длине волны поглощения МФПУ 3,6÷5 мкм и полного удаления подложки. В правой части изображения сохраняются темные участки, соответствующие рекомбинации в основном на границе подложки и эпитаксиального слоя. Таким образом, мы имеем возможность наблюдать резкую границу раздела подложка/эпитаксиальный слой. Интересно, что некоторые рекомбинационные области распространяются на глубину роста эпитаксиального слоя до ~1 мкм. В то же время, большая часть рекомбинационных областей не наблюдается в выращенном эпитаксиальном слое, то есть происходит своеобразное «залечивание» дефектных областей, возникших на границе роста. Напротив, на изображении темновых токов (рис. 4б) не наблюдаются не только граница роста, но и отсутствует зависимость темнового тока от толщины эпитаксиального слоя, что свидетельствует о преобладании генерационно-рекомбинационного механизма возникновения темнового тока в области пространственного заряда непосредственно в  $p$ - $n$ -переходе над диффузионным механизмом генерации темнового тока в эпитаксиальной структуре [10].

### Выводы

Разработаны тестовые матричные структуры на основе InSb, предназначенные для гибридации с БИС считывания формата 1280×1024 и шагом 12 мкм с целью исследования зависимости от топологии МФЧЭ основных фотоэлектрических характеристик МФПУ в пределах одной крупноформатной матрицы.

Предложены варианты тестовых структур МФЧЭ и топологии сканирующих масок из кремния с универсальным шагом, превышающим диффузионную длину неосновных носителей заряда в InSb, предназначенных для измерения взаимосвязи.

Разработана структура комплекта фотошаблонов с распределением по площади матричных тестовых структур для реализации клиновидного утоньшения с целью получения сверхтонких структур с контролируемой толщиной по площади для повышения прочности и минимизации взаимосвязи. Проанализиро-

ваны возможности реализации предложенных тестовых структур.

Исследовано изменение характеристик распределения величины выходного сигнала в изображении при клиновидном утоньшении эпитаксиального образца, выращенного на высоколегированной подложке антимонида индия формата 640×512 с шагом 15 мкм:

- экспериментально показано «залечивание» дефектных областей (с повышенной рекомбинацией), возникших на границе роста;
- глубина проникновения дефектных областей в эпитаксиальный слой порядка 1 мкм.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gershon G., Albo A., Eylon M., Cohen O., Calahorra Z., Brumer M., Nitzani M., Avnon E., Aghion Y., Kogan I., Ilan E., Tuito A., Ben Ezra M., Shkedy L. Semiconductor Devices (SCD), Israel // «Large Format InSb Infrared Detector with 10  $\mu$ m Pixels», OPTRO-2014-2931891.
2. Болтарь К. О., Гришина А. Н., Лопухин А. А., Шишигин С. Е. / Успехи прикладной физики. 2022. Т. 10. № 1. С. 14–22.
3. Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Болтарь К. О., Гришина А. Н. / Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11. № 5. С. 421–432.
4. Лопухин А. А., Власов П. В., Гришина А. Н., Пермикина Е. В., Шишигин С. Е. Способ изготовления утоньшенного многоэлементного фотоприемника на основе антимонида индия с улучшенной однородностью и повышенной механической прочностью. Патент № RU 2811379 С1 (РФ). 2024.
5. Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Таубес Е. В., Шишигин С. Е., Мирофьянченко А. Е., Мирофьянченко Е. В. / Успехи прикладной физики. 2025. Т. 13. № 1. С. 21–29.
6. Лопухин А. А., Пермикина Е. В., Лаврентьев Н. А., Таубес Е. В., Шишигин С. Е., Мирофьянченко А. Е., Мирофьянченко Е. В. Способ измерения темнового тока на тестовых матричных структурах с изменяемой топологией для определения эффективности пассивации широкоформатных матричных фотоприемников с малым шагом. Патент № RU 2841177 С1 (РФ). 2025.
7. Болтарь К. О., Акимов В. М., Арбузов М. А., Лопухин А. А. / Прикладная физика. 2021. № 5. С. 44–52.
8. Болтарь К. О., Акимов В. М., Арбузов М. А., Лопухин А. А. Способ получения распределения чувствительности по площади пикселя матричного фотоприёмника. Патент № RU 2783220 С1 (РФ). 2022.
9. Давлетишин Р. В., Лазарев П. С., Никонов А. В., Корнеева М. Д. / Прикладная физика. 2016. № 4. С. 63–66.
10. Чижко В. Ф., Касаткин И. Л., Бурлаков И. Д., Лопухин А. А., Пономаренко В. П., Филачев А. М., Бородин Д. В., Осипов В. Ю., Карпов В. В., Крошин В. М. / Прикладная физика. 2007. № 2. С. 64–68.

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

## Testing array patterns for research dependence performance InSb FPA large-format from pixel topology

A. A. Lopukhin<sup>1,\*</sup>, E. V. Permikina<sup>1</sup>, K. V. Barysheva<sup>1</sup> and V. V. Lopatin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> RD&P Center ORION, JSC, Moscow, 111538 Russia

\* E-mail: alexmatr0@mail.ru

<sup>2</sup> Foundation for Advanced Research, Moscow, 121059 Russia

Received 3.09.2025, revised 15.09.2025; accepted 20.10.2025

*The topology of squares mesa and rounded mesa of testing array patterns with 10, 12, 15 and 20 μm pitch based on InSb intended for hybridization with 12 μm pitch 1280×1024 ROIC for research of basic photo-electric characteristics in single FPA large-format are developed. The structure of a complete set of photomasks with distribution over the area of testing array patterns for realization wedge-like thinning is presented in order to obtain ultra-thin structures with a controlled thickness over the area with to increase strength and minimize the crosstalk. Possibilities of realization of the offered testing array patterns are analysed.*

**Keywords:** Focal Plane Array (FPA); indium antimonide; crosstalk; the scanning mask; topology; testing array patterns.

### REFERENCES

1. Gershon G., Albo A., Eylon M., Cohen O., Calahorra Z., Brumer M., Nitzani M., Avnon E., Aghion Y., Kogan I., Ilan E., Tuito A., Ben Ezra M. and Shkedy L., Semiconductor Devices (SCD), Israel. «Large Format InSb Infrared Detector with 10 μm Pixels», OPTRO-2014-2931891.
2. 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].
3. Lopukhin A. A., Permikina E. V., Boltar K. O. and Grishina A. N., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **11** (5), 421–432 (2023) [in Russian].
4. Lopukhin A. A., Vlasov P. V., Grishina A. N., Permikina E. V. and Shishigin S. E. Method for manufacturing thinned multi-element photodetector based on indium antimonide with improved uniformity and increased mechanical strength. Patent № RU 2811379 C1 (RF). 2024.
5. Lopukhin A. A., Permikina E. V., Taubes E. V., Shishigin S. E., Mirofyanchenko A. E. and Mirofyanchenko E. V., Usp. Prikl. Fiz. (Advances in Applied Physics) **13** (1), 21–29 (2025) [in Russian].
6. Lopukhin A. A., Permikina E. V., Lavrentev N. A., Taubes E. V., Shishigin S. E., Mirofyanchenko A. E. and Mirofyanchenko E. V. Method of measuring dark current on test matrix structures with variable topology for determining passivation efficiency of large-format matrix photodetectors with small pitch. Patent № RU 2841177 C1 (RF). 2025.
7. Lopukhin A. A., Boltar K. O., Akimov V. M. and Arbuzov M. A., Applied Physics, № 5, 44–52 (2021) [in Russian].
8. Boltar K. O., Akimov V. M., Arbuzov M. A. and Lopukhin A. A. Method for obtaining the sensitivity distribution over the matrix photodetector pixel area. Patent № RU 2783220 C1 (RF). 2022.
9. Davletshin R. V., Lazarev P. S., Nikonov A. V. and Korneeva M. D., Applied Physics, № 4, 63–66 (2016) [in Russian].
10. Chishko V. F., Kasatkin I. L., Burlakov I. D., Lopukhin A. A., Ponomarenko V. P., Filachev A. M., Borodin D. V., Osipov Yu. V., Karpov V. V. and Kroshin A. M., Applied Physics, № 2, 64–68 (2007) [in Russian].

### Об авторах

**Лопухин Алексей Алексеевич**, к.т.н., начальник лаборатории, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). E-mail: alexmatr0@mail.ru SPIN-код: 7352-7713, AuthorID: 221931

**Пермикина Елена Вячеславовна**, ведущий инженер, АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9). SPIN-код: 4231-5554, AuthorID: 780646

**Барышева Ксения Владимировна**, инженер 1 категории. АО «НПО «Орион» (111538, Россия, Москва, ул. Косинская, 9).

**Лопатин Вадим Владимирович**, д.т.н., руководитель проекта, Фонд перспективных исследований (121059, Россия, Москва, Бережковская наб., 22, стр. 3). AuthorID: 370192