

УДК 621.382 : 535.321.62

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МОЗАИЧНЫХ ФОТОПРИЁМНИКОВ СВЕРХВЫСОКОЙ РАЗМЕРНОСТИ (КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ ОБЗОР)

© А. И. Козлов

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: aikozlov13@mail.ru*

Фундаментальные исследования основ создания мозаичных фотоприёмников (МФП) сверхвысокой размерности позволили оптимизировать прототип мозаичной технологии с уменьшением «слепых зон». При этом обеспечиваются минимальные области повреждения на краях кристаллов при разделении пластин с достижением минимальных зазоров между кристаллами смежных субмодулей до величины не более 2–3 мкм для разных определяющих материалов. Исследованы параметры инфракрасных МФП в зависимости от длины волны максимума спектральной характеристики fotocувствительности многослойных структур с квантовыми ямами, от шага fotocувствительных элементов и формата субмодулей. В ряде предложенных технологических вариантов прототипов слепые зоны МФП оптически перекрываются и обеспечивается предельная, 100 %-ная эффективность преобразования изображений. Мозаичная технология является одним из фундаментальных принципов достижения сверхвысокой размерности МФП с максимальной эффективностью преобразования изображений.

Ключевые слова: мозаичная технология, мозаичные фотоприёмники (МФП) сверхвысокой размерности, технологические «слепые зоны», максимальная эффективность преобразования изображений, многослойные структуры с квантовыми ямами (МСКЯ), параметры инфракрасных (ИК) МФП.

DOI: 10.15372/AUT20210514

Введение. Мозаичные фотоприёмники (МФП) сверхвысокой размерности создаются посредством технологии прецизионной микросборки субмодулей оптимального, приемлемого для изготовления формата [1–23]. Мозаичная технология является прорывным решением проблемы кардинального увеличения форматов фотоприёмников. Области применения МФП ограничиваются размерами «слепых зон». В 2010 г. достигнуто значение размера технологической слепой зоны ≥ 46 мкм [2]. С 2013 г. проводятся исследования и оптимизация прототипа технологии создания МФП с суммарным размером слепой зоны между краевыми fotocувствительными элементами (ФЧЭ) смежных кристаллов субмодулей около 30 мкм, включая области неровностей граней кристаллов и зазора между кристаллами около 20 мкм [9–15]. С 2014 г. одна из ведущих российских фирм предполагает довести размер области зазора до величины 10–20 мкм [4]. Фирмы-изготовители МФП стремятся к уменьшению размеров слепых зон [9–15, 18]. Понижение количества ФЧЭ в слепых зонах повышает эффективность преобразования изображений, увеличивает объём видеоданных для последующей обработки и улучшает качество визуализируемых изображений.

Целью работы является концептуальный обзор МФП сверхвысокой размерности и развитие фундаментальных основ мозаичной технологии с достижением минимальных размеров слепых зон между краевыми ФЧЭ смежных кристаллов субмодулей и соответственно максимальной эффективности преобразования изображений в МФП [14, 15, 19–23].

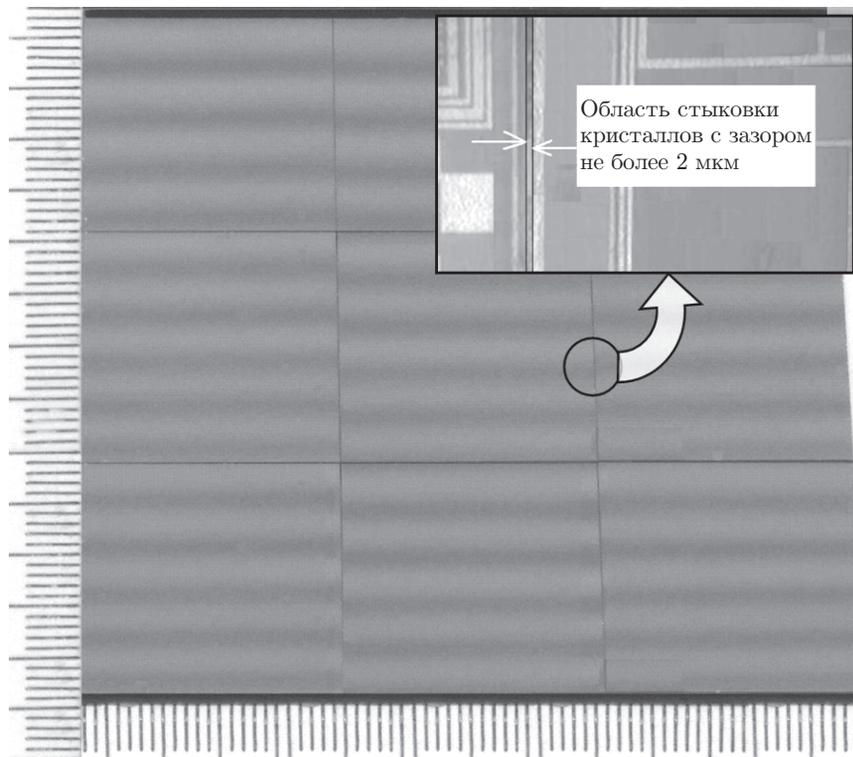


Рис. 1. Вид микросборки кристаллов субмодулей в МФП; в увеличенном фрагменте показана область стыковки кристаллов с зазором не более 2 мкм (для Si) [7, 9, 12]

Фундаментальные основы создания МФП сверхвысокой размерности. На базе фундаментальных исследований основ создания МФП сверхвысокой размерности разработана мозаичная технология и модернизирована с целью устранения слепых зон (рис. 1) [2–15]. Зазор между кристаллами смежных субмодулей МФП составляет не более 2–3 мкм. Прецизионное формирование стыкуемых граней кристаллов обеспечивает минимальные (5–8 мкм) области повреждения на краях кристаллов субмодулей, разные для различных определяющих полупроводниковых материалов [9–15, 17, 19–23]. Для кремниевого (Si) мультиплексора или матричного микроболометрического приёмника достижимые минимальные области повреждения на краях кристаллов субмодулей МФП составляют 5 мкм при зазоре между субмодулями не более 2 мкм; для МСКЯ-фотодетекторов на основе GaAs/AlGaAs минимальные области повреждения на краях субмодулей МФП составляют около 5 мкм при зазоре между субмодулями не более 2 мкм; для КРТ-фотодиодов можно обеспечить минимальные области повреждения на краях субмодулей 8 мкм при зазоре между кристаллами не более 3 мкм (табл. 1) [2, 3, 9–15, 17].

Развитие методологии лазерного разделения пластин в составе мозаичной технологии позволило уменьшить технологические слепые зоны МФП до 11–19 мкм для разных определяющих полупроводниковых материалов [2, 3, 9–15, 17]. При использовании прецизионного формирования стыкуемых граней кремниевых кристаллов с достижением минимальной (5 мкм) области повреждения расстояние между ФЧЭ смежных субмодулей составит 10–12 мкм, что соответствует потере одного элемента с шагом 10 мкм в каждой строке и столбце [9–15, 17, 19–23]. В случае других материалов расстояние между крайними ФЧЭ смежных субмодулей составит около 10–12 мкм для МСКЯ-фотодетекторов на основе GaAs/AlGaAs и порядка 17–20 мкм для КРТ-фотодиодов, что соответствует потере 1–2 элементов в каждой строке и столбце [9–15, 17, 19–23].

Таблица 1

Фундаментальные технологические характеристики МФП

№	Определяющий материал	Зазор ¹ , мкм	Размер ¹ области повреждения, мкм	Размер ¹ слепой зоны, мкм	Количество потерянных эл-т/шаг ФЧЭ, шт/мкм	Технологическая база
1	Si (мультиплексор)	10–20	~ 5	21–31	2–3/10	НПО «Орион»
		0–2		11–13	1/10	ИФП/КТИ ПМ
2	Si (ММБП ¹)	10–20	~ 5	21–31	2–3/10	—
		0–2		1–3 ²	0/10	ИФП/КТИ ПМ
3	GaAs/AlGaAs с подложкой	10–20	~ 5	21–31	2–3/10	—
		0–2		11–13	1/10	ИФП/КТИ ПМ
4	GaAs/AlGaAs с утонением подложки	10–20	~ 5	21–31	2–3/10	—
		0–2		11–13	1/10	ИФП/КТИ ПМ
5	HgCdTe на альтернативной подложке	10–20	~ 8 ³	27–37	3–4/10	НПО «Орион»
6	HgCdTe на GaAs-подложке	0–3		17–20	2/10	ИФП/КТИ ПМ
7	HgCdTe на Si-подложке	10–20	~ 8 ³	27–37	2–3/10	LETI (Fr)
		0–3		17–20	1/10	ИФП/КТИ ПМ

Примечания: ¹ — экспериментальные данные, подтверждающие теоретические значения; ² — значения соответствуют предельной (100 %-ной) эффективности преобразования изображений в мозаичных ИК матричных микроболометрических приёмниках (ММБП); ³ — справочные значения для фотоприёмных кристаллов на основе КРТ-фотодиодов [2, 3, 14–17].

Итак, МФП сверхвысокой размерности созданы с применением мозаичной технологии прецизионной микросборки фотоприёмных субмодулей оптимальных форматов [7, 9–10, 12]. В табл. 1 следует учитывать возможную шероховатость формируемых сторон менее 1 мкм и геометрическое сопоставление кристаллов субмодулей в МФП. Для фотоприёмных кристаллов на основе КРТ-фотодиодов приведены справочные значения.

Оптические методы обеспечения предельной эффективности преобразования изображений в МФП сверхвысокой размерности. Разработана и исследована оптическая методология обеспечения предельной эффективности преобразования изображений в МФП сверхвысокой размерности инфракрасного (ИК) и терагерцового (ТГц) спектральных диапазонов (рис. 2). Модернизированы технологические варианты исполнения МФП сверхвысокой размерности, которые оптически устраняют слепые зоны (см. рис. 2). Зазор между кристаллами смежных субмодулей МФП составляет ≤ 2 –3 мкм для разных определяющих полупроводниковых материалов (см. рис. 1). Таким образом, фундаментальные исследования создания МФП сверхвысокой размерности позволили оптимизировать прототип мозаичной технологии прецизионной микросборки кристаллов субмодулей и уменьшить технологические слепые зоны до 11–19 мкм для различных определяющих материалов [2, 3, 9–15, 17, 19–23].

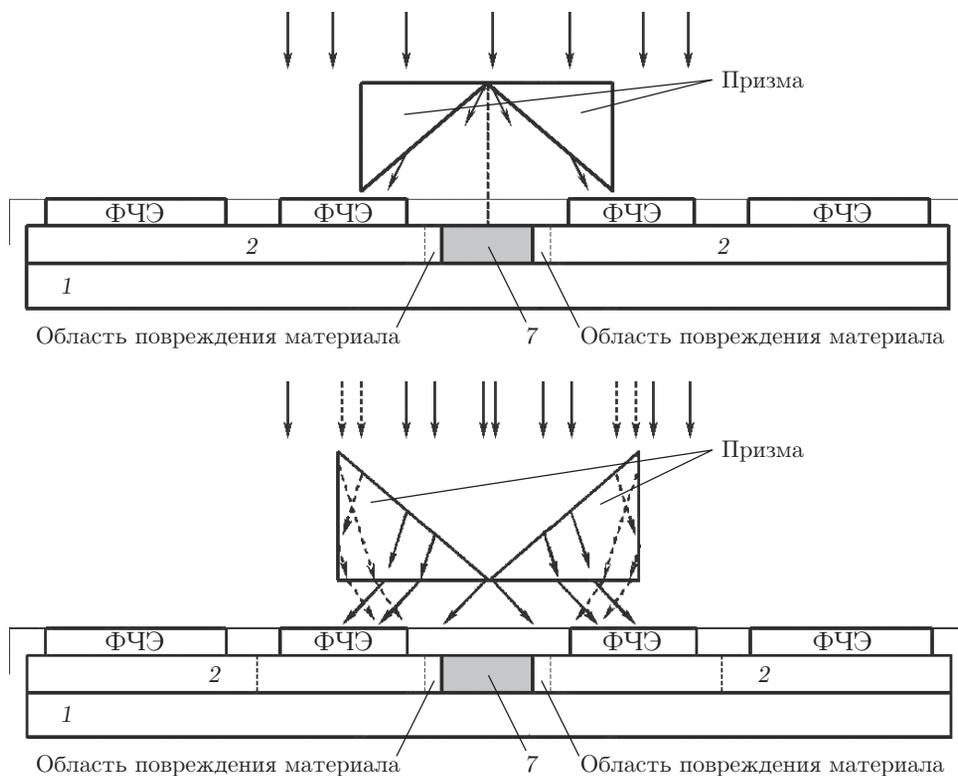


Рис. 2. Оптический метод достижения предельной эффективности преобразования изображений в МФП сверхвысокой размерности ИК и ТГц спектральных диапазонов [14]

Рассмотрим области повреждения материала и область 7 микростыковки кристаллов субмодулей, которые образуют технологическую слепую зону [14]. Задача состоит в её минимизации. Имеются многочисленные варианты решения задачи. Но смысл решения всегда один и тот же: довести эквивалентную площадь сбора фотонов уменьшенных краевых фоточувствительных элементов смежных кристаллов до размера площади сбора ФЧЭ внутри фотоприёмной матрицы субмодулей МФП.

На рис. 2 стрелками показано, как за счёт размещения над технологическими слепыми зонами призм соответствующих диапазонов, размеров и формы происходит перераспределение оптического потока от середины нечувствительной области 7 микростыковки кристаллов субмодулей до противоположного края ФЧЭ внутри фотоприёмной матрицы субмодуля. Весь оптический поток, падающий в данном случае на левую призму с площади сбора фотонов, эквивалентной площади сбора ФЧЭ внутри фотоприёмной матрицы субмодулей МФП, полностью поступает на левый, хотя и уменьшенный, ФЧЭ за счёт перераспределения оптического потока от нечувствительной левой половины технологической слепой зоны вплоть до середины области 7. Аналогично с другой стороны оптический поток, падающий на правую призму, полностью поступает на правый уменьшенный ФЧЭ за счёт перераспределения оптического потока от нечувствительной правой половины технологической слепой зоны (до середины области 7).

Таким образом, площадь сбора фотонов уменьшенных краевых ФЧЭ смежных кристаллов эквивалентна площади сбора ФЧЭ внутри фотоприёмной матрицы субмодулей МФП. В результате площадь сбора фотонов всех ФЧЭ одинакова и есть возможность оптически сохранить один и тот же шаг ФЧЭ по всей объединённой фотоприёмной матрице субмодулей МФП.

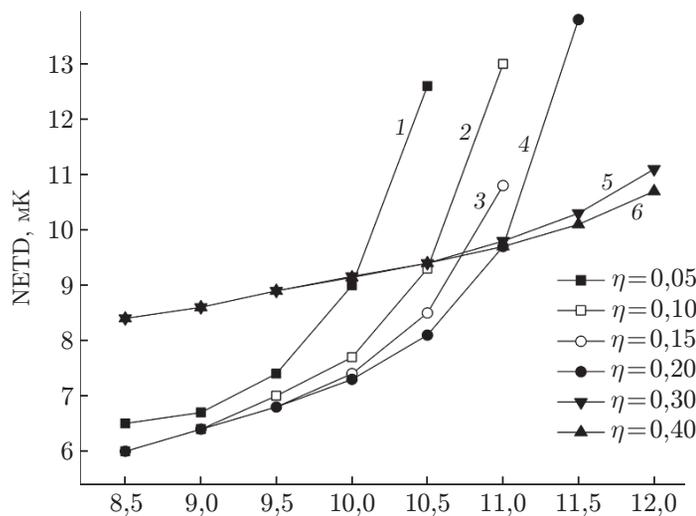
Применение в технологических прототипах МФП вариантов исполнения, при которых слепые зоны оптически перекрыты смежными ФЧЭ, может обеспечить расстояние между ФЧЭ смежных кристаллов субмодулей $\sim 1-3$ мкм и отсутствие потерь элементов в каждой строке и столбце, т. е. считывание фотосигналов будет происходить без потерь видеоинформации в каждом кадре изображения, что соответствует экспериментальному достижению предельной (100 %-ной) эффективности преобразования видеоданных в создаваемых МФП [9–15, 17, 19–23].

Применение эквивалентной шуму разности температур для анализа конгруэнтности МФП сверхвысокой размерности на основе МСКЯ. Аналитические значения эквивалентной шуму разности температур (NETD) инфракрасного фотоприёмника (ИК ФП) оцениваются как отношение напряжения шума системы, включающей ИК ФЧЭ и канал считывания мультиплексора, к температурной чувствительности ИК ФЧЭ при квантовой эффективности η :

$$\text{NETD} = U_n / \left(\frac{\partial U_{sig}}{\partial Q} \frac{\partial Q}{\partial T} \right) \approx \frac{U_n \Delta T}{\Delta U_{sig}},$$

где U_n — напряжение шума анализируемой системы, $\partial U_{sig}/\partial Q$ — вольтовая чувствительность ФЧЭ, Q — входной поток фотонов, $\partial Q/\partial T$ — температурный градиент, ΔT — разность температур на входе оптической системы, ΔU_{sig} — разность сигнального напряжения для данной разности ΔT [5–8, 16, 19–23].

Полученные аналитические значения NETD для МСКЯ на GaAs/AlGaAs (кривые 1–4) и сверхрешёток на InAs/GaInSb (кривые 5, 6) иллюстрируют рис. 3, 4 [5–8, 16, 19–23]. В диапазоне длин волн максимума спектральной чувствительности $\lambda_{max} \approx 8,5-9,5$ мкм МСКЯ ФП предоставляет хорошее (6–7 мК) температурное разрешение практически независимо от квантовой эффективности η , поскольку NETD определяется шумом фонового излучения [8]. При $\eta = 0,1-0,2$ в диапазоне $\lambda_{max} < 10-11$ мкм NETD ФП на основе МСКЯ меньше, чем NETD ФП на основе сверхрешёток. При дальнейшем увеличении λ_{max} наблюдается рост NETD с существенным преимуществом для больших значений η фотодетекторов (см. рис. 3) [5–8, 16, 19–23].



Длина волны максимума спектральной фоточувствительности МСКЯ, мкм

Рис. 3. Зависимости NETD ИК ФП от длины волны максимума спектральной характеристики фоточувствительности МСКЯ (λ_{max})

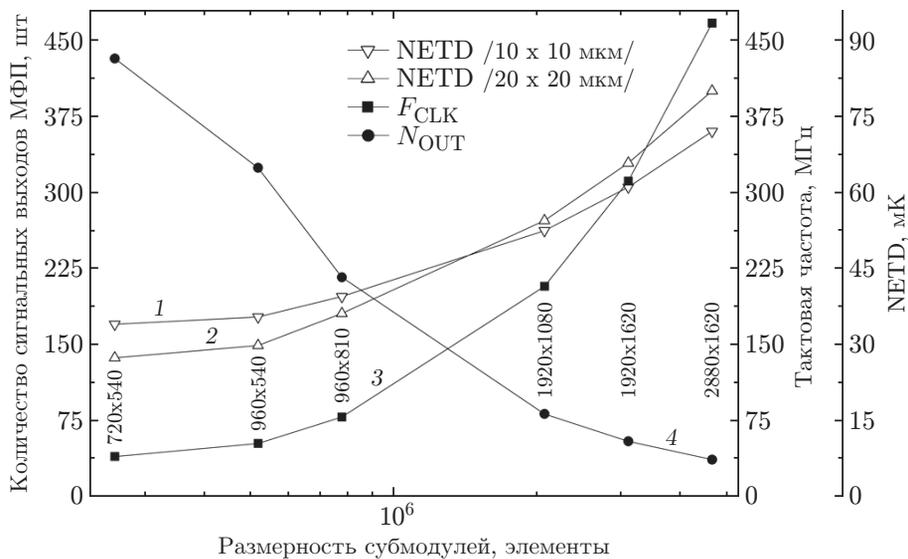


Рис. 4. Зависимости NETD, тактовой частоты и количества сигнальных выходов МФП от формата субмодулей и шага ФЧЭ

Итак, исследованы зависимости основных характеристик ИК МФП сверхвысокой размерности от длины волны максимума спектральной характеристики фоточувствительности МСКЯ (λ_{\max}), шага ФЧЭ и формата субмодулей [5–8, 13, 16, 19–23]. Мозаичные фотоприёмники сверхвысокой размерности создаются на базе прорывной мозаичной технологии прецизионной микросборки фотоприёмных кристаллов субмодулей меньших форматов, которые оптимальны для изготовления (см. рис. 1) [7, 9, 10, 12].

Заключение. Мозаичные фотоприёмники сверхвысокой размерности обладают огромной, расширяющейся индустриальной сферой применения в передовых ИТ-производствах и перспективных научных исследованиях [9–15, 19–23]. Мозаичный принцип — один из фундаментальных, прорывных технологических подходов для достижения сверхвысокой размерности ИК ФП, в частности на основе МСКЯ [2, 3, 11–14, 16, 17, 19–23]. Научный обзор подготовлен на основе цикла докладов, представляющих фундаментальные основы создания МФП сверхвысокой размерности, оптические методы обеспечения предельной эффективности преобразования изображений в МФП, применение NETD для анализа конгруэнтности МФП сверхвысокой размерности на основе МСКЯ [24–26].

Благодарности. Автор выражает благодарность академику РАН А. В. Латышеву за поддержку исследований; академику РАН А. Л. Асееву за обсуждение результатов исследований; д. ф.-м. н. В. Н. Овсянку за многочисленные обсуждения фундаментальных основ создания ФП; д. ф.-м. н. М. В. Якушеву и к. ф.-м. н. В. В. Васильеву за обсуждения данных по КРТ-фотодиодам; к. ф.-м. н. М. А. Демьяненко за обсуждение микроболометров и МСКЯ-фотодетекторов; к. т. н. А. Р. Новоселову за поддержку в исследовании создания МФП; В. Н. Гаштольд, Н. В. Сушевой за помощь при изготовлении прототипов субмодулей на технологической базе АО «НПО «Восток»»; П. Р. Машевичу и А. А. Романову за помощь при создании концепт-прототипов кристаллов на технологической базе АО «Ангстрем»; к. ф.-м. н. А. Г. Харламову за рассмотрение расширенной области применения МФП и полезное обсуждение фундаментальных подходов в исследовании мозаичной технологии создания МФП высокой и сверхвысокой размерности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aad G., Abbott D., Abdallah J. and ATLAS Collaboration. Search for heavy ZZ resonances in the $l^+l^-l^+l^-$ and $l^+l^-\nu\bar{\nu}$ final states using proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV with the ATLAS detector // Eur. Phys. Journ. C. 2018. **78**. P. 293–326.
2. Новоселов А. Р. Разработка высокоэффективных мозаичных фотоприёмников на основе линеек фоточувствительных элементов // Автометрия. 2010. **46**, № 6. С. 106–115.
3. Пат. 2509391 С1 РФ. Способ формирования граней чипа для мозаичных фотоприёмных модулей /А. Р. Новоселов. Опубл. 10.03.2014; Бюл. № 7.
4. Пат. 2564813 С1 РФ. Многокристальное многоцветное фотоприёмное устройство с расширенной спектральной характеристикой квантовой эффективности /Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, А. В. Никонов. Опубл. 10.10.2015; Бюл. № 28.
5. Козлов А. И., Демьяненко М. А., Овсяк В. Н. Аналитическое сравнение характеристик фотоприёмников ИК диапазона на основе фотодиодов HgCdTe и фотодетекторов GaAs/AlGaAs с квантовыми ямами // Оптический журнал. 2016. **83**, № 9. С. 64–71.
6. Козлов А. И. Особенности проектирования и некоторые реализации кремниевых мультиплексоров для ИК фотоприёмников // Оптический журнал. 2010. **77**, № 7. С. 19–29.
7. Козлов А. И., Демьяненко М. А., Овсяк В. Н. Оптимизация параметров системы “инфракрасный фоточувствительный элемент на основе многослойных структур с квантовыми ямами — кремниевый мультиплексор фотосигналов” // Оптический журнал. 2017. **84**, № 9. С. 59–65.
8. Козлов А. И. Концептуальная конгруэнтность фотоприёмников на основе сверхрешёток и многослойных структур с квантовыми ямами // Тез. докладов XIV Росс. конф. по физике полупроводников «ПОЛУПРОВОДНИКИ-2019». Новосибирск, 9–13 сент., 2019. Т. 2. С. 445.
9. Козлов А. И., Новоселов А. Р., Демьяненко М. А., Овсяк В. Н. Фундаментальные основы создания мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности с предельной эффективностью преобразования изображений // Тез. докладов XIV Росс. конф. по физике полупроводников «ПОЛУПРОВОДНИКИ-2019». Новосибирск, 9–13 сент., 2019. Т. 2. С. 447.
10. Козлов А. И., Демьяненко М. А., Новоселов А. Р., Овсяк В. Н. Повышение эффективности преобразования изображений в мозаичных микроболометрических приёмниках // Оптический журнал. 2018. **85**, № 2. С. 60–66.
11. Козлов А. И., Новоселов А. Р. Технологические подходы к созданию мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности с предельной эффективностью преобразования изображений // Тез. докл. Росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2019». Новосибирск, 27–31 мая, 2019. С. 152.
12. Козлов А. И., Новоселов А. Р., Овсяк В. Н. Дизайнерские принципы устранения потерь изображений в мозаичных фотоприёмниках сверхвысокой размерности // Тез. докладов росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2019». Новосибирск, 27–31 мая, 2019. С. 171.
13. Козлов А. И., Демьяненко М. А., Новоселов А. Р., Овсяк В. Н. Применение эквивалентной шуму разности температур для сравнения фотоприёмников сверхвысокой размерности на основе многослойных структур с квантовыми ямами // Оптический журнал. 2020. **87**, № 1. С. 37–44.
14. Пат. 2731460 С1 РФ. Мозаичный фотоприёмник с предельной эффективностью преобразования изображений: конструкции и способы его изготовления (варианты) /А. И. Козлов, М. А. Демьяненко, В. Н. Овсяк и др. Опубл. 03.09.2020; Бюл. № 25.

15. **Козлов А. И., Клименко А. Г., Демьяненко М. А. и др.** Преобразование изображений в мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмниках инфракрасного и терагерцового диапазонов форматом до 3072×576 и более // Оптический журнал. 2014. **81**, № 3. С. 35–43.
16. **Козлов А. И., Васильев В. В., Якушев М. В. и др.** Анализ структурно-технологических ограничений в схемах считывания сигналов фотодиодов инфракрасного диапазона // Оптический журнал. 2014. **81**, № 7. С. 39–45.
17. **Новоселов А. Р.** Способ уменьшения зазора между чипами в мозаичных фотоприёмных модулях // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 116–121. DOI: 10.15372/AUT20160114.
18. **Rogalski A.** Progress in focal plane array technologies // Progress in Quant. Electron. 2012. **36**, Iss. 2–3. P. 342–473.
19. **Козлов А. И.** Фундаментальные основы создания мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности. Аналитический обзор: Исследование максимальной эффективности преобразования изображений в мозаичных фотоприёмниках сверхвысокой размерности. Изд. 3-е, перераб. Рига: Lambert Academic Publishing, 2021. 82 с.
20. **Козлов А. И.** Фундаментальные основы создания мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности с максимальной эффективностью преобразования изображений. Аналитический обзор: Исследование предельной нано- и микроминиатюризации мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности. Изд. 4-е, перераб. Новосибирск: Издатель А. И. Козлов, 2021. 76 с.
21. **Козлов А. И.** Мозаичный подход и характеристики приёмников сверхвысокой размерности. Концептуальный анализ характеристик фотоприёмников на основе микроболометров и многослойных структур с квантовыми ямами. Сб. ст. Кн. 3. Изд. 3-е, перераб. Рига: Lambert Academic Publishing, 2021. 202 с.
22. **Козлов А. И.** Анализ конгруэнтности фотоприёмников сверхвысокой размерности с максимальной эффективностью преобразования изображений на основе многослойных структур с квантовыми ямами. Аналитический обзор: Создание мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности с предельной эффективностью преобразования изображений. Новосибирск: Издатель А. И. Козлов, 2020. 86 с.
23. **Козлов А. И.** Исследование создания мозаичных фотоприёмников инфракрасного и терагерцового диапазонов. Обзор: Создание мозаичных фотоприёмников с предельной эффективностью преобразования изображений сверхвысокой размерности. Изд. 5-е, перераб. Рига: Lambert Academic Publishing, 2021. 170 с.
24. **Козлов А. И., Новоселов А. Р.** Фундаментальные основы технологии мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности // Тез. докл. Росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2021». Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. С. 149.
25. **Козлов А. И.** Применение эквивалентной шуму разности температур для конгруэнтности мозаичных фотоприёмников сверхвысокой размерности на основе многослойных структур с квантовыми ямами // Тез. докл. Росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2021». Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. С. 150.
26. **Козлов А. И.** Оптические методы обеспечения предельной эффективности преобразования изображений в мозаичных фотоприёмниках сверхвысокой размерности // Тез. докл. Росс. конф. по актуальным проблемам полупроводниковой фотоэлектроники «ФОТОНИКА-2021». Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2021. С. 148.

Поступила в редакцию 04.08.2021

После доработки 03.09.2021

Принята к публикации 03.09.2021