

НАНОТЕХНОЛОГИИ В ОПТИКЕ И ЭЛЕКТРОНИКЕ

УДК 621.382 : 535.231.62

О МОЗАИЧНЫХ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ
МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЁМНИКАХ
ИНФРАКРАСНОГО И ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНОВМ. А. Демьяненко¹, А. И. Козлов¹, А. Р. Новоселов², В. Н. Овсяк¹¹Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13²Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,
630090, г. Новосибирск, ул. Николаева, 8
E-mail: kozlov@isp.nsc.ru

Синтезирована конструкция матричных мозаичных фотоприёмников (МФП) и предложен ряд схем блоков адресации, уменьшающих «слепую зону». Разработана прецизионная технология изготовления мозаичных фотоприёмников с суммарным размером слепой зоны не более 30 мкм. Рассмотрены некоторые системные вопросы применения мозаичных фотоприёмников. Полученные результаты при создании неохлаждаемых микроболометрических МФП форматом 3072×576 на основе субмодулей 384×288 с шагом фоточувствительных элементов 17–51 мкм в ИК-диапазоне обеспечивают эффективность преобразования изображений $\sim 99\%$, а при шаге фоточувствительных элементов 100 мкм в терагерцовом диапазоне — 100 %.

Ключевые слова: мозаичный фотоприёмник, неохлаждаемый микроболометр, кремниевый мультиплексор, схема считывания фотосигналов, инфракрасный и терагерцовый диапазоны.

DOI: 10.15372/AUT20160214

Введение. Одной из современных тенденций развития матричных приёмников излучения является наращивание формата для улучшения пространственного разрешения и увеличения дальности действия тепловизионных систем [1–3].

Значительное увеличение количества фоточувствительных элементов (ФЧЭ) больших размеров в однокристалльных матричных микроболометрических приёмниках (ММБП) излучения дальнего инфракрасного и терагерцового диапазонов приводит к существенному росту линейных размеров и активной площади кристаллов кремниевых мультиплексоров (КМ), на основе которых создаются ММБП, и ограничивается неприемлемым уменьшением процента выхода годных кристаллов в процессе производства КМ и ММБП [2, 4–7].

Перспективным техническим решением задачи кардинального увеличения формата неохлаждаемых ММБП является мозаичный принцип построения, при котором несколько кристаллов субмодулей ММБП меньшего формата устанавливаются встык на общем основании (рис. 1), образуя мозаичный фотоприёмник (МФП) [2, 5–7]. При этом известные конструктивно-технологические решения для линейчатых МФП невозможно реализовать в мозаичных ММБП из-за отсутствия места для смещения ФЧЭ [4].

Основная проблема МФП — наличие «слепых зон», обусловленных отсутствием ФЧЭ вдоль линии стыковки фотоприёмных матриц соседних субмодулей (см. рис. 1). Слепые зоны могут состоять из двух частей: технологической и конструктивно-топологической. Ширина этой зоны между краевыми ФЧЭ соседних кристаллов в составе панорамных МФП вдоль вертикальной линии стыковки кристаллов определяется размерами как техно-

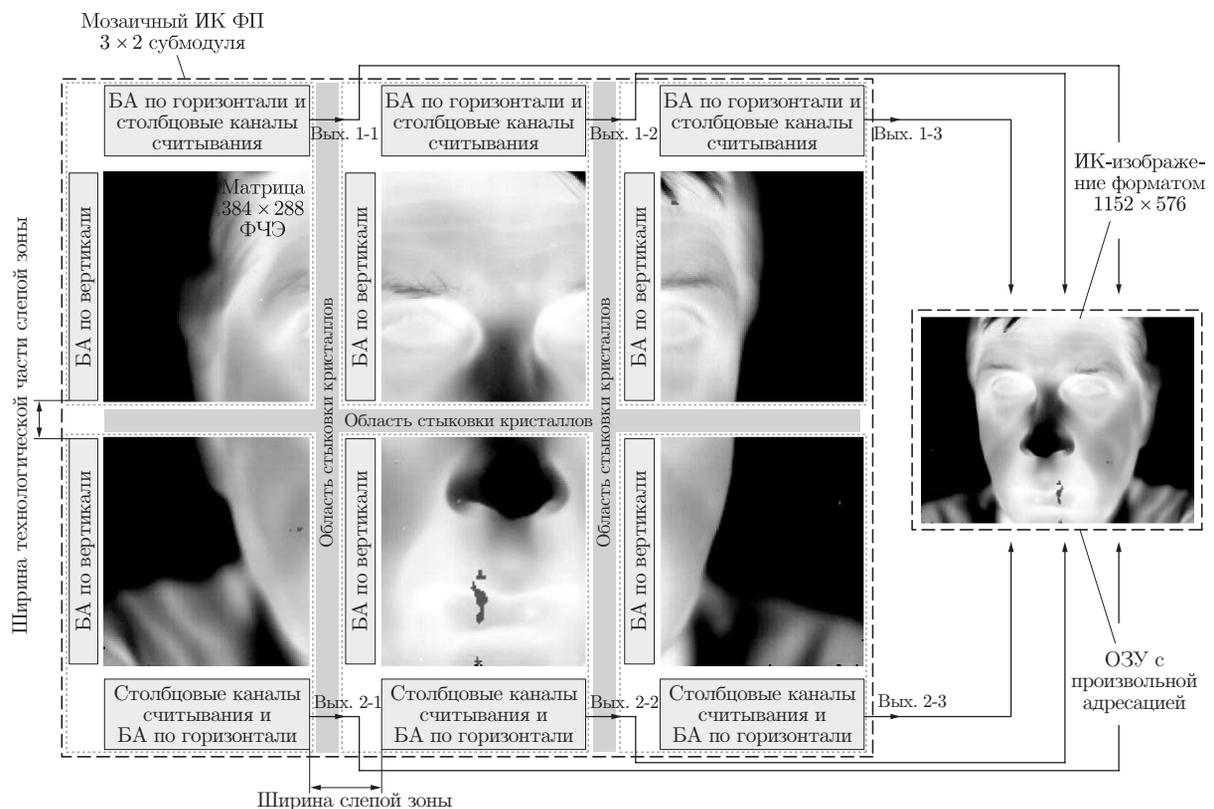


Рис. 1. Мозаичный $n \times 2$ ММБП (где n — количество субмодулей по горизонтали) — вариант расположения ИК-изображения на матрицах ФЧЭ субмодулей — и электронная сборка результирующего теплового изображения в ОЗУ (справа)

логической части, так и конструктивно-топологической области размещения на кристалле блока адресации (БА) субмодуля ММБП. При этом ширина технологической части вдоль горизонтальной линии стыковки зависит только от возможностей блока технологических операций разделения пластин на рабочие кристаллы, основанного на прецизионном лазерном скрайбировании, и близкой стыковки кристаллов субмодулей.

Цель данной работы — исследование конструктивно-технологических принципов построения и развитие схем считывания фотосигналов мозаичных фотоприёмников, обеспечивающих минимизацию слепых зон, а также рассмотрение ряда системных вопросов, возникающих при создании и применении МФП.

Слепая зона МФП. Технологическая часть слепой зоны определяется суммарной шириной области повреждения полупроводникового материала, возникающей в процессе разделения пластин на рабочие кристаллы, области неровности краёв стыкуемых кристаллов и зазора между ними. При скрайбировании пластин лазерным излучением формируется канавка. Вокруг канавки образуется область повреждения полупроводникового материала с изменёнными свойствами, которую нельзя использовать. Уменьшение размеров технологической части слепой зоны возможно путём сужения области повреждения полупроводникового материала и обеспечения стыковки кристаллов с минимальным зазором [5–8].

Конструктивно-топологические части слепой зоны образуются при размещении на кристаллах субмодулей ММБП блоков адресации по вертикальной координате (см. рис. 1). В этом случае предельное уменьшение размеров слепых зон достигается минимизацией топологических областей размещения БА по ширине, что определяет необходимость разработки новых схем блоков адресации субмодулей МФП.

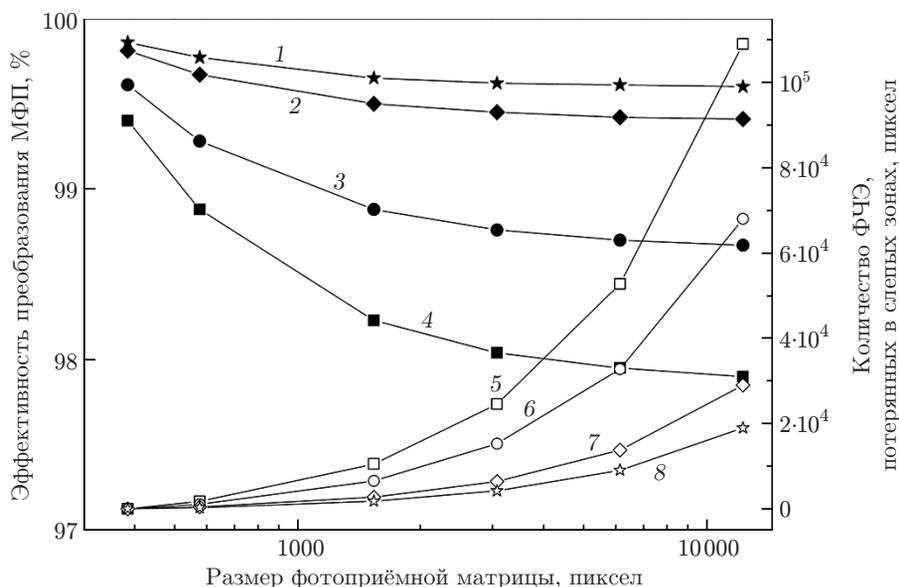


Рис. 2. Зависимости эффективности преобразования изображений в МФП (кривые 1–4) и количества ФЧЭ (кривые 5–8), потерянных в слепых зонах, от формата матрицы при разных значениях шага ФЧЭ (кривые 4, 5 — 10; 3, 6 — 17; 2, 7 — 51; 1, 8 — 102 мкм)

Эффективность преобразования изображений* в МФП в зависимости от размера объединённой матрицы и шага ФЧЭ показана на рис. 2 (кривые 1–4). Количество фоточувствительных элементов, потерянных в слепых зонах, растёт линейно при увеличении формата фотоприёмной матрицы и уменьшается при увеличении размеров ФЧЭ (кривые 5–8).

Развитие схем считывания сигналов МФП. Достижение наибольшей эффективности преобразования изображений в МФП возможно путём развития схем считывания сигналов субмодулей. При этом необходимо синтезировать конструкцию кристаллов КМ, которая обеспечивает минимальный топологический размер ячейки вертикальных БА перпендикулярно направлению сдвига информации при заданном размере ячейки вдоль направления сдвига, возможность близкой стыковки кристаллов субмодулей с трёх сторон и размещение контактных площадок на одной стороне кристаллов, что требуется для гибридной сборки произвольного количества субмодулей КМ по горизонтали (см. рис. 1).

На основе анализа принципов организации схем считывания фотосигналов многоэлементных ИК ФП разработана конструкция КМ, допускающая близкую стыковку кристаллов субмодулей произвольного формата в мозаичные ММБП (см. рис. 1) [9]. В качестве БА при создании КМ можно использовать классический сдвиговый регистр, представленный на рис. 3, а [10].

Указанный однонаправленный сдвиговый регистр содержит два инвертора и два передаточных вентиля, т. е. восемь МОП-транзисторов (МОПТ). Топологическое исполнение данного регистра в основном обеспечивает требования технологии близкой стыковки кристаллов по геометрическим размерам. Однако в таком регистре нельзя осуществить реверсивность сдвига содержащейся в нём информации, что необходимо для полной функциональности и единого принципа сканирования матричного МФП.

Модернизация схемы однонаправленного сдвигового регистра посредством введения двух дополнительных передаточных вентилях позволяет изменять направление сдвига

*Эффективность преобразования изображений — это отношение количества работающих ФЧЭ в МФП к сумме ФЧЭ, потерянных в слепых зонах и работающих в МФП.

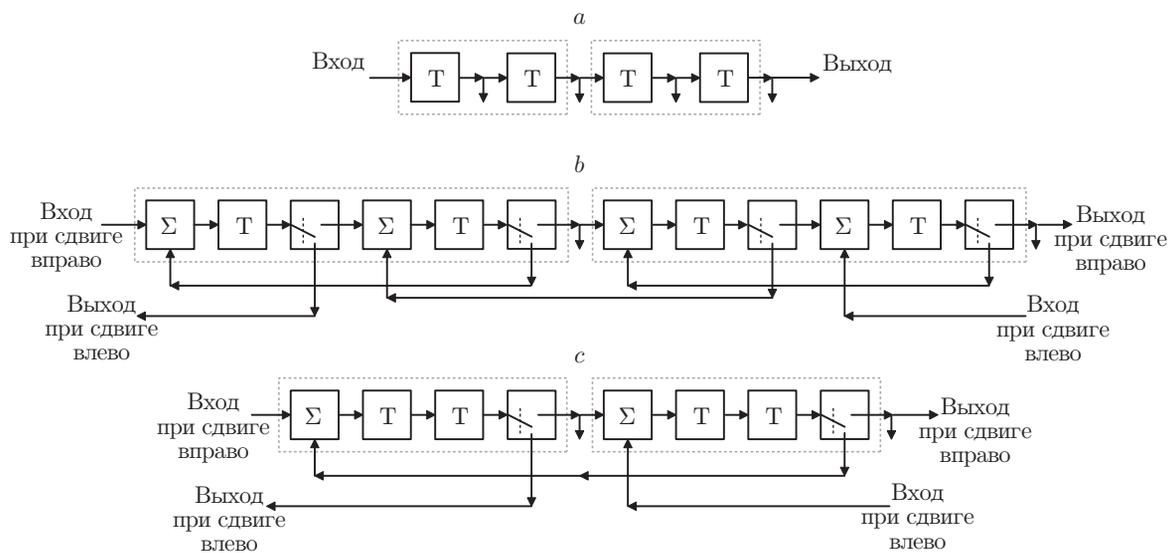


Рис. 3. Функциональные схемы ячеек БА, обеспечивающие минимизацию слепой зоны МФП [11–13]

информации внутри регистра при той же возможности минимизации размера ячейки БА (рис. 3, *b*) [11]. В связи с особенностями применения разных схем БА в ИК ФП такую схему можно упростить, как показано на рис. 3, *c*. Аналогично [11–13] могут быть модернизированы и другие варианты принципиальных схем сдвиговых регистров, перспективных для использования в качестве блоков адресации submodule МФП.

Вариант схемы реверсивного сдвигового регистра, в которой инвертированный управляющий сигнал формируется внутри каждой ячейки, обеспечивает не только возможность минимизации размера ячейки перпендикулярно направлению сдвига информации при заданном большом топологическом размере ячейки регистра вдоль направления сдвига информации, но и стабильную работу в условиях существенных паразитных ёмкостей строчных адресных шин, например, в приёмниках терагерцового излучения с размерами ФЧЭ порядка сотен микрометров [11–13].

Предложенная в [11] принципиальная схема может быть использована при создании более сложных блоков адресации на основе двух сдвиговых регистров с тем же набором функций по преобразованию изображений, что и в распространённых БА на базе схемы дешифратора. Несложно получить зависимости количества МОПТ (кривые 1, 4, 7, 8) и шин управления (кривые 2, 3, 5, 6) в ячейках БА, выполненных по схемам дешифратора, предложенного реверсивного (кривая 9) и классического (кривая 10) регистров, от формата матрицы МФП (рис. 4, *a*). Для БА, выполненных с применением схем дешифраторов, можно определить ещё и зависимости количества шин управления (кривые 1–4) и МОПТ (кривые 5–8) в ячейке от количества дешифраторов в БА (рис. 4, *b*). Блок адресации на основе дешифраторов требует применения дополнительных усилительных каскадов на каждом адресном выходе, что увеличивает количество МОПТ. Блоки адресации на основе регистров имеют минимальное количество управляющих шин в ячейке по сравнению со схемами дешифраторов: от четырёх до шести для классического и реверсивного регистров и две–три для случая формирования инверсных управляющих сигналов непосредственно в каждой ячейке БА. Классический сдвиговый регистр обладает преимуществом по количеству МОПТ при приемлемом количестве управляющих шин в схеме ячейки в сравнении с дешифратором, начиная с формата матрицы 256–512 элементов разложения, а реверсивный сдвиговый регистр — с формата 512–1024 элемента.

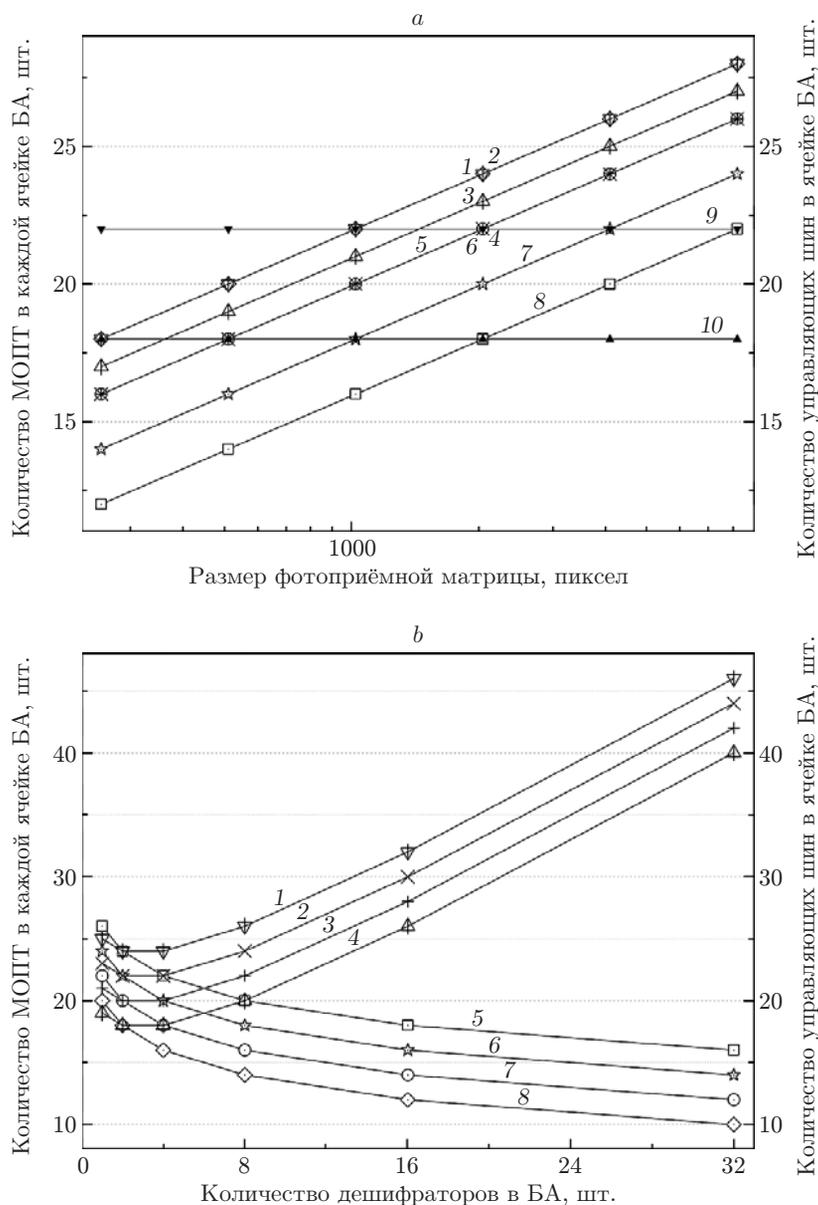


Рис. 4. Зависимости количества МОПТ и управляющих шин в ячейке БА: *a* — от формата фотоприёмной матрицы (кривые 1 и 3, 4 и 5, 7 и 6, 8 и 2 при одном, двух, четырёх и восьми дешифраторах соответственно); *b* — от количества дешифраторов в БА (кривые 8 и 4, 7 и 3, 6 и 2, 5 и 1 при размерах 512, 1024, 2048, 4096 соответственно)

В результате разработан широкий спектр схем для построения БА с набором разных функций по преобразованию получаемых ИК-изображений, например вырезание фрагментов изображений (окон, полос) с произвольными координатами, размерами и возможностью инверсного порядка считывания фрагментов и изображений в целом [11–13].

Топология ячейки модернизированного БА с реверсивной адресацией по вертикали при проектировании мультиплексоров по технологии 0,5 мкм КМОП 1Р 3М (КМОП-технология с проектными нормами 0,5 мкм, одним уровнем поликремниевых затворов и тремя уровнями металлической разводки) может занимать площадь кремниевого кристалла порядка 20 × 100 мкм для ММБП терагерцового диапазона с шагом ФЧЭ 100 мкм и приблизительно 26 × 51 мкм для ИК ММБП с шагом ФЧЭ 51 мкм [5–7].

Синтезированная конструкция субмодуля КМ, в которой для выполнения операции адресации по вертикали использована схема предложенного в [11] реверсивного сдвигового регистра, обеспечивает, во-первых, минимальную ширину слепой зоны при близкой стыковке кремниевых кристаллов в составе МФП; во-вторых, возможность близкой стыковки кристаллов субмодулей с трёх сторон и расположение внешних контактных площадок на одной стороне кристалла субмодуля; в-третьих, единый принцип сканирования мозаичного ММБП. При этом для ИК-микроболометров потеря ФЧЭ с шагом 51×51 мкм вдоль вертикальной линии стыковки не превысит одного–двух элементов, а для микроболометров терагерцового диапазона с шагом 100×100 мкм за счёт уменьшения площади краевых элементов (с коррекцией их чувствительности) можно обеспечить близкую стыковку без потери ФЧЭ.

Экспериментальные результаты. В рамках поисковой исследовательской работы создан базовый блок технологических операций лазерного скрайбирования в составе прецизионной технологии близкой стыковки кремниевых кристаллов в МФП с суммарным размером области повреждения полупроводникового материала лазерным излучением и области неровности края, так называемой технологической части слепой зоны, не более 30 мкм (рис. 5) [5–8]. На рисунке показаны кристаллы ИК ММБП и ММБП терагерцового диапазона, близко состыкованные по разработанной технологии. Канавка на приборной пластине формировалась за 50 проходов лазера, пластина после скрайбирования разделялась на кристаллы, затем края двух рабочих кристаллов совмещались (рис. 5, *a*) [6]; рис. 5, *b* получен путём моделирования.

Экспериментальное исследование зависимостей обратного тока кремниевых диодов от расстояния между границей p – n -переходов и краем канавки при изготовлении пластин по технологиям LOCOS и МОП со стоп-диффузией показало, что при многопроходном режиме скрайбирования лазерным излучением с длиной волны 0,334 мкм, частотой повторения импульсов 100 Гц и длительностью импульса 7 нс ширина области повреждения полупроводникового материала не превышает 5–6 мкм [6]. Для дальнейшего уменьшения ширины технологической части слепой зоны мозаичных ММБП необходимо при лазерном скрайбировании формировать несимметричную V-образную канавку, одна сторона которой перпендикулярна поверхности кристалла [6, 14].

Использование результатов развития схем считывания фотосигналов и разработанной технологии прецизионной стыковки кристаллов обеспечивает возможность создания мозаичных ММБП панорамных форматов с высокой эффективностью преобразования входных инфракрасных и терагерцовых изображений. Например, при создании неохлаждаемых микроболометрических ИК МФП форматом 3072×576 на основе субмодулей 384×288 с ша-

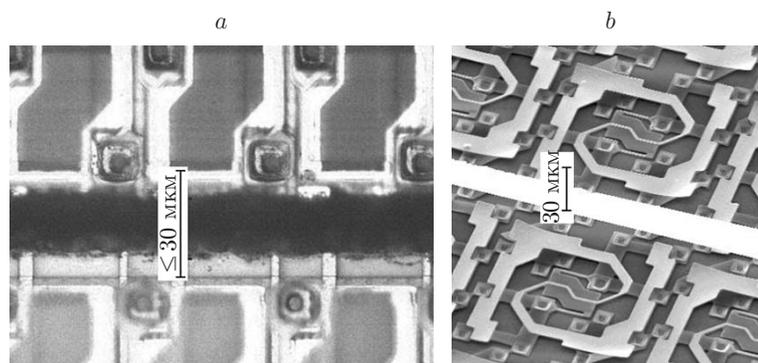


Рис. 5. Фотографии кристаллов ММБП с указанной суммарной шириной слепой зоны между краевыми ФЧЭ соседних кристаллов (включая область зазора): *a* — приёмник ИК-диапазона, *b* — приёмник терагерцового диапазона

гом ФЧЭ от 17 до 51 мкм эффективность преобразования изображений может составлять ~99 %, в терагерцовом диапазоне эффективность МФП с размером ячейки 100×100 мкм может достигать 100 % [5].

Применение МФП и системные вопросы. При создании и использовании МФП возникают системные вопросы стабилизации температуры МФП или многоканального считывания фотосигналов субмодулей мозаичного ММБП с необходимостью последующей электронной сборки объединённого теплового изображения.

Одним из вариантов решения поставленных вопросов могут быть применение известной методологии ТЕС-less [15], не требующей стабилизации температуры ММБП, и электронная сборка считываемых терагерцовых или ИК-изображений в интегральной схеме ОЗУ с произвольной адресацией. Субмодули МФП работают параллельно, обеспечивая тем самым высокую скорость (частоту) считывания широкоформатных кадров объединённого изображения при невысокой стандартной для ФЧЭ тактовой частоте. При этом возможна системная оптимизация функций по преобразованию получаемых в МФП изображений. Так, в случае применения ОЗУ с произвольной адресацией реализация функций по инверсии порядка считывания элементов изображения или его фрагментов производится более оптимальным способом в процессе передачи, записи и считывания информации (см. рис. 1).

Мозаичный подход обеспечивает возможность создания комбинированных или совмещённых фотоприёмников, если в составе объединённой матрицы панорамного формата одновременно находятся субмодули, разработанные с применением различных ФЧЭ, например фотодетекторов на основе соединения кадмий—ртуть—теллур и многослойных структур с квантовыми ямами (МСКЯ) или микроболометрических элементов разных типов [1–3, 16, 17].

Любой фотоприёмник, в принципе, может эффективно использоваться в качестве субмодуля МФП при учёте на первоначальных этапах проектирования его кристалла(ов) специальных правил и технологических ограничений, налагаемых мозаичным подходом на конструкцию субмодулей. В работах [16, 17] дана аналитическая оценка достижимых параметров ИК ФП с применением КРТ- и МСКЯ-фотодетекторов в широком диапазоне значений технологического параметра R_0A , линейного размера, квантовой эффективности и длины волны максимума спектральной чувствительности ФЧЭ. Зависимости эффективности преобразования изображений в широкоформатных МФП (на основе КРТ- и/или МСКЯ-фотодетекторов) от конструктивно-технологических ограничений в фотоприёмных устройствах и тепловизионной системе требуют отдельного анализа.

Заключение. В данной работе развиты принципы создания мозаичных фотоприёмников. Предложен ряд схемных решений блока адресации субмодулей, обеспечивающих минимизацию слепой зоны МФП. Разработана прецизионная технология близкой стыковки кремниевых кристаллов в МФП с суммарным размером технологической части слепой зоны не более 30 мкм. Рассмотрены вопросы системного применения МФП. Эффективность преобразования изображений в мозаичных ММБП с шагом фоточувствительных элементов 17–100 мкм достигает 99–100 %.

Использование предложенных схем считывания фотосигналов и разработанной прецизионной технологии мозаичных ММБП обеспечивает близкую стыковку двух инфракрасных и/или терагерцовых субмодулей по вертикали. Размер объединённой фотоприёмной матрицы по горизонтали ограничивается экономическими соображениями и требованиями заказчиков.

Актуальными задачами, при решении которых потребуются мозаичный подход к созданию приёмников, могут быть повышение производительности панорамных детекторов информационных систем, увеличение форматов высокочувствительных приёмных устройств космического базирования, регистрация вторичных двумерных сигналов в экспериментальных установках с точечными источниками излучения и т. д.

Тенденции развития систем визуализации «невидимого» излучения — увеличение горизонтального размера и соответственно разрешения при сохранении или минимальном увеличении вертикального размера монитора (в частности, дисплеи форматом 1920×1080 элементов постепенно вытесняются панорамными мониторами с разрешением 2560×1080 или 2560×1440) — подтверждают необходимость исследования мозаичного принципа создания широкоформатных терагерцевых или ИК-фотоприёмников.

Авторы выражают благодарность академику А. Л. Асееву за поддержку научно-исследовательских работ данного направления, ведущему инженеру В. В. Филипповой за разработку вариантов блоков адресации мультиплексоров и проектирование фотошаблонов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Варавин В. С., Гутаковский А. К., Дворецкий С. А. и др.** Состояние и перспективы молекулярно-лучевой эпитаксии $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Прикладная физика. 2002. № 6. С. 25–41.
2. **Продукция фирмы "Teledyne Imaging Sensors": Infrared and Visible FPAs, Products and Services.** URL: <http://www.teledyne-si.com/ps-infrared-visible-fpas.html> (дата обращения: 23.09.2015).
3. **Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Пономаренко В. П.** Современные тенденции создания приборов регистрации оптического излучения // Тез. XXIII Междунар. науч.-техн. конф. по фотоэлектронике и приборам ночного видения. М.: НПО «Орион», 2014. П02.
4. **Chamonal J. P., Mottin E., Audebert P. et al.** Long MWIR HgCdTe butted linear arrays // Proc. SPIE. 1997. **3061**. P. 467–475.
5. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Клименко А. Г. и др.** Преобразование изображений в мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмниках инфракрасного и терагерцевого диапазонов форматом до 3072×576 и более // Оптический журнал. 2014. **81**, № 3. С. 35–43.
6. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Клименко А. Г. и др.** Разработка мозаичных неохлаждаемых микроболометрических приёмников инфракрасного и терагерцевого спектральных диапазонов форматом до 3072×576 и более // Успехи прикладной физики. 2014. **2**, № 2. С. 123–130.
7. **Demyanenko M. A., Esaev D. G., Kozlov A. I. et al.** Sviluppo principio mosaico di creare panoramico con raffreddamento microbolometro panoramica detector immagine a infrarossi e terahertz intervallo spettrale // Italian Sci. Rev. 2015. **7**, N 28. P. 11–15. URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2015/july/Demyanenko.pdf> (дата обращения: 09.10.2015).
8. **Пат. 2509391 РФ.** Способ формирования граней чипа для мозаичных фотоприёмных модулей /А. Р. Новоселов. Опубл. 10.03.2014, Бюл. № 7.
9. **Козлов А. И.** Анализ принципов построения схем кремниевых мультиплексоров для многоэлементных ИК-фотоприёмников // Автометрия. 2010. **46**, № 1. С. 118–129.
10. **Мурога С.** Системное проектирование сверхбольших интегральных схем: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. Кн. 1. 288 с.
11. **Пат. 2530271 РФ.** Сдвиговой регистр (варианты) /М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. И. Козлов и др. Опубл. 10.10.2014, Бюл. № 28.
12. **Пат. 2522306 РФ.** Сдвиговой регистр /М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. И. Козлов и др. Опубл. 10.07.2014, Бюл. № 19.
13. **Пат. 2527188 РФ.** Сдвиговой регистр /М. А. Демьяненко, Д. Г. Есаев, А. И. Козлов и др. Опубл. 27.08.2014, Бюл. № 24.
14. **Новоселов А. Р.** Способ уменьшения зазора между чипами в мозаичных фотоприёмных модулях // Автометрия. 2016. **52**, № 1. С. 116–121.

15. **Tissot J. L., Minassian C., Vilain M. et al.** Uncooled amorphous silicon TEC-less 1/4 VGA IRFPA with 25 μm pixel-pitch for high volume applications // Proc. SPIE. 2008. **6940**. P. 527–536.
16. **Васильев В. В., Козлов А. И., Марчишин И. В. и др.** Анализ структурно-технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов фотодиодов инфракрасного диапазона // Оптический журнал. 2014. **81**, № 7. С. 39–45.
17. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Козлов А. И. и др.** Исследование технологических ограничений в кремниевых схемах считывания сигналов инфракрасных фотоприёмников на основе многослойных структур с квантовыми ямами // Автометрия. 2015. **51**, № 2. С. 110–118.

Поступила в редакцию 10 июня 2015 г.
