

УДК 621.383

Состояние и перспективы разработок охлаждаемых матричных ИК-приемников изображения двойного назначения в ОАО «ЦНИИ "Электрон"»

В. А. Арутюнов, И. С. Васильев, В. Г. Иванов, А. Е. Прокофьев
ОАО «ЦНИИ "Электрон"», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрено состояние разработок монолитных кремниевых матричных ИК-приемников изображения (ИК МПИ) с барьерами Шоттки (БШ), фотоприемных устройств (ФПУ) и цифровых тепловизионных камер (ТПК) в ОАО «ЦНИИ "Электрон"». Приведены основные параметры ИК МПИ БШ с числом элементов 256×256 , 512×512 и ТПК на их основе. Отмечены проблемы, возникающие при переходе от разработок ИК МПИ БШ с областью спектральной чувствительности 3–5 мкм к разработкам таких приемников для длинноволновой области спектра.

Общим требованием к ИК-системам двойного назначения является максимально достижимая дальность работы. Это определяет важнейшие требования к приемникам изображения, используемым в таких системах: пороговая мощность излучения сигнала и число элементов в матрице. Известно, что фотонные охлаждаемые ИК-приемники по пороговой мощности имеют преимущество по сравнению с тепловыми неохлаждаемыми приемниками, а максимальное число элементов легче достигается в монолитных кремниевых ИК-матричных приемниках изображения (ИК МПИ). Эти особенности заметны в ИК-системах, работающих в диапазоне спектра 3–5 мкм [1]. Кроме того, кремний на сегодняшний день является наиболее исследованным материалом с точки зрения физических свойств и разработанности технологии изготовления на его основе подавляющего большинства БИС и ПЗС. Технология кремниевых ПЗС — одна из основных технологий, имеющих в ОАО «ЦНИИ "Электрон"». С учетом этих обстоятельств в течение последних 10 лет в разработках ИК МПИ в ОАО «ЦНИИ "Электрон"» преобладала технология монолитных матриц, при использовании которой и фоточувствительные элементы, и мультиплексор изготавливались в одном и том же кристалле. В частности, сюда относятся ИК МПИ с барьерами Шоттки (ИК МПИ БШ), о которых пойдет речь ниже, обладающие, с точки зрения использования в системах, уникальным свойством — наличием кадровой памяти в ПЗС-мультиплексоре, что позволяет регистрировать без "слепых" интервалов быстропротекающие процессы [1].

Монолитные матричные приемники изображения с барьерами Шоттки.

В 2000 г. закончена опытно-конструкторская разработка ИК МПИ БШ типа ФППЗ-22М с силицидом платины, имеющей чувствительность в диапазоне длин волн 1,2–5,5 мкм и число элементов 256×256 . Основные технические параметры этой матрицы приведены ниже.

*Основные параметры среднеформатной матрицы
ИК ПЗС БШ ФППЗ БШ-22М*

Архитектура.....	четырехфазный ПЗС-опрос фото-чувствительных элементов — фото-диодов Шоттки (ФДШ), меж-столбцовый перенос зарядов по вертикали в горизонтальный выходной ПЗС-регистр; преобразователь заряд/напряжение с "плавающей диффузией" на одном кристалле с матрицей, электрический ввод фонового заряда
Область спектральной чувствительности (без фильтра), мкм.....	1,2—5,5
Рабочий фильтр, мкм.....	3,2—5,0
Число фоточувствительных элементов.....	256x256
Размеры:	
ФДШ, мкм.....	18(Г)х30(В)
ячейки, мкм.....	40x40
фоточувствительной области, мм.....	10,2x10,2
Динамический диапазон, дБ.....	65
Сигнал насыщения (e).....	$5 \cdot 10^6$
Чувствительность выходного преобразователя заряд/напряжение, мкВ/e ⁻	-4
Неравномерность чувствительности, %.....	<3
Пороговая мощность сигнала на ячейку в диапазоне 3,2—5 мкм при фоне не более $3 \cdot 10^{-5}$ Вт/см ² , Вт/ячейка.....	$5 \cdot 10^{-13}$
Инерционность, с.....	$\leq 3 \cdot 10^{-6}$
Время вывода кадра, мс.....	40
Корпус.....	металлокерамический с планарными мягкими выводами
Рабочая температура, К.....	79
Охлаждаемая масса, г.....	≤ 8
Тепловыделение при тактовой частоте 5 МГц, мВт.....	130

В ходе этой разработки были изготовлены также экспериментальные матрицы с фронтальной засветкой ИК-изображением с чувствительностью в диапазоне длин волн 0,3—5,5 мкм и величиной внешней квантовой эффективности, близкой к опубликованной ранее фирмой SRC [2].

В настоящее время в развитие работ по ИК МПИ средневолнового диапазона созданы экспериментальные образцы ИК МПИ БШ с силицидом платины с числом элементов 512x512 и начата опытно-конструкторская разработка таких матриц.

*Основные параметры большеформатной
матрицы ИК ПЗС БШ*

Архитектура.....	две четырехфазные ПЗС-матрицы с бесшовной вертикальной стыковкой в один фоточувствитель-
------------------	--

ный массив фотодиодов Шоттки (ФДШ); межстрочный перенос зарядов по вертикали в два горизонтальных выходных ПЗС-регистра; два преобразователя заряд/напряжение с "плавающей диффузией" на одном кристалле с матрицей; электрический ввод фонового заряда

Область спектральной чувствительности (без фильтра), мкм.....	1,2—5,5
Рабочий фильтр, мкм.....	3,2—5,0
Число:	
фоточувствительных элементов.....	512(Г)х512(В) (две субматрицы с числом элементов 256(Г)х512(В) каждая)
выходов видеосигналов.....	2
Тактовая частота вывода информации по каналу, МГц.....	5
Размеры:	
ФДШ, мкм.....	18(Г)х20(В)
ячейки, мкм.....	40х30
фоточувствительной области, мм.....	20,5х15,4
Динамический диапазон, дБ.....	60
Сигнал насыщения (е).....	1,1·10 ⁶
Чувствительность выходного преобразователя заряд/напряжение, мкВ/е ⁻	2
Неравномерность чувствительности, %.....	<3
Пороговая чувствительность на ячейку в диапазоне 3,2—5 мкм при фоне не более 3·10 ⁻⁵ Вт/см ² , Вт/ячейка.....	5·10 ⁻¹³
Инерционность, с.....	≤3·10 ⁻⁶
Время вывода кадра, мс.....	40
Линейность динамического диапазона на рабочем участке, %, не хуже.....	±1
Корпус.....	металлокерамический с планарными мягкими выводами
Рабочая температура, К.....	75—78
Охлаждаемая масса, г.....	≤8
Тепловыделение при тактовой частоте 5 МГц, мВт.....	260

В этой матрице улучшена эффективность переноса заряда, снижен шум выходного узла и заложены основы архитектуры многоматричных ИК МПИ с бесшовной стыковкой фоточувствительных массивов. Опыт использования данного подхода позволяет реально подойти к возможности создания большеформатных массивов площадью ≈16 см² для специальных применений.

В 2001 г. была закончена научно-исследовательская стадия разработки ИК МПИ БШ, работающей на длинноволновом участке ИК-диапазона. На этой стадии для получения БШ был использован переход IrSi/Si с обогащающим "подлегированием" поверхностного слоя кремния, образующего БШ. Основные параметры длинноволновой матрицы приведены ниже.

Основные параметры среднеформатной матрицы ИК ПЗС БШ

Архитектура.....	четырёхфазная ПЗС-матрица фотодиодов Шоттки (ФДШ); межстрочный перенос зарядов по вертикали в горизонтальный выходной ПЗС-регистр; преобразователь заряд/напряжение с "плавающей диффузией" на одном кристалле с матрицей; электрический ввод фонового заряда
Область спектральной чувствительности (без фильтра), мкм.....	1,2—10,5
Рабочий фильтр, мкм.....	8—10,5
Число:	
фоточувствительных элементов.....	256x256
выходов видеосигналов.....	1
Тактовая частота вывода информации по каналу, МГц.....	5
Размеры:	
ФДШ, мкм.....	24(Г)x34(В)
ячейки, мкм.....	48x48
фоточувствительной области, мм.....	12,28x12,28
Динамический диапазон, дБ.....	60
Сигнал насыщения (e).....	5·10 ⁶
Чувствительность выходного преобразователя заряд/напряжение, мкВ/e ⁻	1
Неравномерность чувствительности, %.....	<3
Пороговая мощность сигнала на ячейку в диапазоне 8—10,5 мкм при фоне не более 5·10 ⁻⁶ Вт/см ² , Вт/ячейка.....	5·10 ⁻¹³
Инерционность, с.....	≤3·10 ⁻⁶
Время вывода кадра, мс.....	40
Линейность динамического диапазона на рабочем участке, %, не хуже.....	±1
Корпус.....	металлокерамический с планарными мягкими выводами
Рабочая температура, К.....	50—55
Охлаждаемая масса, г.....	≤8
Тепловыделение при тактовой частоте 5 МГц, мВт.....	≤130

ПЗС-архитектура матрицы существенно усложнила задачу получения достаточно малых неэффективностей переноса заряда при температурах менее 60 К, которые были необходимы для снижения темнового тока БШ в условиях небольших потоков фоновых фотонов. С другой стороны, наличие некоторого приемлемого уровня фона обеспечивало аналог режима "жирного нуля" и снижало неэффективность переноса зарядового пакета в выходном регистре. Однако количество "фоновых" электронов в этой области спектра по сравнению с областью 3—5 мкм возрастает в 50—100 раз, обычно многократно перекрывая "приемлемый" уровень, ухудшая пороговую мощность сигнала и уменьшая рабочий участок динамического диапазона.

Понятно, что увеличение квантовой эффективности без адекватного увеличения эквивалентной накапливающей емкости не решает проблемы. Задача оптимизации технологии и конструкции ИК МПИ БШ для длинноволнового

диапазона спектра будут решаться в ходе проведения дальнейшей опытно-конструкторской стадии работы и потребуют более детального учета назначения и оптических схем ИК-камер.

Подчеркнем, что стандартная для низкобарьерной силицидной структуры спектральная характеристика в средневолновой области создает реальную возможность составить конкуренцию традиционным узкозонным полупроводникам с красной границей в области 3—5 мкм.

Фотоприемные устройства

Были разработаны два типа фотоприемных устройств (ФПУ) с использованием созданных ИК МПИ БШ диапазона 3—5 мкм.

В ФПУ первого типа криостатирование осуществлялось путем заливки жидкого азота. Запас криогента составлял 2,5 л, и ФПУ мог работать без дозаправки в течение 24 ч при любом направлении оптической оси криостата. Внутренний тепловой фон ограничивался сменной охлаждаемой блендой с углом поля зрения не более 20° .

Криостаты этого типа допускали разборку с возможной заменой входного окна, бленды, охлаждаемого фильтра и ИК МПИ БШ, что предоставляло определенные удобства пользователю, особенно в условиях лабораторного применения ФПУ, однако требовало периодической откачки вакуумной полости криостатов.

ФПУ второго типа рассчитаны на работу с микрокриогенной системой (МКС), работающей по циклу Стирлинга. Криостаты ФПУ данного типа не рассчитаны на многократную разборку и вакуумируются при установке в них МПИ БШ. Вакуум поддерживается в них встроенным регенерируемым сорбционным насосом. МПИ БШ монтируются на торец стакана криостата, в который вставляется палец холодильной головки МКС Стирлинга, а входное окно устанавливается путем запрессовки на индий. Таким образом, МКС и ФПУ легко разъединяются, если какой-либо из этих узлов должен быть заменен, а при необходимости МПИ БШ может быть также извлечен из криостата или заменен. Внешний вид ФПУ второго типа показан на рис. 1.

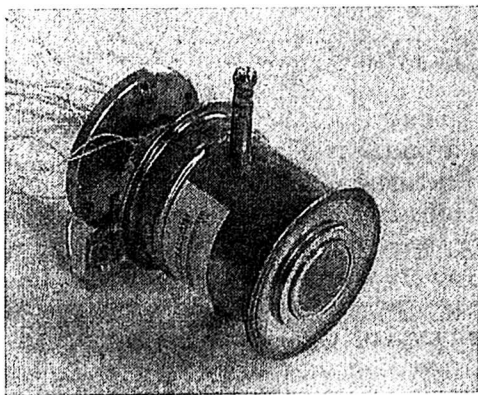


Рис. 1. Внешний вид ФПУ

Одновременная минимизация теплопритока к МКС и фоновой нагрузки на МПИ БШ в ФПУ второго типа потребовала тщательной обработки конст-

рукции и технологии охлаждаемой бленды, входного окна и их взаимного расположения в криостате. С учетом той или иной оптической схемы тепловизионной камеры пользователя ФПУ может быть изготовлено с различными размерами охлаждаемой бленды и входного окна без изменения базовой конструкции.

Тепловизионная камера

На основе разработанных МПИ БШ и ФПУ была разработана, изготовлена и испытана экспериментальная тепловизионная камера (ТПК). Общий вид ТПК с ФПУ второго типа с МПИ БШ ФППЗ-22М и МКС Стирлинга второго класса МСМГ-5А—1,3/80 фирмы "Сибкриогентехника" показан на рис. 2. Функциональная схема ТПК приведена на рис. 3, а ее основные параметры даны ниже.

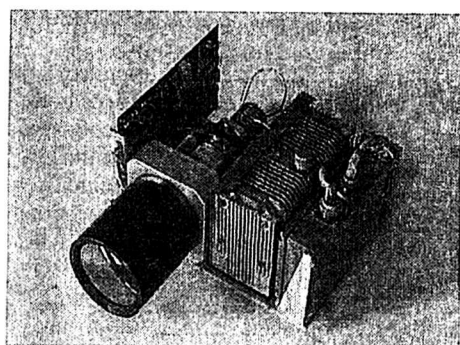


Рис. 2. Тепловизионная камера с МПИ БШ 256×256 элементов (кожух снят)

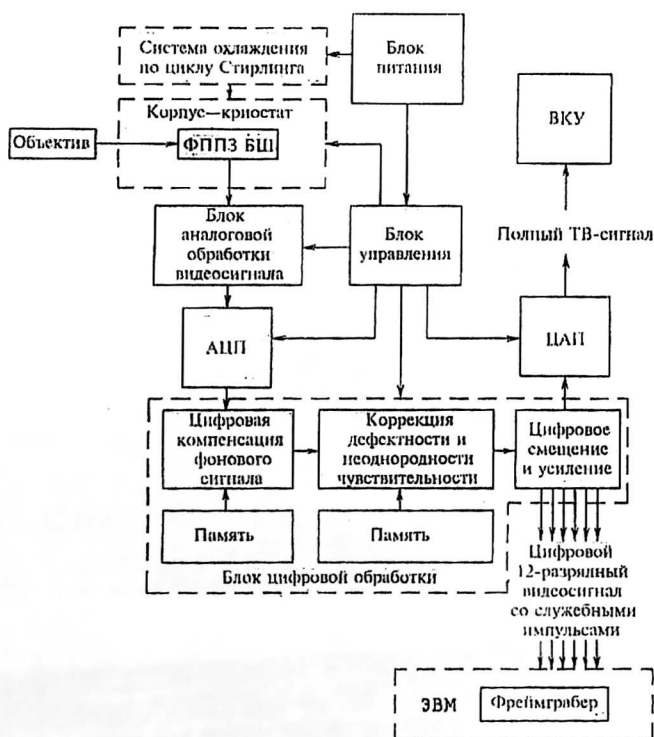


Рис. 3. Функциональная схема тепловизионной камеры

*Основные параметры передающей цифровой инфракрасной камеры
на основе матричного фотоприемника*

Тип используемой ИК-матрицы	ФППЗ БШ-22М в корпусе криостата
Формат матрицы, элементов	256x256
Объектив:	
$D_{вх}$, мм	80
D/f	1:1
2β , град	6,4x6,4
Область ахроматизации, мкм	3—5,5
NETD, мК	70
Кратность пересветки	1000
Инерционность, с	$< 10^{-9}$
Смаз	отсутствует
Система охлаждения	микроригенная система с циклом Стирлинга типа МСМГ-5А-1,3/80
Частота кадров, кадр/с	25
Развертка	чересстрочная
Обработка видеосигнала	12-разрядное аналого-цифровое преобразование видеосигнала; коррекция неоднородности чувствительности; коррекция дефектных элементов; формирование фонового кадра и его вычитание из текущего кадра; цифровое смещение и усиление видеосигнала
Представление выходного видеосигнала	а) в виде параллельного цифрового 12-разрядного кода в сопровождении служебных импульсов; б) в аналоговой форме для работы со стандартным ВКУ

Уже на стадии съема сигнала изображения в ФППЗ БШ опрос элементов тактируется цифровыми импульсами, а после АЦП амплитуда видеосигнала также квантуется и далее поэлементно обрабатывается полностью цифровой сигнал. В ТПК предусмотрены коррекция сигнала с дефектных элементов и двухточечная коррекция неоднородности чувствительности. Формирование опорного фонового кадра осуществляется в блоке памяти ТПК, далее усредненный по 50 отсчетам опорный кадр может быть "вычтен" из видеосигнала текущего кадра. Блок цифрового смещения и усиления задает ту часть динамического диапазона ТПК, в пределах которой видеосигнал воспроизводится с оптимальным контрастом и амплитудой. Отредактированный видеосигнал может быть просмотрен на ВКУ и параллельно введен в ЭВМ для дальнейшей цифровой обработки и визуализации.

В течение последних двух лет ТПК испытывалась по различным сюжетам, дающим крупно- или мелкодетальные динамические изображения. "Жесткий" цифровой растр, малая фотоэлектрическая инерционность, отсутствие остаточного сигнала в следующем кадре и, наконец, близкая к идеальной амплитудно-частотная характеристика [3] позволили эффективно использовать поэлементную цифровую обработку видеосигнала, обеспечить высокую четкость изображения подвижных сюжетов и их хорошую распознаваемость. Некоторые полученные изображения приведены на рис. 4 и 5.

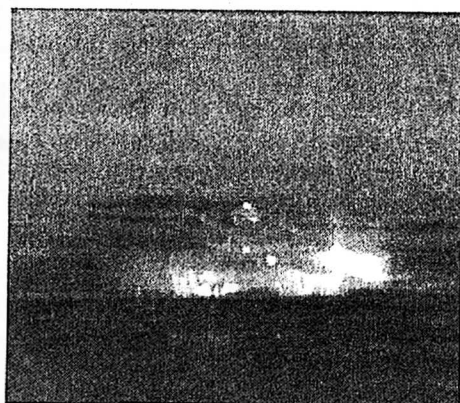
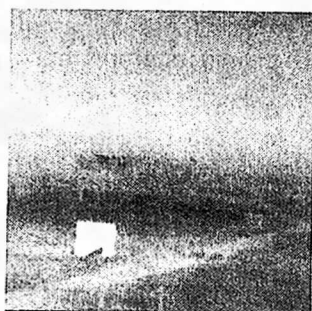


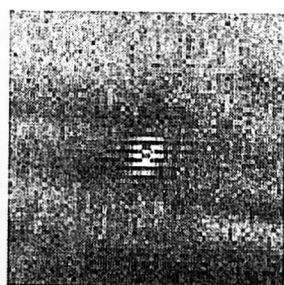
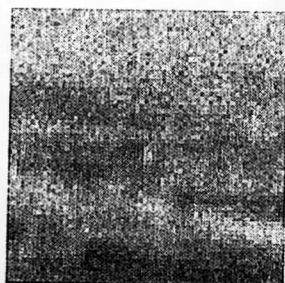
Рис. 4. Изображение движущегося танка на расстоянии 100 м (зима, темное время суток)



a



б



в

Рис. 5. Изображение момента выстрела из снайперской винтовки на расстоянии 845 м (апрель, ночь):
a — до выстрела; *б* — момент выстрела (светящаяся точка в правой части изображения);
в — увеличенные фрагменты места выстрела размером 64x64 элемента

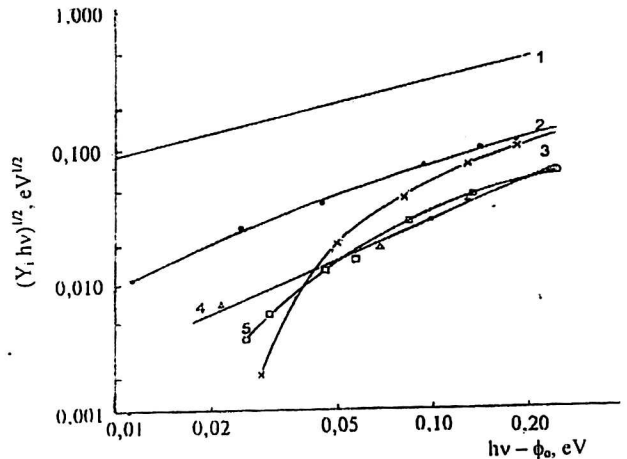
Перспективы разработок

Опыт разработки и испытаний матриц, ФПУ и камер показал, что существуют резервы для дальнейшего улучшения основных параметров матриц и ФПУ практически на всех "уровнях" разработки: исходного материала, физики и технологии кремниевой структуры, самой матрицы и ФПУ. Это позволяет сформулировать ряд направлений дальнейших разработок.

Матричные приемники изображения на барьерах Шоттки

Пороговая мощность сигнала на фоточувствительный элемент в диапазоне 3—5 мкм, по-видимому, может быть снижена в несколько раз и доведена до $(0,5 - 1,0) \cdot 10^{-13}$ Вт/элемент при времени накопления 40 мс. Для этого необходимо увеличить квантовую эффективность БШ в два—три раза и снизить выходной шум матрицы. На рис. 6 приведены наши [4] и литературные данные зависимости корня квадратного из произведения внутренней квантовой эффективности на энергию квантов падающего излучения — $(Y_i/h\nu)^{1/2}$ от разности между энергией квантов и высотой БШ (ϕ_0) для различных силицидов. Теоретическая зависимость (прямая 1) получена [5] при условии, когда отношение длины остывания горячих электронов (L_e) к толщине слоя силицида (d) много больше единицы ($L_e/d \rightarrow \infty$). Видно, что лучшие из полученных результатов для GeSi/Si БШ в области длинноволнового края фотоэффекта оказываются ниже предельно достижимых в 10—100 раз. С другой стороны, в [6] приводились результаты уменьшения выходного шума как в ПЗС, так и в КМОП мультиплексорах, по крайней мере, в несколько раз по сравнению с полученным нами. Эти обстоятельства внушают оптимизм в осуществимости разработки МПИ БШ с повышенной чувствительностью для умеренных фоновых нагрузок.

Рис. 6. Зависимости приведенной квантовой эффективности от разности между энергией квантов и высотой потенциального барьера Шоттки:
1 — теоретическая зависимость;
2—5 — экспериментальные зависимости в области длинноволнового края фотоэффекта для разных образцов



Переход на технологию получения БШ из слоя вырожденный полупроводник/кремний позволит также разработать МПИ БШ на область спектра 8—12 мкм и, возможно, 6—16 мкм. Однако резкое усложнение проблемы фона в этих диапазонах заставляет по-новому подойти к вопросам конструирования низкофоновых оптических каналов для ТПК.

Криостаты для фотоприемных устройств

Охлаждаемые ФПУ представляют собой оптико-криоэлектронные устройства. Поэтому конструкция и параметры криостатов во многом обеспечивают оптимальные условия работы МПИ БШ и в итоге — получение хороших характеристик ТПК. Уровни фоновых нагрузок на МПИ БШ, величины теплопритоков и охлаждаемых масс являются критически важными требованиями для криостатов. В ОАО «ЦНИИ "Электрон"» проводятся проектные работы по созданию криостатов ФПУ, обеспечивающих фоновые нагрузки на МПИ БШ до 10^{-6} Вт/см² в области спектра 3—5 мкм и до 10^{-5} Вт/см² — в области спектра 8—12 мкм. Одновременно ожидается снижение уровня теплоприто-

ков (без джоулева тепловыделения МПИ БШ) до 0,5—0,6 Вт и охлаждаемой массы — до 5—8 г. Это позволит реализовать высокую пороговую чувствительность новых МПИ БШ, снизить требования к хладопроизводительности МКС Стирлинга и обеспечить выход ФПУ на рабочую температуру за время 3—5 мин.

Заключение

Результаты разработок матричных приемников изображения ИК-диапазона спектра на основе барьеров Шоттки в кремнии, выполненные в ОАО «ЦНИИ "Электрон"» в последние годы, показали, что для таких приемников большого формата технология монокристаллических кремниевых структур является предпочтительной, а возможности улучшения чувствительности барьеров Шоттки в МПИ БШ еще не исчерпаны. Реализация этих возможностей зависит не только от успехов в конструировании и технологии МПИ БШ, но и от того, насколько криостаты ФПУ и электроника ТПК могут оптимизировать рабочие условия для фотоприемника. Перспективы дальнейшего развития направления монокристаллических МПИ БШ, рассмотренных в данной работе, свидетельствуют, что сейчас и в недалеком будущем фотоприемные матрицы этого класса останутся в Российской Федерации основой для разработок цифровых тепловизионных камер двойного назначения.

Литература

1. Арutyunov В. А., Васильев И. С., Иванов В. Г., Прокофьев А. Е. Разработка охлажденных матричных ИК-приемников изображения для спецприменений и перспективы их развития // XII науч.-техн. конф. "Пути развития телевизионных фотоэлектронных приборов и устройств на их основе". Тез. докл. — С.-Петербург, 2001.
2. Sarnoff 640x480 IR Imager, David Sarnoff Res. Center, Solid St. Imaging Technology, Publication Rev., March 9, 1993.
3. Arutyunov V. A., Ivanov V. G., Prokofyev A. E. Characteristics of the experimental IR SB CCD camera during outdoor scenes transfer // Proc. SPIE. 1998. V. 3819. P. 85—91.
4. Ivanov V. G., Kassirov S. A., Panasenkov V. I., Troyanovsky V. S. Diffusion model of hot hole photoemission in Schottky barrier and character parameters of resonance arising of quantum efficiency near long wave length limit in Abstracts of Reports to the 4-th Conference on CCD and System Based on Them, "CCD-92". Moscow, 1992 [in Russian]. P. 24.
5. Ivanov V. G., Panasenkov V. I., Ivanov G. V. Photocarrier generation processes in Schottky barriers and possibilities to control the value and spectral dependence of quantum efficiency in IR SB CCD // Proc. SPIE. 1998. V. 3819. P. 143—148.
6. Kozłowski L. Y., Montroy Y., Vural K., Kleinhans W. E. Ultra-low noise infrared focal plane array status // Ibid. V. 3436. P. 162—171.

State and perspectives of developments of chilled IR focal plane arrays for a dual purpose at the Electron Central Research Institute

V. A. Arutyunov, I. S. Vasil'ev, V. G. Ivanov, A. E. Prokof'ev
Electron Central Research Institute, St.-Petersburg, Russia

Surveyed is the state of developments of monolithic silicon IR focal plane arrays with Schottky barriers, photodetector devices, and digital thermal-imaging devices at the Electron Central Research Institute. The basic parameters of the 256x256 / 512x512 IR focal plane arrays and the thermal-imaging devices on its base are given in the paper. Marked are the problems, arising at transition from 3—5 μm devices to development of such receivers for the long-wave area of a spectrum.