

УДК 621.383

Перспективы разработок монолитных охлаждаемых матричных ИК-приборов для комплексированных многоспектральных систем обнаружения в диапазонах 1,5—5 и 8—12 мкм

*В. А. Арутюнов, И. С. Васильев, В. Г. Иванов, А. Е. Прокофьев, Р. М. Степанов
ОАО «ЦНИИ «Электрон», С.-Петербург, Россия*

Рассмотрено современное состояние разработок кремниевых охлаждаемых матричных ИК-фотоприемников (МФП) с фоточувствительными элементами на барьерах Шоттки (БШ) и фотоприемных устройствах (ФПУ) на их основе, выполненных в ОАО «ЦНИИ «Электрон». Приведены основные параметры широкоспектральных монолитных МФП 256×256 элементов на силициде платины (1,2—5,5 мкм) и силициде иридия (1,2—10,5 мкм), а также МФП 512×512 элементов на силициде платины. Результаты лабораторных и полигонных испытаний ИК-камер с использованием разработанных МФП БШ продемонстрировали правильность выбранного направления, позволили получить опыт эксплуатации МФП БШ и выявить пути их совершенствования применительно к работе по малоразмерным объектам. Рассмотрены факторы, ограничивающие дальнейшее улучшение пороговой чувствительности разработанных МФП БШ при работе по мелким деталям изображения. Обсуждены специфические требования к МФП БШ, работающим в многоспектральных ИК-системах обнаружения малоразмерных объектов. Отмечена перспективность разработок большеформатных МФП БШ с повышенной чувствительностью в монолитном исполнении на основе кремния с использованием современной технологии СБИС и новой технологии получения и обработки многослойных тонкопленочных структур силицидов металлов и полупроводников.

По характеру решаемых задач существующие ИК-системы можно разделить на два крупных класса.

К первому классу можно отнести ИК-системы тепловидения, основной задачей которых являются различение и распознавание различных объектов по их ИК-изображениям. При этом размеры изображений объектов сопоставимы с размерами фокальной плоскости (или с размерами регистрирующего матричного ИК-прибора), а изображение "фоновой" обстановки, создаваемое вариациями температуры или излучающей способности, помогает распознаванию интересующих объектов. Достижение обычно больших дальностей здесь связано (помимо параметров матричных ИК-приборов) с использованием светосильных и узкопольных объективов.

Второй класс ИК-систем — это системы обнаружения. Угловые размеры наблюдаемых объектов здесь меньше или равны мгновенному углу поля зрения матричных ИК-приборов, а размеры изображения не превышают кружка рассеяния (кружка Эри) используемого объектива. (Такие объекты получили название "точечные".) Фон здесь, как правило, вредит обнаружению. Определяющей характеристикой таких систем является максимальная дальность обна-

ружения при максимально широком угле поля зрения. Так как облученность входного зрачка объектива этих систем при увеличении дальности падает как квадрат дальности (а часто и в более сильной степени), то важнейшим параметром объектива становится не светосила, а размеры входного зрачка.

В отличие от систем тепловидения изображение "точечного" объекта не имеет какого-либо характерного контура. Поэтому если возникает задача различения, то она решается путем определения траектории движения и динамики изменения силы излучения и температуры (т. е. возникает задача спектрорадиометрии) такого объекта. Последняя характеристика может быть определена из измерений сигнала от объекта в разных участках ИК-диапазона спектра, и такой метод пока является единственным.

К матричным ИК-приборам передачи изображения (ИК МПИ) обоих классов ИК-систем предъявляется лишь одно несомненно общее требование — это минимальная пороговая мощность, собираемая каждым элементом матрицы. Наборы же других требований, в зависимости от того, в каком классе ИК-систем предполагается их использование, могут различаться достаточно сильно. Например, для систем обнаружения большой формат матриц является крайне важ-

ным, так как он в любом случае определяет ширину захвата пространства обнаружения, а для систем тепловидения увеличение формата матрицы целесообразно лишь до некоторых пределов, связанных с необходимостью и достаточной детальностью изображений и флюктуациями характеристик трассы наблюдения. Широкоспектральность ИК МПИ в системах обнаружения является также приоритетной характеристикой, в то время как для систем тепловидения она лишь желательна. Более жесткие требования к ИК МПИ предъявляют системы обнаружения в части амплитудно-частотной характеристики, линейности и ширины динамического диапазона, собственного тепловыделения и др.

Однако возможно, что самое основное требование к ИК МПИ для систем обнаружения — это предельно малое число дефектных элементов. При попадании на дефектный элемент изображение "точечного" объекта не регистрируется, что дает 100%-ный пропуск цели, по крайней мере, в данном кадре удлиняется время наблюдения, необходимое для определения траектории движения объекта, а при большом числе дефектов задача обнаружения вообще не решается.

В ОАО «ЦНИИ "Электрон"» разработки ИК-приборов, формирующих сигналы изображения для использования в различных системах обнаружения, ведутся уже более 30 лет. Опираясь на накопленный опыт, выполненные в последние годы разработки кремниевых матричных ИК-приборов с барьерами Шоттки (ИК МПИ БШ), по мере совершенствования характеристик этих приборов, также ориентировались на применение в различных системах обнаружения наземного, морского и воздушного базирования.

В основу этих разработок был положен принцип создания ИК МПИ в виде монолитной конструкции с использованием одного материала — кремния. В правильности выбранного подхода убеждали история развития технологии кремниевых СБИС и наш опыт разработки и выпуска линейных и матричных ПЗС видимого диапазона спектра. В последние годы за рубежом были разработаны монолитные кремниевые ИК МПИ БШ с числом элементов 512×512 , в которых количество дефектных элементов составляло менее 0,002 %, а неоднородность чувствительности — 0,45 % [1, 2]. Располагая не самой современной технологической базой изготовления ПЗС видимого диапазона спектра, изношенной энергетикой и скромным парком испытательного и измерительного оборудования, мы все же смогли в 2000 г. закончить опытно-конструкторскую разработку ИК МПИ БШ диапазона 1,2–5,5 мкм с числом элементов 256×256 , создать экспериментальные ИК МПИ БШ диапазона 1,2–5,5 мкм с числом элементов 512×512 , выполнить НИР и приступить к ОКР по ИК МПИ БШ диапазона 1,2–10,5 мкм. Одновре-

менно были созданы тепловизионные камеры с использованием разработанных ИК МПИ БШ, которые успешно прошли ряд полигонных испытаний, в том числе и по "точечным" высокодинамичным объектам.

Ниже представлены основные параметры выпускаемых и недавно созданных нашим предприятием ИК МПИ БШ, кратко обсуждается конструкция криостата фотоприемного устройства, предназначенного для работы с микрокриогенной системой с циклом Стирлинга, и рассмотрены построение и основные параметры цифровой тепловизионной камеры (ТВК) с разработанным ИК МПИ БШ, а также представлены некоторые результаты испытаний ТВК по динамичным "точечным" объектам. Обсуждаются также проблемы разработок монолитных кремниевых ИК МПИ БШ для перспективных ИК-систем обнаружения.

Монолитные матричные приемники изображения с барьерами Шоттки (МПИ БШ)

В 2000 г. закончена опытно-конструкторская разработка ИК матричного прибора с барьерами Шоттки типа ФППЗ БШ-22М с силицидом платины, имеющей чувствительность в диапазоне длин волн 1,2–5,5 мкм и число элементов 256×256 . Основные параметры среднеформатной матрицы на барьерах Шоттки (ТУ РАГС 433830.007) приведены ниже.

Архитектура.....	четырехфазный ПЗС-опрос фоточувствительных элементов-фотодиодов Шоттки (ФДШ), межстолбцовый 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	256×256
Размеры ФДШ, мкм	$18(\Gamma) \times 30(B)$
Размеры ячейки, мкм	40×40
Размеры фоточувствительной области, мм	10,2×10,2
Динамический диапазон, дБ	60
Сигнал насыщения (e).....	$2 \cdot 10^6$
Чувствительность выходного преобразователя заряд/напряжение, мкВ/е ⁻	-4
Неравномерность чувствительности, %	< 3
Пороговая мощность сигнала на ячейку.....	$5 \cdot 10^{-13}$ Вт/ячейку — в диапазоне 3,2–5 мкм при фоне не более $3 \cdot 10^{-5}$ Вт/см ²
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 экспериментальные матрицы с фронтальной за- светкой 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].

Разработаны также экспериментальные образцы приборов с силицидом платины с числом элементов 512×512. Основные параметры большеформатной матрицы ИК ПЗС БШ следующие:

Архитектура.....	две четырехфазные ПЗС-матрицы с бесшовной вертикальной стыковкой в один фоточувствительный 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)×512(В) (две субматрицы с числом элементов 256(Г)×512(В) каждая)
Число выходов видеосигналов.....	2
Тактовая частота вывода информации по каналу, МГц.....	5
Размеры ФДШ, мкм	18(Г)×20(В)
Размеры ячейки, мкм.....	40×30
Размеры фоточувствительной области, мм	20,5×15,4
Динамический диапазон, дБ	60
Сигнал насыщения (e).....	1,1·10 ⁶
Чувствительность выходного преобразователя заряд/напряжение, мкВ/e ⁻	2
Неравномерность чувствительности, %	<3
Пороговая чувствительность на ячейку.....	5·10 ⁻¹³ Вт/ячейку — в диапазоне 3,2–5 мкм при фоне не более 3·10 ⁻⁵ Вт/см ²
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 этом приборе улучшена эффективность переноса заряда, снижен шум выходного узла и заложены основы архитектуры многоматричных приборов с бесшовной стыковкой фоточувствительных массивов. Опыт использования данного подхода позволяет реально подойти к созданию большеформатных массивов площадью до ≈16 см².

Для области спектральной чувствительности 1,2–10,5 мкм в рамках проводимой ОКР изготовлены первые образцы приборов с барьера Шоттки с использованием перехода IrSi/Si с обогащающим "подлегированием" поверхностного слоя кремния, образующего барьер. Основные параметры длинноволновой среднеформатной ИК-матрицы на барьерах Шоттки диапазона 8–12 мкм приведены ниже.

Архитектура.....	четырехфазная 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	256×256
Число выходов видеосигналов.....	1
Тактовая частота вывода информации по каналу, МГц	5
Размеры ФДШ, мкм	24(Г)×34(В)
Размеры ячейки, мкм	48×48
Размеры фоточувствительной области, мм	12,28×12,28
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 – 5·10 ⁻¹³ Вт/ячейку
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

Использованная на данном этапе ПЗС-архитектура матрицы существенно усложнила задачу получения достаточно малых неэффективностей переноса заряда при температуре менее 60 К, которая была необходима для снижения обратного темнового тока барьера Шоттки в условиях

небольших фоновых потоков 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. Для обеспечения указанной выше пороговой мощности с сигнала потребовалась тщательная конструктивная проработка оптического узла ФПУ (включая уменьшение апертурного угла бленды), необходимая для снижения фоновой нагрузки на ИК МПИ БШ.

Фотоприемные устройства

Фотоприемное устройство представляет собой специализированный криостат с охлаждаемой блендой, охлаждаемым полосовым оптическим фильтром, ИК-матрицей на хладопроводе, низкотеплопроводной системой электрических контактов и узлом стыковки хладопровода либо с жидким хладагентом или с газовой холодильной машиной.

Представленное ФПУ рассчитано на работу с микрокриогенной системой (МКС), работающей по циклу Стирлинга. Криостаты ФПУ данного типа не рассчитаны на многоразовую разборку и вакуумируются при установке в них МПИ БШ. Вакум поддерживается в них встроенным регенерируемым сорбционным насосом. Матрицы с барьерами Шоттки 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, в частности, возможна замена МКС Стирлинга на МКС Джоуля-Томсона. ИК-МПИ БШ может быть также извлечена из криостата или заменена при необходимости. Внешний вид ФПУ этого типа показан на рис. 1.



Рис. 1. Базовый модуль фотоприемного устройства, охлаждаемый, матричный МФПУ 1 ОМ

Одновременная минимизация теплопритока к МКС и фоновой нагрузки потребовала тщательной отработки конструкции и технологии изготовления 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 входным окном без изменения базовой конструкции.

Цифровая тепловизионная камера

Общий вид цифровой тепловизионной камеры и отечественной МКС Стирлинга второго класса МСМГ-5А-1,3/80 фирмы "Сибкриогентехника" показан на рис. 2.

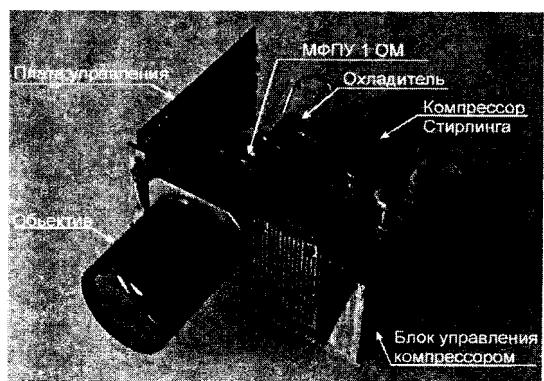


Рис. 2. Тепловизионная камера на основе МФПУ 1 ОМ (256x256 элементов) без кожуха

Функциональная схема ТВК приведена на рис. 3, а основные параметры передающей цифровой ИК-камеры на основе матричного фотоприемника изложены ниже.

Тип используемой ИК-матрицы	ФППЗ БШ 22М в корпусе криостата
Формат матрицы, элементов.....	256x256
Объектив	$D_{in} = 80$ мм, $D/f=1:1,1$; $2\beta = 6,4\text{--}6,4^{\circ}$. Область ахроматизации 3—5,5 мкм
NETD.....	0,07 K ($f/1,1$, 300 K)
Кратность пересветки	1000
Инерционность, с	$< 10^{-9}$
Смаз.....	отсутствует
Система охлаждения	микрокриогенная с циклом Стирлинга типа МСМГ-5А-1,3/80
Частота вращения 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

в виде параллельного цифрового 12-разрядного кода в сопровождении служебных импульсов; в аналоговой форме для работы со стандартным ВКУ

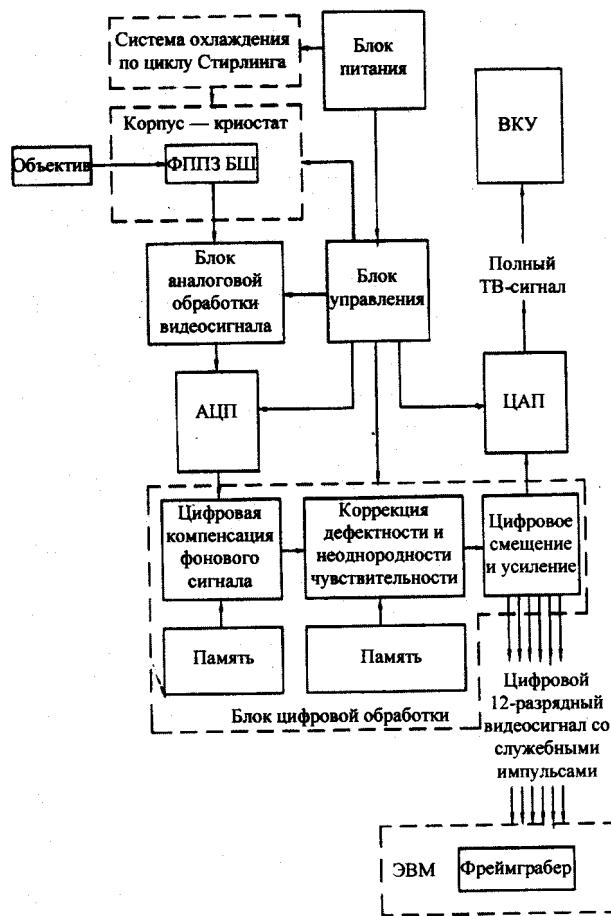


Рис. 3. Функциональная схема тепловизионной камеры

В приборах на барьерах Шоттки опрос элементов тактируется цифровыми импульсами, амплитуда видеосигнала также квантуется АЦП, и далее поэлементно обрабатывается полностью цифровой сигнал. В ТВК предусмотрены коррекция сигнала с дефектных элементов и двухточечная коррекция неоднородности чувствительности. Формирование опорного фонового кадра осуществляется в блоке памяти телевизионного канала, и далее усредненный по 50 отсчетам опорный кадр может быть "вычен" из видеосигнала текущего кадра. Блок цифрового смещения и усиления задает ту часть динамического диапазона ТВК, в пределах которой видеосигнал воспроизводится с оптимальным контрастом и амплитудой. Отредактированный видеосигнал может быть просмотрен на видеоконтрольном устройстве (ВКУ) и параллельно введен в ЭВМ для дальнейшей цифровой обработки и визуализации. Математическое обеспечение обработки изображения также разработано в ОАО «ЦНИИ «Электрон»».

"Жесткий" цифровой растр, малая фотоэлектрическая инерционность, отсутствие остаточного сигнала в следующем кадре и близкая к идеальной амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) [4] позволили эффективно использовать поэлементную цифровую обработку видеосигнала в реальном времени и обеспечить высокую четкость изображения подвижных сюжетов и их хорошую распознаваемость в полигонных условиях [5].

Возможности использования ТВК с приборами на барьерах Шоттки гражданского назначения (промышленность, медицина, экология) достаточно обширны и периодически обсуждаются в литературе [6]. В большинстве случаев при сравнении характеристик ТВК на одноэлементных или линейных фотоприемниках и на матричных отмечается более уверенное решение многих задач, когда используются матричные приборы. В этом случае появляются новые возможности, определяемые постоянной ориентацией каждого фоточувствительного элемента на свою часть сюжета в течение всего времени кадра, накоплением сигнала за время кадра и малым временем реакции на изменение интенсивности ИК-излучения. Речь идет об импульсной ИК-микроскопии высокотеплопроводных сред. Работы по созданию такого ИК-микроскопа были начаты в ОАО «ЦНИИ «Электрон» совместно с СКБ Аналитических приборов РАН (Санкт-Петербург).

При возникновении локального выделения тепла в высокотеплопроводной среде толщиной ℓ (например, в металлической или кремниевой пластине) одновременно идут три процесса:

а — локальное повышение температуры по закону, близкому к экспоненте с постоянной

времени $\tau = \ell^2 \frac{\rho c}{\lambda}$ (ρ — плотность, c — удельная

теплоемкость, λ — удельная теплопроводность);

б — диффузия тепла с коэффициентом

$$D_T = \frac{\lambda}{\rho c} \text{ на расстояние } \ell_T = \sqrt{D_T t} \quad (t \text{ — время});$$

в — теплообмен с внешней средой.

В результате при больших λ стационарная картина распределения температуры в среде практически не позволяет установить место тепловыделения (среда нагревается как одно целое). Для регистрации достаточно точных координат начального места перегрева необходимо использовать короткий импульс тепловыделения и время кадра, не превышающее длительность этого импульса. При этом абсолютное изменение температуры в месте перегрева может быть небольшим, а плотность излучения сигнала, достигающая фокальной плоскости, уменьшается примерно пропорционально квадрату роста линейного увеличения микроскопа. В рассматриваемом случае важны все вышеотмеченные особенности приборов на барьерах Шоттки.

Полученные нами экспериментальные данные [7] подтверждают высказанные соображения. На рис. 4 с помощью ТВК показана регистрация места перегрева при импульсном включении напряжения в процессе контроля функционирования ИК-матриц ФППЗ-22М. Хорошо видно, что аномальное тепловыделение происходит в местах размерами ~6 мкм с повышенными токами утечки, которые представляют собой "точечные" объекты. Обнаружить такие потенциально ненадежные элементы матриц другими методами не удавалось. Отметим, что за время действия короткого импульса напряжения необратимый тепловой пробой не наступал, так что использованный метод контроля был неразрушающим.

Развитию методов импульсной ИК-микроскопии с использованием матричных ИК-приемников за рубежом в настоящее время уделяется всевозрастающее внимание [7], и использование для решения этих задач в РФ сравнительно недорогих кремниевых ИК-приборов на барьерах Шоттки (в частности, ФППЗ БШ-22М) представляется целесообразным.

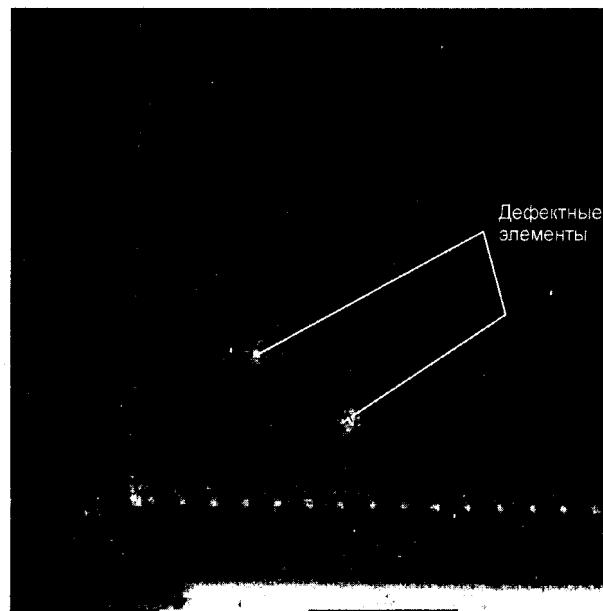


Рис. 4. Изображение матрицы при подаче импульса напряжения на электроды с утечкой при увеличении (1 элемент изображения соответствует 6 мкм в предметной плоскости)

Перспективы разработок

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

Монолитные кремниевые ИК МПИ БШ

Рассмотрим некоторые направления развития монолитных кремниевых ИК МПИ БШ.

- **Число элементов.** По числу элементов в матрице кремниевые ИК МПИ БШ являются "рекордсменами". Сообщалось о разработке матриц диапазонов 3–5 и 8–12 мкм с числом элементов на одном кристалле 512×512, 640×480, 811×508, 1040×1040 [1, 2, 9, 10]. В контексте данной статьи интерес представляют частично реализованные попытки изготовить ИК МПИ БШ еще большего формата путем расположения на одной кремниевой четырех матриц из 811×508 элементов, образующих единую фокальную плоскость без зазоров с общим числом элементов ≈1600×1000 и с размерами 2,9×2,2 см [9]. Известны также работы по изготовлению на одной пластине матричных сборок из 4×4 матриц с числом элементов 640×480 и с минимальным зазором между матрицами [11]. Можно полагать, что в недалеком будущем размеры кристаллов матриц возрастут до 5×5 см, и проблема "больших фокальных сборок" для систем обнаружения, обсуждаемая в литературе уже около 20 лет [12], будет решена либо путем, изложенным выше, либо с использованием так называемой "z-технологии".

- **Пороговая мощность сигнала** на фоточувствительный элемент в диапазоне 3–5 мкм, по-видимому, может быть снижена примерно на порядок при времени накопления 40 мс. Для этого необходимо увеличить квантовую эффективность в два–три раза и снизить выходной шум матрицы. Анализ теоретических и экспериментальных данных физических механизмов, формирующих квантовую эффективность БШ, показал [13], что даже лучшие из полученных величин квантовой эффективности для GeSi/Si БШ в области длинноволнового края внутреннего фотоэффекта оказываются пока в 10–100 раз ниже предельно достижимых для однослоистых барьеров Шоттки. Еще один путь увеличения квантовой эффективности — это переход от однослоистых БШ к многослойным аналогам, в некотором роде "квантовым ямам". Исследования в этом направлении начаты. С другой стороны, в работе [14] 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 приборов с повышенной чувствительностью, по крайней мере, для умеренных фоновых нагрузок. Вместе с тем в матричных приборах, работающих в режиме накопления, есть предельно возможная величина накапливаемого заряда Q_{\max} . Если накапленный заряд от фона достиг или превысил это значение, произойдет насыщение динамического

диапазона прибора и передача сигнала станет невозможной. Поэтому при заданном времени накопления, которое стараются приблизить к времени передачи кадра, решающее значение приобретает не величина квантовой эффективности, а величина рабочего участка динамического диапазона, оставшегося "свободным", иначе говоря, должно соблюдаться условие $Q_b < Q_{\max}$ (Q_b — заряд, накопленный под воздействием фона). При этих условиях параметром сравнения разных фотоприемников оказывается произведение квантовой эффективности на допустимое время накопления ($\eta \tau_{ac}$). Отметим, что это произведение оказывается примерно одинаковым для современных матриц как с большой, так и с низкой η . Поэтому жесткая необходимость увеличения квантовой эффективности без решения проблем снижения фона и увеличения Q_{\max} остается дискуссионной.

• **Увеличение "фактора заполнения", т. е. отношения площади фотодиода Шоттки к площади фоточувствительного элемента (pixel) — еще одна важная проблема ИК МПИ БШ систем обнаружения.** Увеличение этого отношения улучшает пеленгационную характеристику матрицы, т. е. снижает вероятность "пропадания" сигнала точечного изображения при его переходе от одного элемента к другому. В современных монолитных ИК МПИ БШ фактор заполнения составляет от 40 до 60 %, и прогноз его доведения до 90—100 % пессимистичен. На самом деле, важен не фактор заполнения, а возможность сортирования излучения со всей площади элемента и фокусировки его на площадь диода Шоттки (можно назвать это "эффективным фактором заполнения" — ЭФЗ). Для увеличения ЭФЗ до 80—90 % в монолитных ИК МПИ БШ используется микролинзовый растр — создание над каждым элементом матрицы с обратной стороны (как раз с той, с которой производится проектирование изображения) выпуклой линзовой поверхности путем использования двухсторонней фотолитографии и специального процесса ионно-плазменного травления обратной стороны подложки матрицы. Благодаря высокому показателю преломления кремния и с учетом отношения размеров элемента к толщине подложки кривизна поверхности этих микролинз достаточно мала, а требования к качеству весьма умеренные, так как эти микролинзы выполняют роль только концентраторов энергии. Доведение ЭФЗ таким путем до 95—98 % в монолитных ИК МПИ БШ в ближайшие годы представляется реальным.

• **Переход на технологию получения барьеров Шоттки из слоя вырожденный полупроводник/кремний** позволит также разработать типоряд широкоспектральных МПИ БШ на области спектра 1,2—3; 3—5 и 8—12 мкм и, возможно, 6—16 мкм. В последних двух спектральных диапазонах резкое усложнение проблемы фона за-

ставляет по-новому подойти к вопросам конструирования низкофоновых оптических каналов для тепловизионных камер.

- **Возможность обеспечения в ИК МПИ БШ сверхширокой области спектральной чувствительности** (от 1,2 до 12—16 мкм), большого числа элементов в матрице и высокой чувствительности делает перспективным направление по созданию "многоцветных" матриц. В таких матрицах каждый элемент (pixel) может состоять из двух или трех диодов Шоттки, "настроенных" на свой участок спектра, либо путем нанесения локальных микрофильтров, либо путем пространственного разделения падающего излучения с разными длинами волн по этим диодам. Число выходов видеосигналов при этом соответствует числу "цветов".

- **Переход к "большим фокальным плоскостям" $\sim 10 \times 10$ см при широкоугольных объективах** рождает проблему неплоскости фокальной поверхности (чаще всего она становится сферически вогнутой). При этом по краям фокальной поверхности отклонение от плоскости может достигать 0,5 мм, что в два—три раза превышает глубину резкости изображения с учетом показателя преломления подложки. Оценка показывает, что без расфокусировки изображения могут работать плоские матрицы с размерами кристалла $\approx 4 \times 4$ см. Планаризация "большой" фокальной поверхности в определенных пределах достигается введением в объектив корригирующей линзы. Проецирование изображения на матрицу через подложку с большим показателем преломления увеличивает глубину резкости и существенно облегчает задачу коррекции фокальной поверхности. Следующим шагом может стать создание сферической поверхности на обратной стороне кремниевой пластины с матричной сборкой одновременно с изготовлением микролинзового растра.

Криостаты для фотоприемных устройств

Конструкция и параметры криостатов во многом определяют получение оптимальных условий работы матрицы. Уровни фоновых нагрузок в приборах на барьерах Шоттки, величины теплопритоков и охлаждаемых масс являются критически важными требованиями для криостатов. Для ИК МПИ БШ с размерами кристалла 10×10 мм были созданы экспериментальные криостаты ФПУ, обеспечивающие фоновые нагрузки на МПИ БШ до 10^{-6} Вт/см² в области спектра 3—5 мкм и до 10^{-5} Вт/см² — в области 8—12 мкм с уровнем теплопритоков (без джоулева тепловыделения МПИ БШ) до 0,5—0,6 Вт и охлаждаемой массой до 5—8 г. Это позволит реализовать высокую пороговую чувствительность новых одноматричных ФПУ и обеспечит время вхождения в рабочий режим за 3—5 мин.

Вопросы разработки криостатов и систем охлаждения для многоматричных сборок определяются требованиями к конкретным ИК-системам и выходят за рамки данной публикации.

Заключение

Особенности ИК-систем обнаружения "точечных" объектов предъявляют к ИК-приемникам ряд специфических требований, существенно отличающих их от приемников для тепловизионной аппаратуры. Кремниевая технология является единственной возможной для создания большеформатных матричных ИК-приемников, пригодных для работы в системах обнаружения.

Результаты разработок матричных приемников изображения ИК-диапазона спектра на основе барьеров Шоттки в кремнии, выполненные в ОАО «ЦНИИ «Электрон» в последние годы, показали, что с увеличением их формата технология монолитных кремниевых структур является все более предпочтительной, а возможности улучшения чувствительности барьеров Шоттки в МПИ БШ еще далеко не исчерпаны. Реализация этих возможностей зависит в первую очередь от совершенствования конструкции и разработки новых технологий изготовления МПИ БШ, а также и от того, насколько оптика, криостаты ФПУ и электроника ТВК могут оптимизировать рабочие условия для ИК-приемника. Достигнутый уровень и перспективы дальнейшего развития направления монолитных МПИ БШ, рассмотренные в данной работе, свидетельствуют, что с учетом высокого уровня кремниевой технологии и низкой стоимостью ИК МПИ БШ на основе кремния по сравнению с фотоприемниками на базе других материалов сейчас и в ближайшем будущем ИК фотоприемные матрицы этого класса останутся в РФ основой для разработок цифровых тепловизионных камер высокого разрешения, предназначенных для работы с "точечными" объектами.

Л и т е р а т у р а

1. Kimata M., Denda M., Yutani N. et al. A 512×512 element PtSi Schottky-barrier infrared image sensor, ISSCC Digest of Techn. Papers, 1987. P. 110—111.
2. Sarnoff 640×480 IR Imager, David Sarnoff Res./ Center, Solid St. Imaging Technology, Publication Rev., March, 9, 1993.
3. Arutyunov V. A., Ivanov V. G., Prokof'ev A. E. Characteristics of the experimental IR SB CCD camera during outdoor scenes transfer: Proc. SPIE. 1998. V. 3819. P. 85—91.
4. Отчет "Анализ экспериментальных данных испытаний макета тепловизионной системы диапазона 3—5 мкм на матричном фотоприемнике с числом элементов 256×256 по объектам бронетанковой техники": Отчет о НИР/ ОАО «ЦНИИ «Электрон», 2000.
5. Хадсон Р. Инфракрасные системы. — М.: Мир. 1972. С. 378—528; Proc. SPIE, 1999. V. 3698.
6. Арутюнов В. А., Богатыренко Н. Г., Ильинская Е. Ю., Платонова Е. А. Исследование температурных распределений на микрообъектах ИК-системой на основе матрицы ФППЗ БШ 22М// XII Науч.-техн. конф. "Пути развития тепловизионных фотоэлектронных приборов и устройств на их основе": Тез. докл. — Санкт-Петербург, 2001. С. 19.
7. Hierl T., Shreer O., Zettner J. et al. Thermal infrared microscopy (TIM) with sub 10μm spatial resolution// Proc. SPIE. 1999. V. 3698. P. 446—452.
8. Wada H., Nagashima M., Hayashi K. 512×512 element GeSi/Si heterojunction infrared FPA// Ibid. P. 584—595.
9. Shoda M., Akagawa K., Kazama T. A 410 K pixel PtSi Schottky-barrier infrared CCD image sensor// Ibid, 1996. V. 2744. P. 23—32.
10. Akiyama A., Sasaki T., Seto T. et al. 1040×1040 infrared charge sweep device imager with PtSi Schottky-barrier detectors// Opt. Eng., 1994. V. 33. № 1. P. 64—71.
11. Hughes D. Platinum silicide detectors incorporated into new generation of missile seekers// Aw. Week and Space Techn., 1989, March, 27. P. 51.
12. Chan W. S. Focal Plane Architecture: An Overview// Opt. Eng., 1981. V. 20. № 4. P. 574—578.
13. 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.
14. Kozlowski L. Y., Montroy Y., Vural K., Kleinhans W. E. Ultra-low noise infrared focal plane array status// Ibid. V. 3436. P. 162—171.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Perspectives of developments of monolithic cooled infrared focal plane arrays for integrated multispectral warning systems in 1.5—5 and 8—12 μm ranges

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

Consideration is made to state of the art of developments of silicon cooled infrared focal plane arrays with sensing elements on Schottky barriers and photoreceiving devices on their basis. They are made in the 256×256 format on silicide of platinum (1.2—5.5 μm) and silicide of iridium (1.2—10.5 μm), and also as the 512×512 format on silicide of platinum.