

Аналогичного типа проблемы затрагиваются в уже цитируемом ранее докладе Терехова А. С.

Впервые на конференции по фотоэлектронике был представлен цикл докладов по особенностям инновационных процессов в фотоэлектронике и оптико-электронном приборостроении в целом. Все работы были представлены от ФГУП «НПО «Орион» и выполнены под руководством А. М. Филачёва и М. Д. Корнеевой.

Таким образом, обзор докладов, представленных на XIX Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения, свидетельствует о высоком уровне результатов ведущих фирм, и можно утверждать, что приведенные доклады охватывают практически весь круг проблем, стоящих перед этой динамически развивающейся научно-технической отраслью.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Horizons of photoelectronics

A. I. Dirochka, A. M. Filachev

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The basic tendencies of development of photoelectronics and night vision devices (by results of XIX International Scientific and Engineering Conference on Photoelectronis and Night Vision Devices) are analyzed. The most interesting reports are discussed: on thermal imaging devices; on FPA; on ROIS of FPA and about cooling systems; questions of designing of electron-optical systems; science of materials for photoelectronics including organic; the physical phenomena and metrological problems of photoelectronics etc.

УДК 621.383

Фотоприемные устройства для тепловизионной аппаратуры второго поколения

И. Д. Бурлаков, В. П. Пономаренко, А. М. Филачёв

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Е. В. Дегтярев

ФГУП «22 Центральный научно-исследовательский институт Министерства обороны Российской Федерации», Москва, Россия

Рассмотрены этапы и тенденции развития фотоприемных устройств на области спектра 3—5 и 8—12 мкм для применения в оптико-электронной аппаратуре специального и гражданского назначения. Проанализированы схемы построения фотоприемных устройств для работы в режиме временной задержки и накопления (ВЗН). Показаны преимущества концепции построения ВЗН-матриц, в которой аналоговое суммирование фото-сигналов в фокальной плоскости заменено на цифровое суммирование вне фотоприемника в специализированном модуле электронной обработки (МЭО). Приведены характеристики матричных фотоприемных устройств второго поколения как многорядного, так и смотрящего типа, разработанных в ФГУП «НПО "Орион"». Сформулированы требования к основным характеристикам перспективных модульных фотоприемных устройств второго поколения (фотоприемник + блок электронной обработки + система охлаждения) для тепловизионной и тепlopеленгационной аппаратуры.

Стремительное развитие тепловизионной техники, произошедшее во второй половине XX столетия, потребовало кардинального совершенствования технологии инфракрасных (ИК) фотоприем-

ных устройств. Начав с разработки полупроводниковых материалов, fotocувствительных в основных спектральных диапазонах 1—3, 3—5 и 8—14 мкм, таких как халькогениды свинца, антимонид индия,

твердые растворы “кадмий—ртуть—теллур” (КРТ), эти технологии к концу 80-х годов обеспечили создание тепловизионных и тепlopеленгационных приборов, которые теперь относят к первому поколению оптико-электронной аппаратуры. Эта аппаратура базируется на применении многоэлементных, как правило, охлаждаемых фотоприемных устройств с числом элементов от 10 до 200, а для тепlopеленгации из космоса в диапазоне 1—3 мкм число элементов в наборных массивах достигало 3000, расположенных в фокальной плоскости объектива в форме одно- или двухрядной линейки [1, 2]. Были разработаны светосильные, достаточно широкопольные ИК-объективы, в том числе с использованием асферических поверхностей, обеспечивающих минимальное количество линз и приемлемую дисторсию ($\leq 9\%$), а также высокий коэффициент пропускания ($\geq 80\%$) на длине волны 10,6 мкм [3]. Прогресс в создании микрокриогенных систем привел к появлению семейства охлаждающих устройств на базе газовых криогенных машин (ГКМ). Сплит-Стирлинг, дроссельных систем на основе цикла Джоуля-Томсона, охладителей Гиффорда-Мак-Магона, пульсационных труб, систем радиационного охлаждения, обеспечивающих рабочие температуры фоточувствительных элементов от 4,2 до 200 К при холодо-

производительности 0,4—10 Вт, массе 2,3—20 кг и средней наработке на отказ от нескольких тысяч до 25 тыс. ч [4]. Для разложения изображения, проецированного оптической системой в фокальной плоскости, используются оптико-механические развертывающие устройства, осуществляющие последовательное или параллельное сканирование.

В результате был разработан обширный класс оптико-электронной аппаратуры с фотоприемными устройствами линейчатого типа для стрелкового оружия, противотанковых ракетных комплексов, противовоздушной обороны, систем управления огнем бронетанковой техники, вертолетов, средств вождения наземной, авиационной и морской техники и др. [5]. Начавшись с успешной реализации в конце 60-х годов программы FLIR и после завершения программы Common Modules (США), выпуск такой аппаратуры за рубежом стал массовым. Только в США и Европе парк выпущенных тепловизионных приборов превысил 100 тыс. единиц, а затраты на реализацию программы Common Modules только в США составили свыше 2 млрд. дол. Основные этапы развития тепловизионной техники специального назначения показаны на рис. 1. Аналогичные тенденции наблюдались в области гражданского оптико-электронного приборостроения.

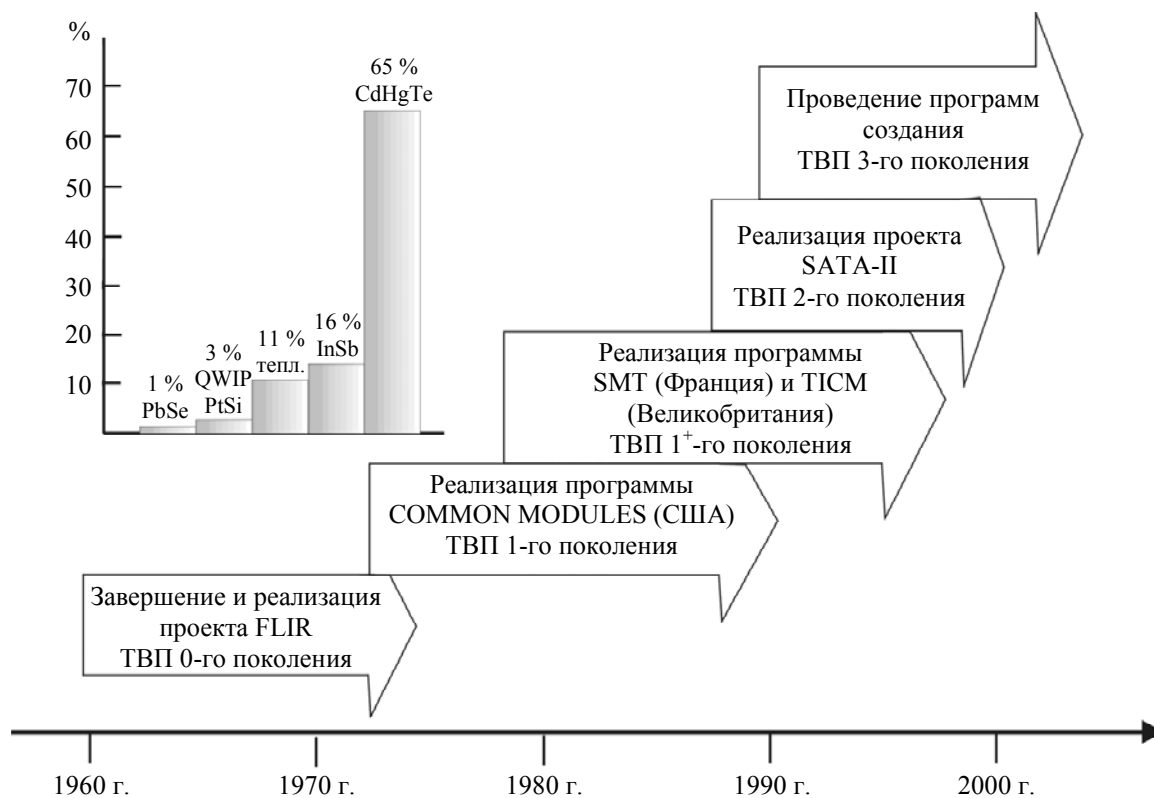


Рис. 1. Основные этапы развития тепловизионной техники специального назначения

Возросшие во второй половине 80-х годов требования к основным характеристикам тепловизионной и тепlopеленгационной аппаратуры поставили задачу создания фотоприемных устройств совершенно нового типа. В этот период основные цели разработки нового поколения ИК-микрофотоэлектроники свелись к двум:

- созданию фотоприемных устройств на области спектра 3—5 и 8—14 мкм для аппаратуры с оптико-механическим сканированием изображения с чувствительностью (обнаружительной способностью), в 1,5—2 раза превышающей уровень, достигнутый в приборах первого поколения;
- созданию фотоприемных устройств для областей спектра 3—5 и 8—14 мкм для применения в оптико-электронной аппаратуре без оптико-механического сканирования (“смотрящий” режим).

Первая цель диктовалась необходимостью увеличения дальности обнаружения нагретых приблизительно до комнатной температуры объектов, вторая — была связана с созданием тепловых головок самонаведения нового типа и другой малогабаритной оптико-электронной аппаратуры, где размещение сканирующих устройств вызывает дополнительные сложности.

Когда для всех фоточувствительных элементов фотоприемного устройства удастся реализовать режим ограничения флуктуациями фонового излучения (BLIP-режим), то теоретический предел чувствительности становится пропорциональным корню квадратному из произведения квантовой эффективности фоточувствительных элементов η и эффективности заполнения фокальной плоскости этими элементами. В современных приемниках квантовая эффективность приближается к значениям $\eta \approx 1$. Поэтому единственно возможным путем повышения чувствительности без ухудшения разрешения является увеличение числа фоточувствительных элементов N в фокальной плоскости.

В приборах первого поколения число N ограничено необходимостью организации индивидуальных электрических выводов от каждого элемента к собственному предусилителю (рис. 2). При $N > 200$ слишком большими становятся теплопритоки, возрастают габаритные размеры и ухудшается надежность прибора. Тем не менее линейчатые фотоприемные устройства первого поколения сыграли и продолжают играть существенную роль в серийном производстве оптико-электронной аппаратуры различного назначения.

Решение проблемы увеличения чувствительности в системах, допускающих оптико-механическую развертку изображения в фокальной плоскости, связывалось вначале с развитием двух технологических направлений:

технологии фотоприемных устройств с внутренним накоплением фотосигналов в самом фото-

чувствительном элементе (ВНС), автором которой, безусловно, считается Элиотт [6];

технологии фотоприемных устройств, в которых реализуется режим временной задержки и накопления фотосигналов (ВЗН) в цепях, внешних по отношению к фоточувствительным элементам [7].

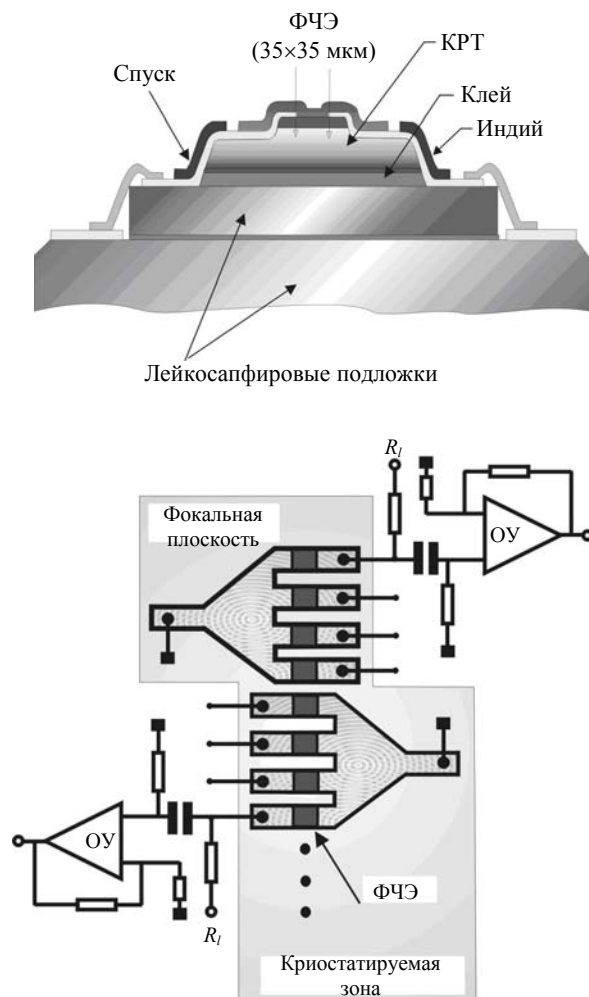


Рис. 2. Структурная схема фотоприемного устройства первого поколения на основе линейки фоторезисторов; ОУ — операционный усилитель; ФЧЭ — фоточувствительный элемент; R_i — сопротивление нагрузки

К концу 80-х годов в НПО "Орион" была разработана технология и созданы образцы 4- и 8-элементных ВНС-фотоприемных устройств (рис. 3) для области спектра 8—14 мкм, а позднее — для области спектра 3—5 мкм. ВНС-элементы выполнялись из CdHgTe n -типа проводимости и обеспечивали обнаружительную способность $D_{\lambda, \max}^* \sim 3 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ в диапазоне 8—14 мкм. Наличие определенных функций обработки фотосигналов непосредственно в фокальной плоскости прибора позволяет фотоприемные устройства с внутренним накоплением, по аналогии с приборами ночного видения, отнести к поколению I⁺.

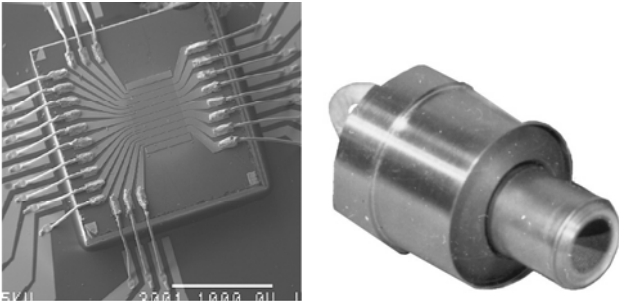


Рис. 3. Фоточувствительный элемент фотоприемника с внутренним накоплением фотосигналов (ВНС) и вакуумный корпус прибора (поколение I⁺)

В Великобритании на основе таких фотоприемных устройств, получивших название SPRITE, была создана многочисленная оптико-электронная аппаратура для авиации, сухопутных войск и т. п. В отечественных разработках приборы с внутренним накоплением фотосигналов большого распространения не получили.

Следует отметить, что при работе элементов с внутренним накоплением необходимы достаточно большие токи смещения, что приводит к значительным тепловыделениям и к большой нагрузке на систему охлаждения. Кроме того, обязательное использование высокоскоростных сканеров ($\geq 2 \cdot 10^4$ см/с) и материала n -CdHgTe с большим временем жизни ($> 2 \cdot 10^{-6}$ с), а также строгие требования к геометрии элементов ограничили применение таких фотоприемных устройств.

В фотоприемном устройстве режима временной задержки и накопления фотосигналов необходим приемник с числом элементов в направлении сканирования не менее двух ($N \geq 2$). Если задержка считывания элементов согласована со скоростью сканирования, то сигнал, который генерируется излучением от одной и той же точки изображения, можно суммировать. Для этого требуется, чтобы время задержки считывания сигнала совпадало с временем прохождения точки изображения от центра одного фоточувствительного элемента до центра другого. Тогда сигнал от точки изображения на выходе “идеального” канала ВЗН возрастет в N раз по сравнению с его значением для отдельного фоточувствительного элемента, а шум, складываясь некоррелированно, возрастает только в \sqrt{N} раз. В результате отношение сигнал/шум увеличивается в \sqrt{N} раз по сравнению с его значением для отдельного фоточувствительного элемента. Кроме того, в матричном фотоприемнике формата $N \times M$ (M — число элементов строки в направлении, перпендикулярном направлению сканирования) происходит также значительное уменьшение разброса чувствительности ВЗН-каналов по сравнению с разбросом в самих элементах. Повышение однородности параметров чув-

ствительности обуславливает заметное повышение выхода годных приборов в предположении гауссовского распределения разброса обнаружительной способности фоточувствительных элементов, когда вероятность $W(D_{TZ}^*)$ изготовления элемента с $D^* \geq D_{TZ}^*$ описывается соотношением

$$W(D_{TZ}^*) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{\frac{D_{TZ}^* - D_0^*}{\Delta}}^{\infty} dx e^{-\frac{x^2}{2}},$$

где D_0^* — среднее по всем элементам значение обнаружительной способности;

Δ — среднеквадратичное отклонение этого параметра.

Для ВЗН-приемников форматов 1×32 , 2×32 и 4×32 элементов были получены [8] значения $W(D_0^* - \Delta)$, показанные на рис. 4. Здесь же показано, как ведет себя зависимость $W(D_0^* - \Delta)$ для приемников форматов 1×64 и 4×64 элементов. Видно, что вероятность изготовления линейчатого приемника формата $1 \times M$ с заданной D_{TZ}^* существенно меньше вероятности изготовления матрицы с числом элементов $N \times M$.

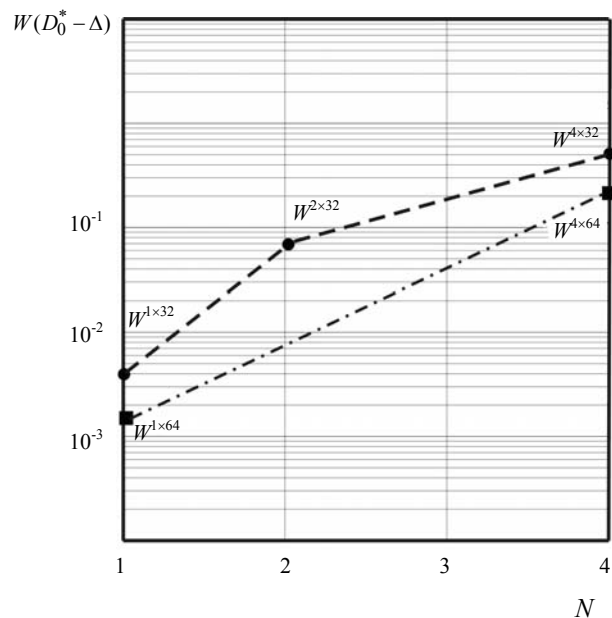


Рис. 4. Зависимости вероятности получения ВЗН-матриц нескольких форматов от числа элементов накопления в предположении гауссовского распределения разброса обнаружительной способности фоточувствительных элементов (годными считаются элементы с $D^* \geq (D_0^* - \Delta)$)

Наиболее просто осуществить режим ВЗН с помощью ПЗС-регистра, так как он по своей сути представляет собой дискретную аналоговую ли-

нию задержки. При синхронизации тактовой частоты считывающего ПЗС-регистра с частотой сканирования можно получить когерентное сложение фотосигналов. Первые попытки реализации монолитного фото-ПЗС на основе КРТ [9] относятся к началу 80-х годов (рис. 5, а). Однако недостаточно отработанная для узкозонных полупроводников МДП-технология не обеспечивала необходимой эффективности переноса накопленного заряда в приповерхностных слоях ВЗН-регистра, что приводило к деградации изображения даже при однородном фоновом излучении. Кроме того, при сравнительно небольших емкостях ПЗС-ячеек накопления большое фоновое излучение, характерное для тепловизионных применений в области длин волн 8—14 мкм, быстро приводило к насыщению ПЗС-регистра в направлении ВЗН-сканирования. Поэтому несмотря на значительное число работ в этом направлении, массовой практической реализации фото-ПЗС на КРТ не получили.

В другом методе применения ПЗС в режиме ВЗН фотосигналы с ИК-фотодиодов из КРТ подаются в обычный кремниевый сдвиговый ПЗС-регистр, где осуществляются интегрирование фототока от отдельных фотодиодов, сдвиг накопленных зарядов и суммирование с зарядом следующего фоточувствительного элемента (см. рис. 5, б).

Здесь не требуется создания ПЗС из материала, чувствительного к ИК-излучению. После суммирования зарядов от N элементов в заданном столбце сигналы передаются на мультиплексоры 1 и 2, которые выводят их на несколько выводов. Типичная частота выдачи сигналов для матрицы формата 4×288 элементов при формировании кадра формата 576×768 с частотой 25 Гц составляет 4 МГц, а число сигнальных выводов с мультиплексоров равно 4.

Такая схема построения ВЗН-матриц, в основе которой лежит использование аналоговых линий задержки и суммирования фотосигналов в охлаждаемой фокальной плоскости, достаточно широко используется при производстве приборов [10]. Главное достоинство таких схем организации – полная реализация режима ВЗН непосредственно в фотоприемнике, что упрощает конструирование аппаратуры, особенно на первых порах освоения нового поколения элементной базы фотоэлектроники. К недостаткам можно отнести усложнение охлаждаемой микроэлектроники считывания; необходимость введения в ее состав предварительно программируемых схем деселекции дефектных элементов; ограниченный динамический диапазон аналоговых схем задержки и суммирования; их заметная нелинейность.

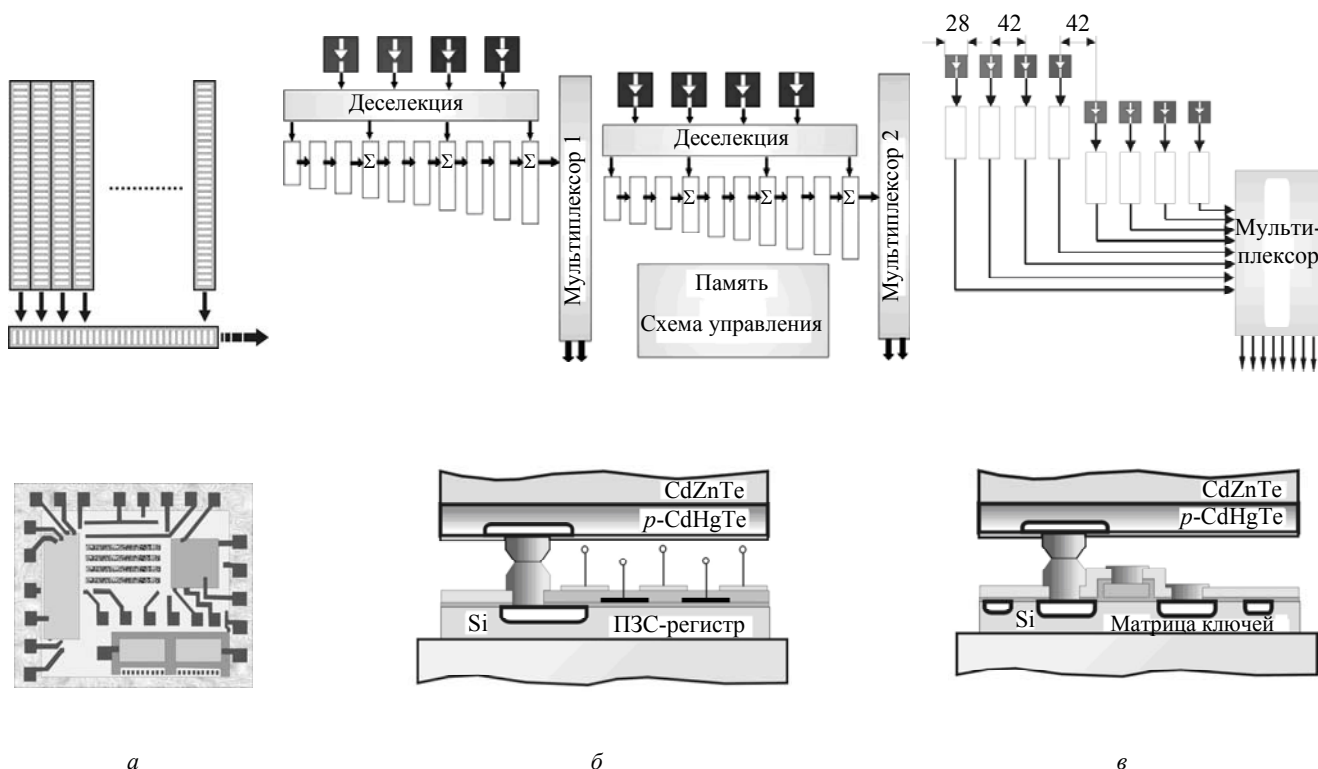


Рис. 5. Различные схемы организации ВЗН-матриц из КРТ:

а — монолитный фото-ПЗС на КРТ, 1980; б — гибридный МФПУ со схемой вывода фотосигналов на основе Si-ПЗС; в — гибридный МФПУ со схемой вывода фотосигналов на основе Si-матрицы транзисторных ключей и МОП-емкостей

Вместо сдвиговых ПЗС-регистров могут применяться комбинированные схемы, состоящие из линеек МОП-емкостей накопления и транзисторных ячеек, осуществляющих сдвиговую передачу зарядов от одной емкости к другой в направлении сканирования изображения. Они технологически проще, так как не требуют применения ПЗС-технологии, и используются при производстве матричных приборов.

Нами была выбрана другая концепция построения ВЗН-матриц, в основе которой аналоговое суммирование фотосигналов в фокальной плоскости заменено на цифровое суммирование вне фотоприемника в специализированном модуле электронной обработки (МЭО). Для интегрирования и временной задержки фотосигналов, синхронизованной со скоростью сканирования, используются *n*-МОП интегральные микросхемы на основе полевых транзисторов с прямой инжекцией сигнального заряда (см. рис. 5, в).

Преимущества ВЗН-матриц: увеличенный динамический диапазон; возможность работы с более светосильной оптикой; меньшая разрядность аналого-цифровых преобразователей; возможность работы с различными типами сканирования без изменения схмотехники путем простого перепрограммирования ПЛИС в модуле электронной обработки; уменьшенное расстояние между группами линеек (за счет исключения мультиплексора 1 на рис. 5, б); пониженные требования к разрешению фотолитографических процессов; более высокая стойкость *n*-МОП СБИС к спецвоздействиям.

Недостатки ВЗН-матриц: число сигнальных выводов из холодной зоны и, соответственно, число параллельно работающих АЦП в МЭО возрастает пропорционально числу линеек в ВЗН-матрице. Для приемника формата 4×288 элементов это число равно 8, а частота выдачи сигналов при формировании кадра 576×768 с частотой 50 Гц составляет 8 МГц. При этом схемы, осуществляющие деселекцию дефектных элементов, выводятся из фокальной плоскости и передаются модулю электронной обработки, расположенному вне фотоприемника. Кроме того, МЭО осуществляет аналого-цифровое преобразование, вычитание обусловленной фоновым излучением постоянной составляющей фотосигналов, компенсацию разброса вольтовой чувствительности элементов посредством двухточечной коррекции; обеспечивает функции временной задержки, суммирование фотосигналов в цифровой форме, пространственное совмещение четных и нечетных строк при их «шахматном» расположении, «сшивку» зон сканирования и др. Типичный внешний вид МЭО показан на рис. 6.

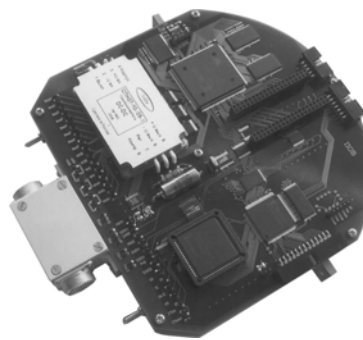


Рис. 6. Модуль электронной обработки фотосигналов

В настоящее время в НПО «Орион» разработан ряд фотоприемных устройств на основе ВЗН-матриц из КРТ, содержащих, помимо фотоприемника в вакуумной конструкции, газокриогенную систему охлаждения и модуль электронной обработки фотосигналов. Такие комплексы получили название фотоэлектронных модулей (ФЭМ).

Число элементов ФЭМ 2×96 (4×48), 2×256 (4×128), 6×480, что обеспечивает режим ВЗН с накоплением по 2-м, 4-м или 6 элементам. Топология приборов формата 4×288 и 6×480 показана на рис. 7. Она определялась исходя из качества оптической системы, обеспечивающей диаметр пятна рассеяния порядка 25—30 мкм, необходимости минимизации фотоэлектрической взаимосвязи между элементами, а также шага сканирования, который требуется для получения кадра телевизионного формата при заданной длине линейки.

При изготовлении фотодиодных матриц нами используются в основном эпитаксиальные слои *p*-КРТ с концентрацией дырок $p \sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ (77 К), полученные методом жидкофазной эпитаксии на подложках из CdZnTe (разработчик — ФГУП «Гиредмет»). Здесь были получены наиболее высокие фотоэлектрические параметры МФПУ. Главный недостаток образцов материала — отклонения от плоскостности, затрудняющие стыковку с кремниевыми микросхемами, особенно для крупноформатных матриц.

Из образцов КРТ, полученных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках из GaAs с буферным слоем из CdZnTe (разработчик — ИФП СО РАН), также изготовлены действующие приборы. Их главный недостаток — наличие *V*-дефектов, а достоинство — более высокая плоскостность поверхности, делающая такой материал особенно перспективным при изготовлении матриц большого формата.

Достаточно перспективной выглядит и технология МОС КРТ, разрабатываемая Институтом химии высокочистых веществ РАН, с использованием которой были получены матричные ФПУ на область спектра 3—5 мкм.

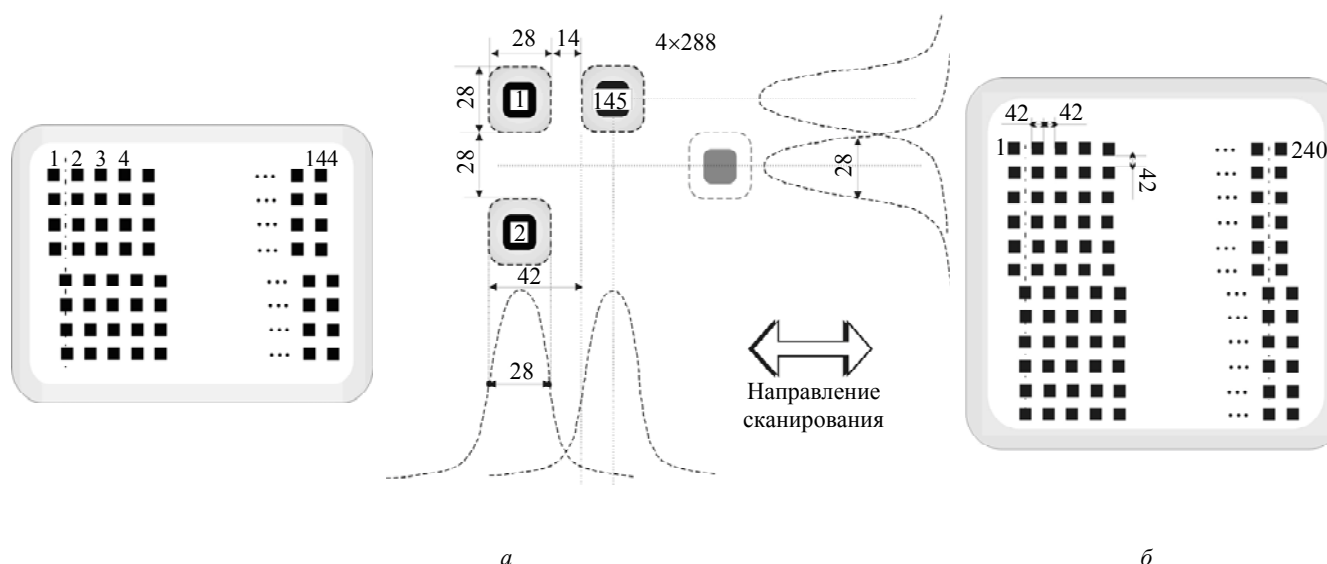


Рис. 7. Топология ВЗН-матриц из КРТ:
a — ВЗН-матрица формата 4 × 288; *б* — ВЗН-матрица формата 6 × 480

В целом проблема эпитаксиальных материалов для второго поколения приборов фотоэлектроники остается достаточно острой, особенно в части получения многослойных структур (типа *p-n-p...*), необходимых для разработки многоспектральных приборов, подложечного материала большого диаметра, однородности и плоскостности слоев.

В соответствии с вышесказанным кремниевые микросхемы считывания создавались на пластинах кремния по технологии МОП или КМОП, что обеспечило более высокую по сравнению с ПЗС емкость накопления МОП-конденсаторов, более низкие управляющие напряжения, большой дина-

мический диапазон. Ввод тока в схеме считывания осуществляется по методу прямой инжекции, при этом коэффициент передачи тока в накопительные МОП-элементы достигает 0,95, а дополнительные шумы минимальны. В мультиплексорах используются 2-фазные динамические регистры сдвига. Объединение микросхем кремниевых мультиплексоров с фотодиодными матрицами осуществляется методом flip-chip с применением столбчатых микроконтактов из индия.

Внешний вид матричных фоточувствительных элементов для сканирующих систем из CdHgTe, PbSe и PbS показан в верхней части рис. 8.



Рис. 8. Фоточувствительные элементы матричных ФПУ

По аналогичной технологии в НПО "Орион" разработан ряд матричных ФПУ из КРТ и антимионида индия для "смотрящих" систем без оптико-механического сканирования изображения, показанных в нижней части рис. 8. Число элементов 128×128 , 256×256 , 384×288 (CdHgTe, InSb), 768×576 (CdHgTe, наборная из четырех блоков формата 384×288). Шаг элементов регулярный – от 28 до 35 мкм.

Кремниевые микросхемы считывания для приемников из халькогенидов свинца имеют свои особенности, хотя в целом для высокоомных фоторезисторов они имеют ту же структуру, что и для фотодиодов из КРТ или антимионида индия. Для каждой из двух 128-элементных линеек из PbSe или PbS создавался 128-канальный КМОП-мультиплексор с входными устройствами, содержащими трансимпедансные усилители и дискретно-аналоговые фильтры верхних частот на переключаемых конденсаторах для компенсации темновых токов.

Объединение фоторезисторных матриц и кремниевых микросхем по аналогии с приборами из КРТ или антимионида индия осуществляется через промежуточный растр методом "flip-chip" с применением микроконтактов из индия. В приемниках из сульфида и селенида свинца, изготовленных по такой технологии, значительная часть функций предварительной обработки фотосигналов впервые сосредоточена в фокальной плоскости. Это позволяет отнести их к приборам второго поколения.

Таким образом, к настоящему времени в НПО "Орион" разработана технология и изготовлены матричные приемники второго поколения для ос-

новных спектральных диапазонов, соответствующих трем окнам прозрачности земной атмосферы (рис. 9).

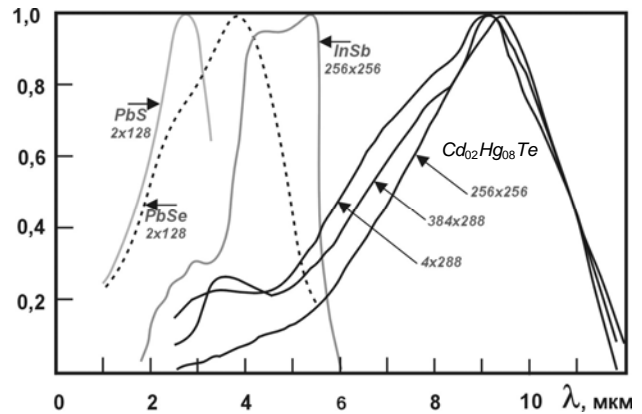


Рис. 9. Характеристики спектральной чувствительности МФПУ второго поколения

Для криостатирования гибридных матриц разработаны вакуумные конструкции, обеспечивающие стыковку с микрокриогенными системами охлаждения на основе дифференциальных газокриогенных машин, работающих по циклу Стирлинга (ООО НТК "Криогенная техника"). Собственные теплопритоки конструкции не превышают 0,4 Вт. Точность поддержания рабочей температуры в зоне ФЧЭ не хуже 0,1 К. Ряд таких конструкций вместе с МКС приведен на рис. 10.

Основные параметры разработанных МФПУ и последние результаты исследования образцов, находящихся в стадии разработки, представлены в табл. 1 и 2.

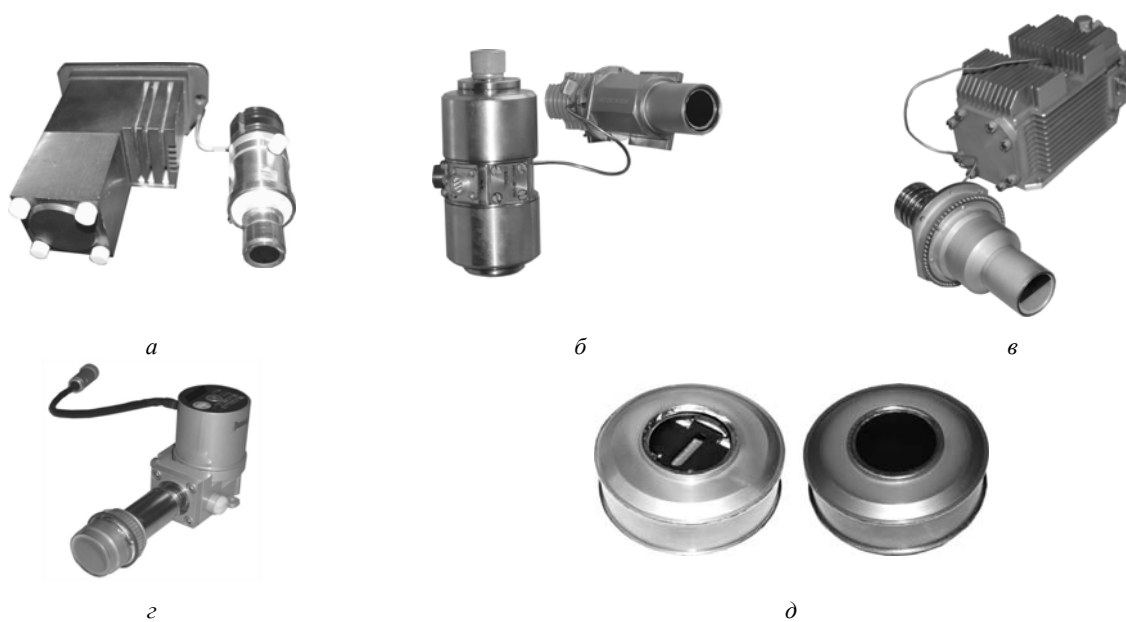


Рис. 10. Вакуумные конструкции МФПУ второго поколения с системами охлаждения: а — МФПУ из CdHgTe формата 2×256 ; б — МФПУ из CdHgTe формата 4×288 и 384×288 ; в — МФПУ из CdHgTe формата 768×576 ; г — МФПУ из CdHgTe и InSb формата 256×256 ; д — МФПУ из PbSe и PbS формата 2×128

Таблица 1

Матрицы для сканирующих систем

Показатели	Формат, материал					
	2×96, КРТ	2×256, КРТ	4×288, КРТ	6×480, КРТ	2×128, PbSe	2×128, PbS
Длинноволновая граница, мкм	$\lambda_{0,1} \geq 10,5$	$\lambda_{0,5} \geq 10,3$	$\lambda_{0,5} \geq 10,3$	$\lambda_{0,5} \geq 10,3$	$\lambda_{0,1} \geq 5,5$	$\lambda_{0,1} \geq 3,5$
Шаг каналов, мкм	30	35	28	42	40	40
$D_{\lambda \max}^*$, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	$\geq 5 \cdot 10^{10}$ FOV>60°	$\geq 5 \cdot 10^{10}$ FOV>60°	$\geq 1 \cdot 10^{11}$ FOV>60°	$\geq 1,2 \cdot 10^{11}$ FOV>60°	$\geq 4 \cdot 10^{10}$	$\geq 3 \cdot 10^{11}$
Вольтовая чувствительность S_u , В/Вт	$\geq 3 \cdot 10^7$	$\geq 3 \cdot 10^7$	$\geq 2 \cdot 10^7$	$\geq 4 \cdot 10^7$	$\geq 5 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^8$
Дисперсия S_u , %	<20	<30	<30	<30	<20	<20
Число “дефектных” каналов	≤ 2	≤ 15	≤ 15	≤ 15	≤ 5	≤ 5
Система охлаждения	Дроссель либо Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1$ Вт	Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1$ Вт	Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1$ Вт	Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1,5$ Вт	ТЭО (200 К), $Q_x = 0,1$ Вт	ТЭО (200 К), $Q_x = 0,1$ Вт
Масса МФПУ с МКС, г	3000	3000	3000	6000	150	150
Группа исполнения	6 В	3.2.3	1.6.3; 3.1.5; 3.3.1			

Таблица 2

Матрицы для “смотрящих” систем

Показатели	Формат, материал				
	128×128, КРТ	256×256, КРТ	384×288, КРТ	768×576, КРТ	128×128, 256×256, InSb
Длинноволновая граница, мкм	$\lambda_{0,5} \geq 10,3$	$\lambda_{0,5} \geq 10,3$	$\lambda_{0,1} \geq 10,5$	$\lambda_{0,5} \geq 10,3$	$\lambda_{0,5} \geq 5,5$
Шаг каналов, мкм	35	30	28	30	35
$D_{\lambda \max}^*$, см·Гц ^{1/2} ·Вт ⁻¹	$\geq 4 \cdot 10^{10}$ FOV>40°	$\geq 4 \cdot 10^{10}$ FOV>60°	—	—	$\geq 1 \cdot 10^{11}$ FOV>60°
Пороговая мощность, Вт/см ²	—	—	$\leq 3 \cdot 10^{-6}$ FOV>60°	$\leq 3 \cdot 10^{-6}$ FOV>60°	—
Вольтовая чувствительность S_u , В/Вт	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^7$	$\geq 1 \cdot 10^8$
Дисперсия S_u , %	<20	<30	<20	<30	<30
Число “дефектных” каналов	≤ 3	≤ 5	≤ 5	≤ 5	≤ 3
Система охлаждения	Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1$ Вт	Интегральный Стирлинг типа K508, $Q_x = 0,5$ Вт	Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1$ Вт	Сплит- Стирлинг, $Q_x = 1,5$ Вт	Интегральный Стирлинг типа K508, $Q_x = 0,5$ Вт
Масса МФПУ с МКС, г	3000	600	3000	6000	600
Группа исполнения	—	4.1.1	1.6.3, 3.1.5, 3.3.1	—	4.1.1

По вольтовой чувствительности S_u , среднему значению обнаружительной способности $D_{\lambda \max}^*$ или пороговой мощности P_b , они полностью удовлетворяют требованиям ТЗ и в основном соответствуют параметрам зарубежных производителей. В настоящее время эта технология проходит внедрение на участках промышленного выпуска приборов второго поколения, создание которых завершается в НПО "Орион". Один из недостатков, присущих МФПУ из КРТ, — заметный разброс вольтовой чувствительности S_u (~ 20—30 %). Это в основном связано с качеством эпитаксиальных слоев КРТ. Другой проблемой является качество МКС. По среднему времени наработки они пока серьезно уступают зарубежному уровню. Кроме

того, отсутствуют отечественные газокриогенные системы охлаждения в интегральном исполнении.

Требования, предъявляемые к перспективным ФПУ для нового поколения тепловизионной и тепlopеленгационной аппаратуры

Как видно из рис. 1, в последние годы темпы развития тепловизионной техники и смена поколений приборов заметно ускорились. Это связано прежде всего с наступлением информационной эпохи в развитии техники, высокой эффективностью применения ИК-аппаратуры при решении боевых задач различного уровня, завершением

разработок ряда базовых технологий микрофотоэлектроники, полупроводникового материаловедения, микрокриогеники и др., значительными капиталовложениями развитых государств в отрасль инфракрасного приборостроения. Тем не менее оптоэлектроника по-прежнему остается достаточно “капиталоемким” направлением, требующим заметных капиталовложений, особенно на техническое перевооружение производств при переходе к новым поколениям приборов. Это требует особой тщательности при оценке возможных перспектив развития элементной базы, выработке долгосрочной стратегии, тесной кооперации предприятий — участников разработок. Стремление отечественных разработчиков специальной техники не отстать от мирового уровня, сохранить конкурентоспособность разрабатываемых образцов в условиях ограниченного финансирования пока приводят лишь к закупкам отдельных образцов за рубежом или к бессистемным попыткам их воспроизведения на отечественных предприятиях. Этому в немалой степени способствует и отсутствие целевой программы развития опто- и фотоэлектроники, как и оптики в целом.

Учитывая предыдущие результаты такого анализа и технологические возможности отечественных производств, мы совместно с 22ЦНИИ МО сделали попытку свести требования к МФПУ второго поколения к ограниченному числу типов, представленных на рис. 11.

Реализация в предшествующие годы целевой программы “Инфравид” позволила в значительной степени систематизировать подходы к созданию опτικο-электронной аппаратуры (ОЭА) и разработать “Общие технические требования” (ОТТ) к аппаратуре, построенной по модульному принципу.

В соответствии с ОТТ вся ОЭА может быть отнесена к одному из пяти основных классов (см. рис. 11). Кроме того, существует класс ОЭА, связанный с решением задач сверхдальней тепловизионной “горячих” (1—3 мкм) объектов с высокоэллиптических или геостационарных орбит в космосе.

Сформировать требования к основным характеристикам модульных фотоприемных устройств второго поколения (фотоприемник + блок электронной обработки + система охлаждения) можно путем объединения требований к ТТХ перспективной ОЭА и требований стандартов, накладываемых на компонентную базу для специальных применений. Последние в обобщенном виде представлены на рис. 11. Одним из основных требований к функциональным параметрам и характеристикам ОЭА является критерий дальности (L_{KM}), другим — ограничение по массе (M_{KG}). Результаты такого анализа после пересчета ТТХ в технические параметры модульных ФПУ второго поколения позволяют описать параметрический ряд модульных ФПУ применительно ко всем пяти классам ОЭА.

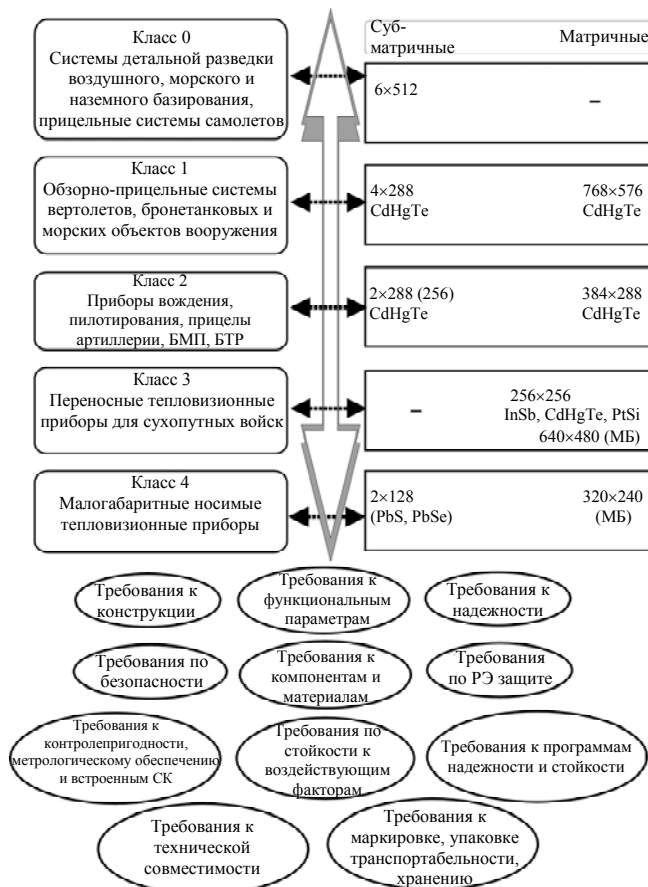


Рис. 11. Параметрический ряд модульных МФПУ второго поколения

Как видно из рис. 11, параметрический ряд базируется на трех основных форматах приемников из CdHgTe с режимом ВЗН (2×288(256), 4×288, 6×576 элементов) и трех основных форматах приемников для “смотрящей” аппаратуры (256×256, 384×288, 768×576 элементов).

Для аппаратуры ограниченного применения, в том числе с использованием приемников из халькогенидов свинца (PbS, PbSe), силицида платины и антимонида индия (PtSi, InSb) и микроболометров (МБ) в указанный параметрический ряд должны быть включены форматы 2×128, 320×240 и 640×480 элементов.

К аппаратуре ограниченного применения относятся и ОЭА для дальней тепlopеленгации из космоса. Фотоэлектроника с использованием ФПУ первого поколения с числом элементов 2×6×256 на основе фоторезисторов из PbS на область спектра 1—3 мкм в предшествующие годы успешно решила поставленные задачи по обнаружению на активном участке движения заданных типов объектов, проведению траекторных измерений и др.

Современные требования, предъявляемые к ОЭА, выдвигают, по крайней мере, три новые задачи:

расширение номенклатуры обнаруживаемых объектов;

увеличение информационной производительности;

одновременное повышение помехозащищенности.

Повышение вероятности принятия правильного решения об обнаружении и классификации целей, особенно в присутствии ложных помех, достигается при регистрации аппаратурой излучения одновременно в 2- или 3-спектральных диапазонах. Анализ требований к такой аппаратуре позволяет свести фотоприемные устройства для нее к нескольким основным типам.

Основу здесь составляют субматрицы с режимом ВЗН на область спектра вблизи 4,2—4,4 мкм с числом элементов в блоке 8×256, на основе которых предполагается проводить сборку ФПУ с

общим числом блоков от 11 до 14 для широкопольной аппаратуры (21°×21°) и матрицы формата 384×288 элементов — на ту же область спектра для узкопольной аппаратуры (1,6°×2°). Использование уже разработанных объективов и комбинация таких ФПУ с фотоприемными устройствами формата 2×128 на область спектра 1—3 мкм дают возможность решить задачу создания аппаратуры обнаружения для высокоэллиптических, геостационарных космических аппаратов, в том числе широкопольной и многоспектральной.

Таким образом, в ФГУП «НПО “Орион”» разработаны МФПУ второго поколения как многорядного типа (2×96, 2×128, 2×256, 4×288, 6×480 элементов), так и для “смотрящих” типов (128×128, 256×256, 384×288, 768×576 элементов). Основные параметры разработанных МФПУ соответствуют параметрам зарубежных МФПУ.

Литература

1. Пономаренко В. П., Филачев А. М. Инфракрасная техника и электронная оптика. Становление научных направлений (1946—2006). — М.: Физматкнига, 2006.
2. Biberman L. M. (Editor) Electro-Optical Imaging: System Performance and Modeling. — Bellingham, Washington USA: SPIE Press, 2000.
3. Иванов В. П., Бугаенко А. Г., Лукин А. В., Мельников А. Н., Морозов А. Е. // Прикладная физика. 2005. № 2. С. 91—93.
4. Громов А. В., Ермаков В. М., Карапузов В. И., Литин М. В., Ляпин В. И. // Там же. С. 79—82.
5. Ivanov V. P., Belozherov A. F. // Proc. SPIE. 2001. V. 4369. P. 58—80.
6. Elliot C. T. // Electronic Lett. 1981. V. 17. P. 312—313.
7. Куеса Р. Дж. Фотоприемники видимого- и ИК-диапазонов. — М.: Радио и связь, 1985.
8. Roberts C. G., Borrello S. R., Chapman R. A. // Proc. SPIE. 1980. V. 217. P. 34—41.
9. Chapman R. A., Borrello S. R., Simmons A., Beck J. D., Lewis A. J., Kinch M. A., Hyenecsek J. and Roberts C. G. // IEEE Trans. Electron Devices. 1980. V. ED-27. P. 134—145.
10. Rogalski A. (Editor) Infrared Photon Detectors. — Optical Engineering Press, Bellingham, 1995.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

Photodetector devices for thermal imaging apparatus of the second generation

I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

E. V. Degtyarev

The 22-nd Central Research Institute of the Defense Ministry of the Russian Federation, Moscow, Russia

Considered are the stages and tendencies of development of the 3—5 and 8—12 μm photodetector devices to be applied in the optoelectronic apparatus of special and civil purposes. The block diagrams of build-up of the photodetector devices for operation in the mode of a time delay and accumulation have been analysed.