

УДК 535.247.049.7 : 621.383.52

**Г. Л. Курышев, А. П. Квчавцев, В. М. Базовкин,  
А. А. Гузев, И. И. Ли, Н. А. Валишева,  
К. О. Постников, А. В. Яковлев, П. В. Журавлев**

*(Новосибирск)*

**ПОРТАТИВНЫЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ТЕПЛОВИЗОР  
НА ОСНОВЕ ФОКАЛЬНОЙ МАТРИЦЫ  
МДП-КОНДЕНСАТОРОВ НА InAs**

Представлена конструкция фотоприемного модуля, состоящего из фокальной InAs-матрицы и малошумящего охлаждаемого процессора. Использование фоточувствительных конденсаторов металл – диэлектрик – полупроводник, работающих в режиме накопления заряда, и оригинальной конструкции малошумящего охлаждаемого кремниевого процессора позволило изготовить тепловизор с температурным разрешением  $< 0,03\text{ }^{\circ}\text{C}$  при частоте 50 кадров/с.

Профессиональные и любительские видеокамеры с использованием кремниевых матричных полупроводниковых фотоприемников за последние 10–15 лет полностью вытеснили применявшиеся ранее вакуумные приемники на основе видиконов. Это произошло благодаря стремительному развитию новых технологий микроэлектроники, улучшению качества полупроводникового кремния, созданию ряда специальных интегральных схем предварительной обработки сигнала на основе микропроцессоров с малым энергопотреблением. В видимом свете мы воспринимаем с помощью зрения или фоточувствительного прибора, как правило, отраженный свет (солнца, луны или искусственных источников света), и только при температуре объекта выше  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  фиксируется его собственное свечение.

Кроме кремния, существует ряд полупроводниковых соединений, чувствительных не только в видимом диапазоне длин волн  $0,4\text{--}0,8\text{ }\mu\text{m}$ , но и в более длинноволновой области спектра вплоть до  $10\text{--}20\text{ }\mu\text{m}$ . Если создать достаточно чувствительный матричный полупроводниковый приемник для инфракрасного диапазона длин волн и превратить считываемый с него сигнал в видимое изображение, то можно визуализировать тепловое излучение объектов без применения каких-либо устройств пространственного сканирования.

В настоящей работе приведено описание конструкции и режимов работы тепловизионного портативного прибора на основе арсенида индия, разработанного в ИФП СО РАН в течение 1996–1997 гг.

**Основные физические принципы работы полупроводниковых приемников инфракрасного излучения.** Существует три основных типа полупроводниковых фотоприемников: фотосопротивления,  $p-n$ -переходы и конденсаторы металл – диэлектрик – полупроводник (МДП), которые обладают сравнимыми возможностями по обнаружительной способности, а достигаемые результаты в приборах зависят от уровня развития микроэлектронных технологий и применяемых конструкторских и схемотехнических решений.

МДП-конденсатор в качестве фоточувствительного элемента обладает рядом преимуществ по сравнению с другими типами приемников. Он работает в режиме внутреннего накопления сигнала. Вывод накопленного заряда производится за короткое время (порядка долей микросекунды), что позволяет реализовать предельно возможную обнаружительную способность в режиме ограничения флуктуациями фона при работе с кремниевым процессором, изготовленным по проектным топологическим нормам 1,5–2,5 мкм, существующим на отечественных предприятиях электронной промышленности.

Несмотря на столь заманчивые преимущества МДП-конденсаторов, для регистрации сигналов инфракрасного диапазона матричные МДП-фотоприемники на InAs не выпускаются, что связано в основном с жесткими технологическими требованиями, предъявляемыми к конденсаторам, и трудностями достижения совершенной границы раздела полупроводник–диэлектрик. Следует отметить, что на основе  $p-n$ -переходов разработка технологий и конструкций матричных ИК-ФПУ была начата рядом отечественных и зарубежных НИИ и фирм с 1973–1975 гг. и степень интеграции  $\sim 10^4 - 10^5$  достигнута спустя двадцать лет в 1993–1995 гг. [1, 2].

В ИФП СО РАН накоплен большой опыт по исследованию поверхностных явлений в кремниевых МДП-конденсаторах, который позволил быстро получить в 1978–1980 гг. линейчатые фотоприемные структуры  $1 \times 32$  с достаточно высокими электрофизическими и фотоэлектрическими параметрами. Технология матричных ФПУ потребовала решения ряда принципиальных задач, не столь актуальных для малоэлементных приемников, – получение однородных по параметрам конденсаторов на большой площади и с малой пористостью диэлектрика ( $< 10$  пор./см<sup>2</sup>) с высокой механической прочностью, позволяющей осуществлять холодную сварку давлением на площади до  $1-2$  см<sup>2</sup> при толщине диэлектрика  $\sim 0,1$  мкм. В 1994–1997 гг. эти задачи нами были успешно решены.

На рис. 1 показана конструкция гибридного матричного фотоприемного модуля на арсениде индия.

ИК-излучение проходит сквозь сильнолегированную подложку  $n^+$ -InAs за счет сдвига края фундаментального поглощения InAs (эффект Мосса – Бурштейна) с 3,05 (эпитаксиальный слой  $\nu$ -InAs) до 2,8 мкм ( $n^+$ -InAs) и поглощается в тонком эпитаксиальном слое InAs, выращенном методом газотранспортной эпитаксии на подложках  $n^+$ -InAs. Таким образом, сама матрица является узкополосным фильтром. На внешнюю сторону  $n^+$ -InAs подложки напыляется антиотражающее диэлектрическое покрытие. Малая толщина эпитаксиального слоя и диффузионной длины в InAs (5 мкм) обеспечивает хорошую оптическую развязку элементов. При засветке

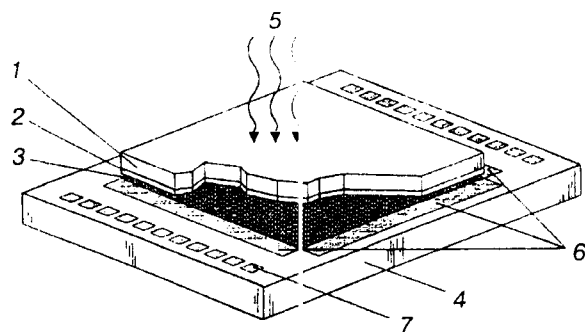


Рис. 1. Модуль фотоприемного устройства, состоящий из матрицы фоточувствительных InAs МДП-конденсаторов и кремниевого мультиплексора считывания сигналов, соединенных между собой индиевыми микроконтактами:

1 – сильнолегированная подложка InAs ( $N_d = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ); 2 – фоточувствительный эпитаксиальный слой InAs толщиной 5–10 мкм ( $N_d = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ); 3 – индиевые микроконтакты; 4 – кремниевый мультиплексор; 5 – падающий поток ИК-излучения; 6 – вертикальный и горизонтальный сдвиговые регистры мультиплексора; 7 – выходные контактные площадки мультиплексора

ячейки световым пятном инфракрасного диапазона диаметром 27 мкм в спектральной полосе 2,85–3,05 мкм величина сигнала на соседнем элементе не превышает 2 % амплитудного значения. Инерционность фотоотклика с элементов матрицы на частотах до 200 кадров/с не наблюдалась.

Технические параметры матричного ФПУ: размерность матрицы 128×128; размеры элемента 40×40 мкм; шаг (по X и Y) 50 мкм; спектральный диапазон 2,85–3,05 мкм;  $D^* \approx 4 \cdot 10^{11} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}$ ; динамический диапазон больше 1000.

**Кремниевые процессоры для считывания фотосигналов с матрицы МДП-конденсаторов.** Кремниевые процессоры предназначены для работы с матрицами фотоприемных элементов. Они обеспечивают считывание сигналов, зарядовое усиление и последовательный вывод сигналов с элементов на один или два выхода. Процессоры допускают присутствие пробитых МДП-фотоприемников. Кремниевые процессоры изготовлены по *n*-канальной технологии с двумя уровнями поликремниевых затворов. В процессе изготовления используется до восьми фотолитографий. Напряжение питания всех типов мультиплексоров однополярное (12 В).

*Процессор Ф-401.* Принципиальная схема кремниевого процессора, предназначенного для работы с InAs-матрицей МДП-конденсаторов, приведена на рис. 2. Кремниевый процессор является дальнейшим развитием процессора, описанного в [3], содержит матрицу 130×130 входных устройств, состоящих из разделительной емкости  $C_{ин}$  и МДП-транзистора, сток которого соединен со столбцовой шиной считывания. Столбцовые шины считывания подключены к зарядовым усилителям, вертикальный сдвиговый регистр обеспечивает последовательное считывание фотосигналов строк, а горизонтальный сдвиговый регистр – последовательный вывод сигналов строки на общий выход. Процессор также обеспечивает возможность регулирования времени накопления фотосигналов на МДП-фотоприемниках с дискретностью, равной времени считывания двух строк [3, 4].

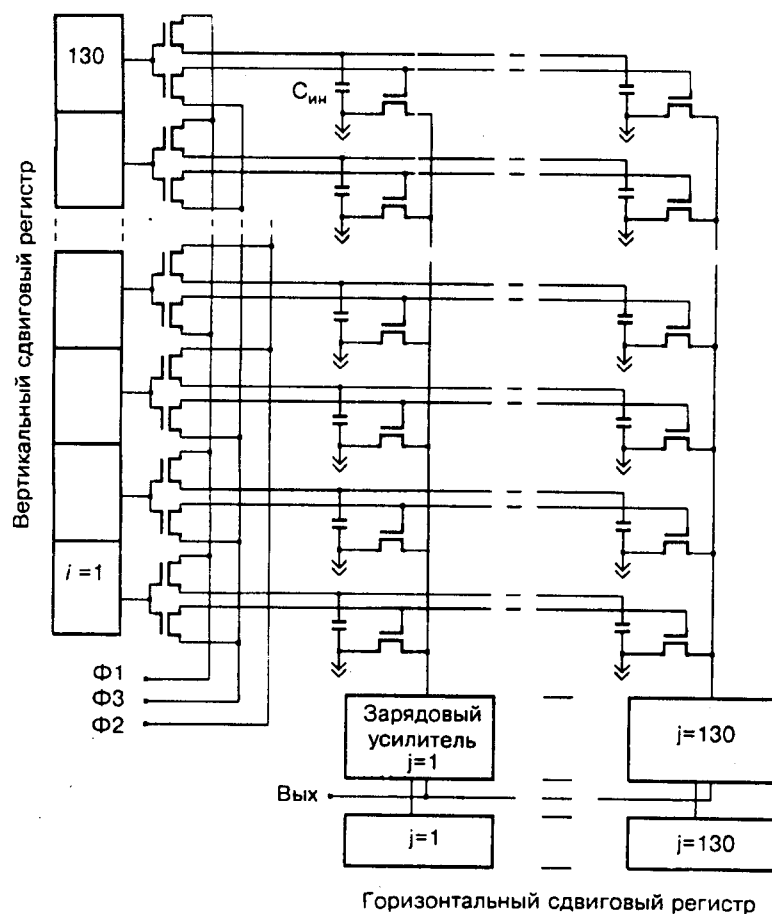


Рис. 2. Кремниевый процессор для матричных модулей на основе конденсаторов металл-диэлектрик – полупроводник

Основные параметры кремниевого процессора Ф-401: число входных контактных площадок  $130 \times 130$  шт.; максимальная емкость накопительной ячейки  $1,2 \cdot 10^7$  электронов; шум меньше 600 электронов; число управляющих импульсов 13; тактовая частота 4 МГц; число информационных выходов 1; размеры кристалла  $8,5 \times 9$  мм; шаг входных контактных площадок 50 мкм; максимальная амплитуда сигнала на выходе 5 В.

Процессор Ф-402 является перспективной разработкой и предназначен для работы с InAs-матрицей МДП-конденсаторов размерностью  $256 \times 256$  элементов. По организации мультиплексор близок к мультиплексору Ф-401, но в отличие от последнего имеет две независимые линейки зарядовых усилителей и соответственно два сигнальных выхода.

Основные параметры кремниевого процессора Ф-402: число входных контактных площадок  $256 \times 256$  шт.; максимальная емкость накопительной ячейки  $1 \cdot 10^7$  электронов; шум меньше 600 электронов; число управляющих импульсов 13; тактовая частота 4 МГц; размеры кристалла  $11 \times 14,5$  мм; шаг

входных контактных площадок 40 мкм; максимальная амплитуда сигнала на выходе 5 В.

**Электронный тракт управления, сбора и обработки сигналов.** Блок-схема тракта показана на рис. 3 и предназначена для работы в составе тепловизора на основе фокальной матрицы InAs 128×128 элементов. Блок состоит из четырех печатных плат. В состав плат входят шесть функционально законченных устройств:

1. Формирователь аналоговых и импульсных напряжений заданной формы, амплитуды и длительности для работы фотоприемного устройства. Формирователь состоит из программируемого генератора импульсов, преобразователей уровня импульсов, логического устройства для включения фоточувствительных элементов при достижении заданной температуры и постоянных питающих напряжений для фотоприемного устройства.

2. Схема аналоговой обработки сигнала, включающая в себя предварительный маломощный усилитель и согласователь уровня сигнала с аналого-цифровым преобразователем.

3. Схема аналого-цифрового преобразования (12 бит, максимальная частота дискретизации 10 МГц) и схема буферизации данных для согласования с сигнальным процессором. Схемы генератора импульсов и буферизации данных АЦП выполнены на микросхемах с программируемой логикой (микросхема CPLD фирмы "Altera").

4. Схема управления и цифровой обработки сигнала, включающая в себя целочисленный сигнальный процессор типа ADSP2181, память для хранения и накопления оцифрованного фотосигнала, ПЗУ с программой обработки, цифровой интерфейс для связи с внешними устройствами и остальными платами блока. Схема обеспечивает работу прибора в автономном режиме.

5. Схема вывода видеосигнала на телевизор (монитор), состоящая из схемы формирования временной диаграммы видеосигнала, буферного устройства для ввода сигнала от сигнального процессора, видеопамяти, видеоЦАП с тремя палетами (две цветные и одна полутоновая) и преобразователя RGB-цветовых сигналов в видеосигнал в стандарте ПАЛ.

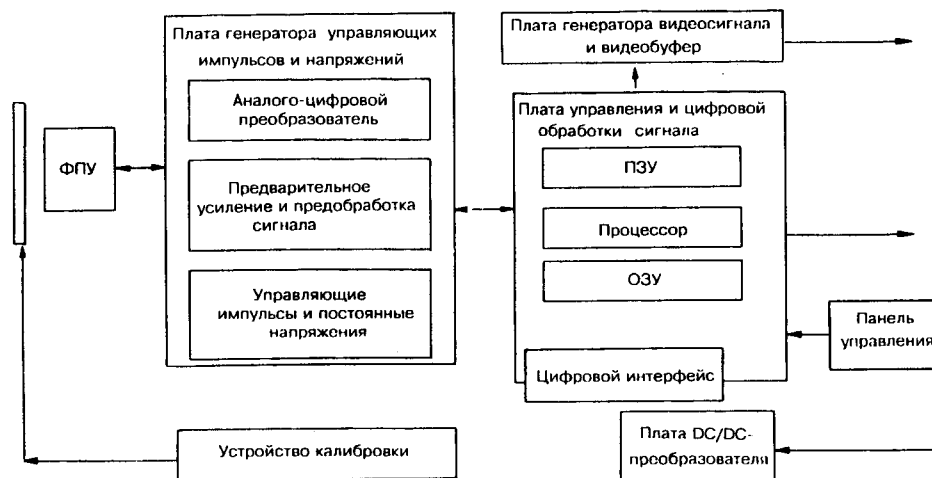


Рис. 3. Блок-схема электронного тракта управления, считывания и предварительной обработки сигнала

6. Преобразователь напряжения, состоящий из синхронизируемых от генератора управляющих импульсов преобразователей входного напряжения 5 или 12 В во все необходимые для работы электронного блока напряжения.

*Работа блока.* После включения питания или при перезапуске процессора программа загружается из ПЗУ во внутреннюю память процессора, происходит загрузка всей программируемой логики блока, включается формирователь управляющих напряжений для работы ФПУ и поступает команда на устройство калибровки. В процессе калибровки в ОЗУ записывается кадр темновых сигналов и выравнивающих коэффициентов. После проведения калибровки процессор принимает данные с АЦП, вычитает темновую составляющую, выравнивает чувствительность и записывает кадр изображения в ОЗУ. Затем кадр изображения поступает на плату формирования видеосигнала и выводится на монитор, при работе с ЭВМ передается в порт принтера в соответствии с протоколом EPP 1.9. В процессе работы сигналный процессор обрабатывает команды управления, поступающие с внешней клавиатуры или от ЭВМ.

*Программное обеспечение.* Программное обеспечение системы состоит из микропрограммы, написанной для центрального управляющего микропроцессора, которая делает возможной автономную работу системы. В функции программы входят: инициализация системы после включения питания, считывание кадров инфракрасного изображения, цифровая обработка считанных кадров с преобразованием сигнала в псевдоцвет и передача обработанных кадров на экран монитора и при необходимости в компьютер. После включения питания инициализируются отдельные компоненты электронного блока, и затем проводится калибровка тепловизора, при которой снимаются два кадра (при зеркальной и черной заслонках), далее вычисляется кадр темновых сигналов и кадр с выравнивающими коэффициентами для каждого элемента матрицы. Цифровая обработка кадров включает в себя вычитание из полного сигнала темновой компоненты, выравнивание чувствительности элементов, замену сигналов с дефектных элементов на средний сигнал с соседних элементов, определение яркостных границ снятого кадра перед его выводом на монитор (автояркость) и приведение сигнала к 8-битовому формату данных видеоконтроллера.

Предусмотрена возможность автоматического определения яркости и контрастности черно-белого или псевдоцветного изображения. В стандартном варианте программы применяются три палеты – одна черно-белая и две цветные. Например, применение совмещенной черно-белой и красной полутоновой палет делает удобным поиск перегретых участков на визуализированных объектах (промышленное и диагностическое применение). Передача изображения в компьютер осуществляется через порт принтера по специальному протоколу со скоростью 15 кадров/с.

Основные параметры электронного блока при работе с матрицей InAs  $128 \times 128$  элементов: частота кадров в секунду до 220; число накоплений до 128; видеовыход – стандартный ПАЛ; связь с компьютером – протокол порта принтера EPP1.9; скорость ввода изображения в компьютер 10–15 кадров/с; число команд при автономной работе до 32; габариты  $70 \times 70 \times 80$  мм; потребляемая мощность 7 Вт.

**Тепловизионная портативная камера на основе InAs-фокальной матрицы  $128 \times 128$ .** На базе описанной выше гибридной микросхемы и электронного тракта изготовлена портативная тепловизионная камера. Камера может работать в автономном режиме с телевизором и имеет выход

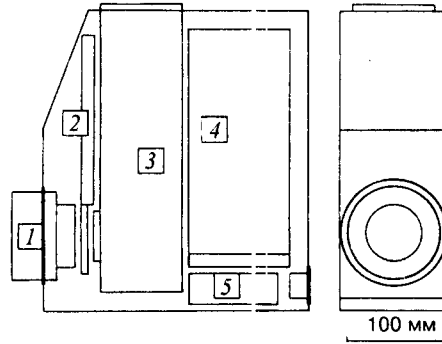


Рис. 4. Блок-схема портативного быстродействующего тепловизора

для подключения персонального компьютера. Блок-схема камеры показана на рис. 4.

В состав камеры входят: германиевый объектив 1, устройство калибровки 2, детектирующая система 3 (модуль в составе процессора Ф-401 и матрицы InAs МДП-фотоприемников  $128 \times 128$  в криостате), блок управления, канал связи с компьютером 4, блок питания 5, компьютер (Notebook Р130), программное обеспечение, включающее набор сервисных программ для обработки и визуализации изображения на экране монитора.

Объектив имеет фокусное расстояние 57 мм и относительное отверстие  $1 : 1,4$ .

Устройство калибровки состоит из двух шторок (зеркальной и черной), кулачкового привода с датчиками положения шторок и шагового двигателя.

Гибридная микросхема установлена в заливной азотный криостат. Емкость резервуара для жидкого азота 200 мл, время выхода на режим не



Рис. 5. Тепловизионное изображение здания в спектральном диапазоне 2,85–3,05 мкм



Рис. 6. Пример тепловизионного изображения в спектральном диапазоне 2,85–3,05 мкм

более 6 мин, время непрерывной работы без дозаправки криостата жидким азотом не менее 3 ч.

Работа камеры обеспечивается внешним источником напряжения +12 В/1,1 А.

Корпус камеры выполнен в виде несущей рамы и декоративного кожуха и имеет резьбовое отверстие для присоединения к штативу.

Общий вес прибора 3,5 кг.

Программное обеспечение тепловизионной камеры позволяет легко оперировать прибором и реализует следующие возможности: регистрацию и не превышает 1 %.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Gunapala S. D., Lui J. K., Sundaram M. S. et al.** Long-wavelength 256 × 256 QWIP hand-held camera // *Infrared Detectors and Focal Plane Arrays IV* /Ed. E. L. Dereniak, R. E. Sampson; Proc. SPIE. 1996. 2746. P. 124.
2. **Leonard G. R., Karaus R., Timlin H. A. et al.** NightMaster: a new compact IR imaging system // *Ibid.* P. 226.
3. **Kurshv G. L., Kovchavtzev A. P., Bazovkin V. M. et al.** Fabrication and properties of two-dimensional hybrid array sensor on epitaxial *n*-InAs films // *Ibid.* P. 268.
4. **Положительное решение на заявку 96124551/25.** Устройство считывания для двумерных приемников изображения /И. И. Ли, В. Г. Половинкин. Принято 27.12.96.

*Поступила в редакцию 28 мая 1998 г.*