

**МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЕ ГИБРИДНЫЕ ИК ФПУ
НА ОСНОВЕ ПРИБОРОВ С ЗАРЯДОВОЙ ИНЖЕКЦИЕЙ.
Ч. II. ТЕПЛОВИЗИОННЫЕ СИСТЕМЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ НА InAs**

**И. И. Ли, В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев,
В. М. Ефимов, А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курышев, В. Г. Половинкин,
А. С. Строганов, А. В. Царенко**

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: irlamlee@isp.nsc.ru*

Приведены результаты экспериментального исследования тепловизионных систем на основе элементов ПЗИ на InAs линейчатых и матричных гибридных модулей (тепловизора, ИК-микроскопа). Показано, что в коротковолновом ИК-диапазоне, благодаря высокой временной стабильности, удалось реализовать тепловизионные системы, имеющие при эффективной кадровой частоте 1–10 Гц температурное разрешение $\sim(4-8)$ мК.

Введение. В работе [1] рассмотрены схемотехнические решения построения устройств считывания с элементов ПЗИ для многоэлементных гибридных ИК ФПУ и разработана технология изготовления МДП-структур на InAs, обеспечивающая реализацию матричных и линейчатых элементов ПЗИ с плотностью поверхностных состояний на границе раздела InAs – диэлектрик ниже чем $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ [2]. Это позволило довести уровень собственных шумов элементов ПЗИ до величин ниже 50 электронов (площадь элемента $\sim 10^{-3} \text{ мм}^2$) [3]. Целью данной работы является создание и демонстрация возможностей и преимуществ многоэлементных гибридных ИК ФПУ и тепловизионных систем в коротковолновом ИК-диапазоне на основе элементов ПЗИ на InAs.

Конструкции гибридных ИК ФПУ линейчатого типа. Схема мультиплексора размером 2×192 с накоплением фотосигналов в элементах ПЗИ [4] показана на рис. 1. Принцип работы входной ячейки мультиплексора описан в [1, рис. 6]. Кремниевый мультиплексор содержит два зеркально-симметричных 192-входных мультиплексора с шагом 50 мкм, смещенных относительно друг друга на 25 мкм.

Основные параметры кремниевого мультиплексора: число входных контактных площадок 2×192 ; максимальная емкость накопительной ячейки $2,0 \cdot 10^7$ электронов; уровень собственных шумов не более 600 электронов; тактовая частота до 5 МГц; регулируемое время накопления минимальное

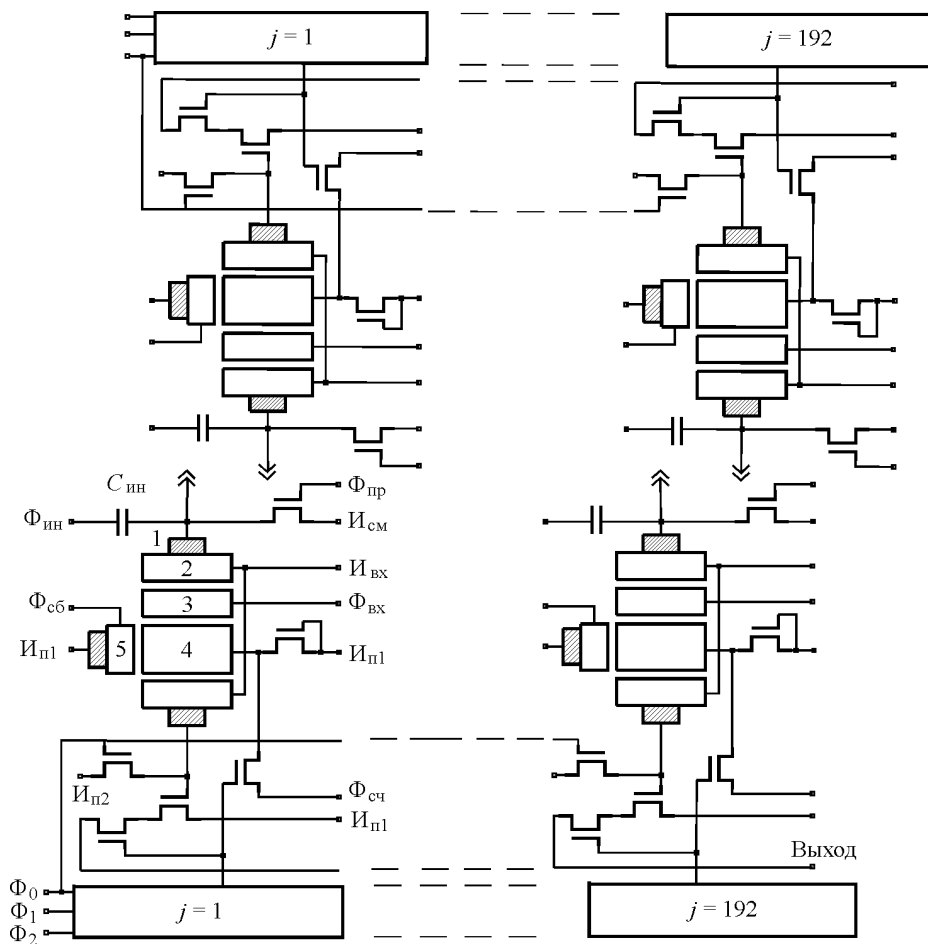


Рис. 1. Упрощенная принципиальная схема кремниевого мультиплексора размером 2×192 ($I_{п1}$, $I_{п2}$ – дополнительные источники питания; остальные обозначения как на рис. 3 в [1])

(от 50 мкс); потребляемая мощность 50 мВт; число информационных выводов 2; динамический диапазон не менее 75 дБ.

Конструкция кремниевого мультиплексора допускает возможность реализации двух вариантов гибридной микросхемы. В первом варианте (рис. 2, *a*) кристалл фотоприемной (ФП) линейки размещается между входами двух зеркально-симметричных мультиплексоров и электрически соединяется с ними In-микроотолбиками высотой 5–7 мкм методом flip-chip. Засветка фоточувствительных элементов осуществляется через предварительно просветленную непланарную сторону кремниевой подложки мультиплексора, которая является отрезающим фильтром и формирует коротковолновую границу чувствительности фотоприемных элементов ($\sim 1,1$ мкм). Длинноволновая граница чувствительности (3,05 мкм) определяется собственным краем поглощения в InAs. Во втором варианте (рис. 2, *b*) кремниевый мультиплексор разделяется на два отдельных кристалла. Оптический сигнал проецируется непосредственно на фотоприемные элементы, и становится возможной реализация спектрального диапазона 0,5–3,05 мкм.

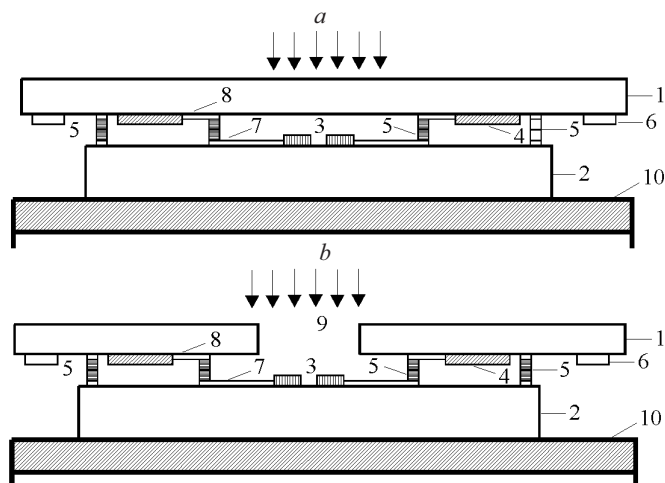


Рис. 2. Конструкции гибридных модулей линейчатого типа: *a* – фотосигнал проецируется через непланарную сторону кремниевого мультиплексора, *b* – фотосигнал проецируется непосредственно на элементы ПЗИ. Обозначения: 1 – кремниевый мультиплексор, 2 – ФП-линейка МДП-конденсаторов, 3 – фоточувствительные области МДП-конденсаторов, 4 – устройство ввода, 5 – индиевые микростолбики, 6 – выходные контактные площадки шин управления и информационных сигналов, 7 и 8 – подводящие шины, 9 – отверстие в кремниевой подложке, 10 – охлаждаемый пьедестал в криостате

Для тепловизионных систем разработана линейка фотоприемников размером 2×192 с шахматным расположением элементов и шагом 50 мкм в обоих направлениях. Размер затвора ПЗИ 26×26 мкм, зазоры между фотоприемниками защищены металлическим экраном (Ti). Для решения задач спектроскопии используется линейка фотоприемников 1×384 с шагом 25 мкм, размер затвора ПЗИ 17×300 мкм.

Расчет оптических потерь на элементах конструкции фотоприемного модуля в двух конструктивных вариантах (см. рис. 2) проводился известным методом «матрицы рассеяния» [5]. Поперечное сечение элемента ПЗИ линейчатого ФПУ дано на рис. 3. Для конструктивного варианта, приведенного на рис. 2, *a*, необходимо учитывать интерференцию в зазоре между планарными сторонами кремниевого кристалла и кристалла InAS с МДП-фотоприемниками. При наличии в системе подложки кремниевого мультиплексора, оптическая толщина которой много больше длины волны, точный расчет дает быстро осциллирующие зависимости оптических свойств от длины волны и других параметров системы. В нашем случае интерес представляет не эта тонкая структура спектров, а их средние значения. Толщина подзатворного диэлектрика d_1 (SiO_2) фиксирована (0,15 мкм). Диапазоны изменения толщины МДП-затвора d_2 (In_2O_3): 0,15, 0,20 и 0,25 мкм и защитного диэлектрика d_3 (SiO_2): 0 и 0,4 мкм определяются нашими технологическими возможностями. На рис. 4 показаны оптимизированные на длины волн 2,7 мкм (*a*) и 1,5 мкм (*b*) с учетом интерференции в зазоре спектры отражения структуры, которая состоит из «толстого» кремния с просветляющими с двух сторон слоями и фотоприемных элементов ПЗИ, отстоящих на расстоянии d_a .

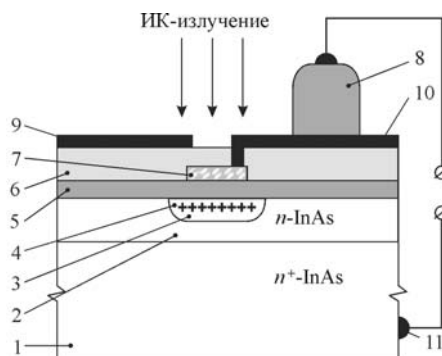


Рис. 3. Поперечное сечение элемента ПЗИ ФП-линейки: 1 – сильнолегированная подложка, 2 – слаболегированный эпитаксиальный слой, 3 – область пространственного заряда InAs, 4 – инверсионный слой в приповерхностной области InAs, 5 – подзатворный диэлектрик, 6 – защитный слой низкотемпературной двуокиси кремния, 7 – прозрачный проводящий затвор из окиси индия, 8 – индиевый столбик высотой 5–10 мкм, 9 – металлический экран, защищающий периферию элемента от паразитных засветок, 10 – проводящая шина для присоединения столбика к затвору элемента ПЗИ, 11 – омический контакт к подложке InAs

Проведенные расчеты показывают, что спектры отражения имеют сложную структуру, обусловленную интерференцией в зазоре гибридного модуля ИК ФПУ. Выбором доступных просветляющих покрытий в первом конструктивном варианте (см. рис. 2, а) не удастся обеспечить высокую квантовую эффективность во всем спектральном диапазоне 1,0–3,0 мкм. Необходимо отметить, что точно контролировать величину зазора в гибридном модуле технически невозможно. Поэтому для спектрального диапазона 0,5–2,5 мкм и спектрометрических приборов предпочтительнее второй вариант (см. рис. 2, б).

Фотоэлектрические характеристики ФПУ размером 1×384. На рис. 5 представлены результаты экспериментального исследования гибридного модуля ФПУ размером 1×384 при засветке его элементов через подложку кремниевого мультиплексора (см. рис. 2, а) [4]. В качестве источника излучения использовалось абсолютно черное тело (АЧТ) с температурой полости 573 К; уровень комнатного фона $\approx 2 \cdot 10^{-7}$ Вт/см² с холодной апертурной диафрагмой в виде узкой щели 2×13 мм на расстоянии 11 мм от элементов ПЗИ.

На рис. 5, а приведена гистограмма распределения фотосигналов линейки ИК ФПУ при освещении через просветленную подложку кремниевого устройства считывания, мощности падающего потока ИК-излучения $\approx 1,7 \times 10^{-7}$ Вт·см⁻² и времени накопления 10 мс, а на рис. 5, б показано среднеквадратичное значение напряжения шума (число выборок 128). Шум измерялся при закрытой диафрагме АЧТ. В данном случае практически все элементы ФП-линейки работали в режиме ограничения комнатным фоном. Теоретический расчет в этих условиях дает $D^* \approx 5,4 \cdot 10^{12}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹ при квантовой эффективности фотоприемников $\eta=1$ и собственных шумах устройства считывания, приблизительно равных 600 электронам. Среднее значение обнаружительной способности рассчитано из экспериментальных

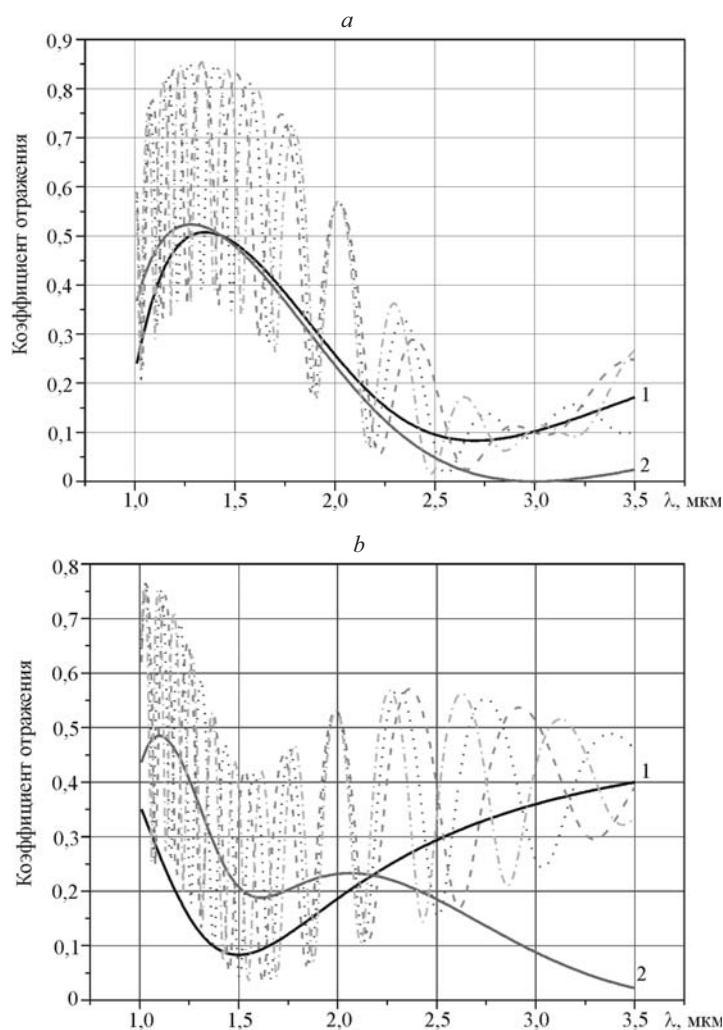


Рис. 4. Спектры отражения структуры «просветленный с обеих сторон кремниевый кристалл – МДП-структура с вакуумными зазорами $d_a = 5 \mu\text{м}$ (пунктирная кривая), $6 \mu\text{м}$ (точечная) и $7 \mu\text{м}$ (штрихпунктирная)»: на длины волн $2,7 \mu\text{м}$ (a) и $1,5 \mu\text{м}$ (b). Кривые 1 – спектры отражения просветленного с обеих сторон кремниевого кристалла, кривые 2 – спектры отражения МДП-структуры (толщина проводящего затвора МДП-структуры $d_2 = 0,2 \mu\text{м}$ и защитного диэлектрика $d_3 = 0,4 \mu\text{м}$)

данных ($D^* \approx 4,5 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$). Лишь пять элементов имели избыточные шумы, их D^* не хуже $1,5 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$. Экспериментальные результаты измерения обнаружительной способности ИК ФПУ соответствуют теоретическим оценкам при квантовой эффективности фотоприемников $\eta \approx 0,75$, расчетным зависимостям спектров отражения и пропускания на конструктивных элементах ФП-модуля (см. рис. 4) и оценкам уровня собственных шумов устройства считывания ≈ 600 электронов.

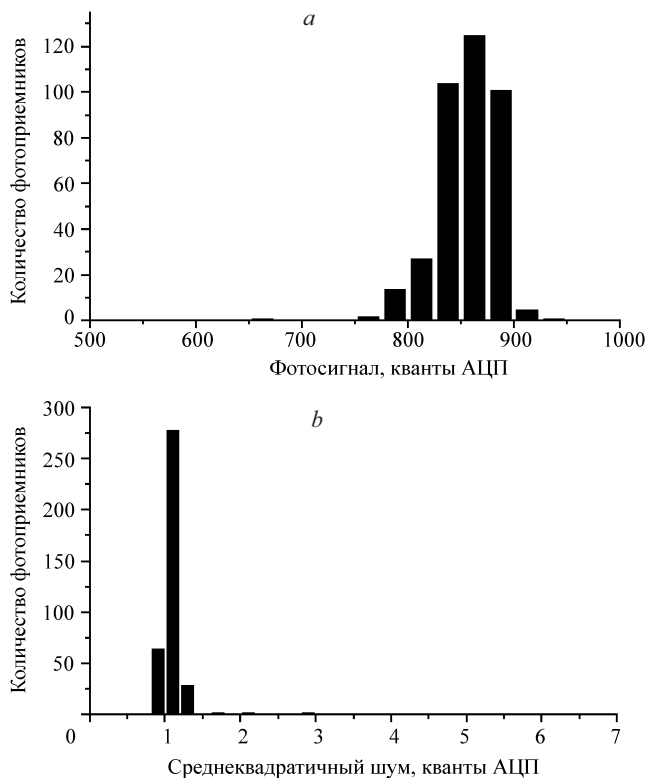


Рис. 5. Фотоэлектрические параметры гибридного модуля: гистограмма распределения фотосигналов ФПУ 1×384 при времени накопления 10 мс (а); гистограмма распределения напряжения среднеквадратичного шума линейки ФПУ 1×384 (b)

На основе фотоприемного модуля на InAs размером 1×384 , собранного по второму варианту (см. рис. 2, b), реализован быстродействующий спектрометр, описание которого дано в [6].

Матричные ФПУ 128×128 и 256×256 элементов на основе InAs. Разработаны фотоприемные матричные модули размером 128×128 и 256×256 элементов [2, 7]. Размер устройства считывания 130×130 элементов, как и размер матрицы элементов ПЗИ, связан с тем, что периферийные элементы имеют отличную от внутренних элементов чувствительность. На экран монитора выводятся сигналы только с внутренних фотоприемников, так что реальный размер ФПУ – 128×128 элементов.

Для матричных гибридных модулей ИК-излучение от объекта исследования падает на непланарную сторону сильнолегированной подложки n^{++} -InAs. За счет сдвига края фундаментального поглощения (эффект Мосса – Бурштейна) излучение проходит и поглощается в тонком эпитаксиальном слое n -InAs только в спектральном диапазоне $\sim (2,4 - 3,05)$ мкм. Длинноволновая граница ($\lambda \approx 3,05$ мкм) определяется фундаментальным краем поглощения в эпитаксиальном слое n -InAs. Коротковолновой край зависит от уровня легирования вырожденной подложки InAs и изменяется в пределах 2,4–2,5 мкм.

Обнаружительная способность D^* гибридного модуля матричного ИК ФПУ размером 128×128 составляет $\sim 3,3 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$ (величина приборного фона $\sim 6,4 \cdot 10^{-7} \text{ Вт/см}^2$), что соответствует режиму ограничения флуктуациями фона при $\eta = 0,7$. Число дефектных элементов, имеющих обнаружительную способность ниже $3 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, на лучших модулях не превышает 1 %.

Тепловизионные системы на основе элементов ПЗИ на InAs. *Тепловизор на основе многоэлементной матрицы размером 128×128 .* Гибридный модуль ФПУ размером 128×128 устанавливается в заливной вакуумный криостат с угольным геттером. Расчетное время удержания вакуума в криостате ориентировочно 11 лет.

Блок-схема тепловизора приведена на рис. 6. Тепловое излучение сцены фокусируется объективом 1 на матрице гибридного модуля 6, установленной в вакуумном криостате 4 с лейкосапфировым просветленным окном 3. Уровень фоновой засветки ограничивается холодной диафрагмой 5. Устройство калибровки 2 состоит из двух подвижных заслонок (зеркальной и черной) с электромагнитными приводами. Электронный блок управления и обработки данных с гибридной микросхемой выполнен на двух печатных платах, механически закрепленных на задней крышке вакуумного криостата. На одной плате размещены усилитель 7, формирователь постоянных и импульсных напряжений 8, на другой – АЦП (AD9235-20) 9, процессор 10, порт USB 2.0 11. Плата имеет стандартный USB разъем и с помощью стандартного кабеля может быть подключена к порту компьютера USB 2.0. Технические характеристики тепловизора: объектив $D/F = 1/1,8$ ($F = 20,5 \text{ мм}$); поле обзора $18 \times 18^\circ$; фоточувствительный элемент $40 \times 40 \text{ мкм}$; степень дискретизации кадра 128×128 элементов; спектральный диапазон чувствительности $2,4\text{--}3,05 \text{ мкм}$ (коротковолновая граница спектральной чувствительности может меняться в пределах $2,4\text{--}2,5 \text{ мкм}$ в зависимости от уровня легирования подложки InAs); частота кадров $f_k = 100 \text{ с}^{-1}$; NETD $0,025 \text{ }^\circ\text{C}$ (при температуре фона $32 \text{ }^\circ\text{C}$); предельная чувствительность $0,004 \text{ }^\circ\text{C}$ ($f_k = 1,25 \text{ с}^{-1}$); динамический диапазон 72 дБ ($f_k = 100 \text{ с}^{-1}$); температурный диапазон измерений $20\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$ (при калибровке прибора для медицинских применений, для других применений может быть расширен до температур $500 \text{ }^\circ\text{C}$ и выше установкой серых фильтров); абсолютная точность измерения температуры составляет $\pm 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ (при температуре прибора $22 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$); питание от USB 2.0 порта компьютера; мощность, потребляемая тепловизионной камерой, 1,1 Вт; хладагент – жидкий азот; время непрерывной работы при одной заправке

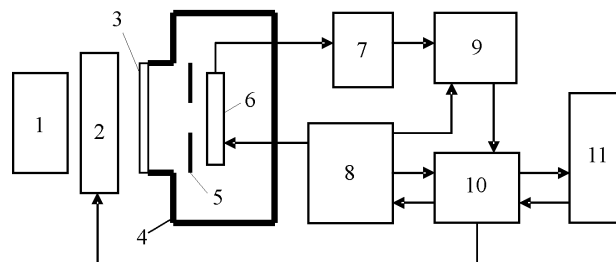


Рис. 6. Структурная схема тепловизора

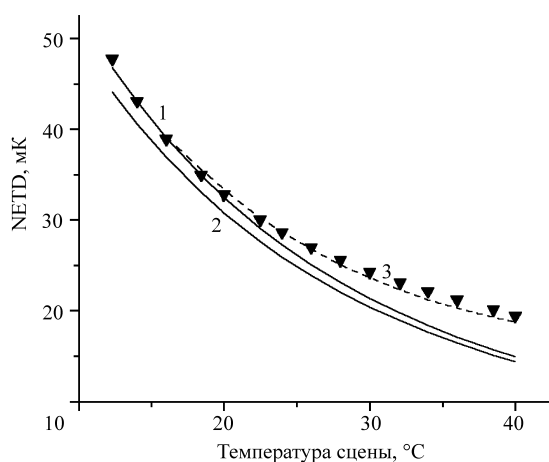


Рис. 7. Зависимости NETD от температуры сцены. Значками показаны экспериментальные данные. Кривая 1 – расчетная зависимость при среднеквадратичном шуме тракта 700 электронов, 2 – расчетная зависимость для электронного тракта без собственного шума, 3 – расчетная зависимость с учетом уменьшения квантовой эффективности в процессе накопления заряда в фотоячейке

(0,2 л) не менее 12 ч; габариты тепловизионной камеры: диаметр 110 мм, длина 240 мм; вес камеры 3,5 кг.

Для удобства формирования и обработки термограмм разработано программное обеспечение в оболочке Windows XP, которое позволяет:

- определять абсолютное значение температуры в любой заданной точке;
- выводить график распределения температуры вдоль выбранного сечения термограммы;
- получать термограммы в черно-белом и цветном изображениях;
- задавать границы температурных зон при визуализации кадра;
- формировать термограмму из произвольного количества последовательных кадров;
- производить запись на жесткий диск в режиме реального времени и считывание из файлов в специальном и стандартном (BMP) графических форматах;
- проводить запись видеопленки в виде последовательности кадров в реальном масштабе времени;
- сопровождать каждую термограмму текстовым описанием.

Температурное разрешение тепловизора в зависимости от температуры объекта исследования представлено на рис. 7. По сравнению с тепловизорами, созданными до 2005 г. [2], удалось улучшить NETD более чем в 2 раза за счет применения объектива с большей светосилой, снижения энергопотребления и уровня собственных шумов электронного блока. Его также можно существенно повысить путем суммирования фотосигналов с нескольких кадров. Экспериментальные зависимости температурного разрешения от количества суммируемых кадров при температуре сцены 30 °C приведены на рис. 8. Из рисунка видно, что вплоть до 128 циклов накопления зависимость NETD(N) достаточно близка к зависимости $N^{-1/2}$, где N – количество циклов накопления. NETD(N) улучшается с 25 мК при одном цикле накопления до 4 мК при 128 циклах накопления.

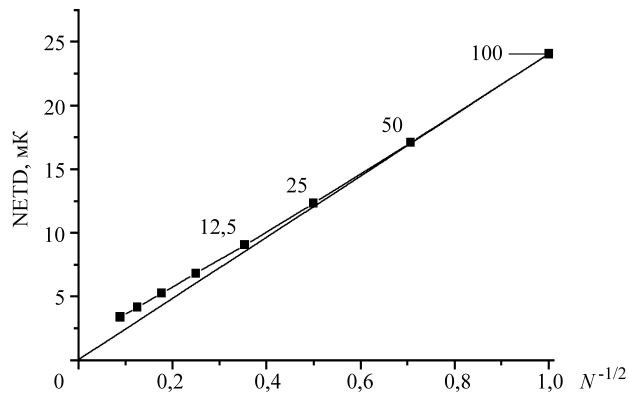


Рис. 8. Зависимости температурного разрешения от $N^{-1/2}$. Значения эффективной частоты кадров (c^{-1}) указаны над экспериментальными значками

Таким образом, режим с внутренним накоплением сигналов в фотоприемнике ПЗИ, а также конструкция устройств считывания, обеспечивающая коррелированную выборку фотосигналов в каждом цикле считывания, и разработка технологии МДП-структур InAs с плотностью поверхностных состояний меньше $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ позволили снизить низкочастотную границу шума типа $1/f$ до 1 Гц.

Временные зависимости среднеквадратичного шума по ансамблю фоточувствительных элементов тепловизора приведены на рис. 9. Каждая точка получена суммированием 128 кадров. В начальный период времени (до 3–10 мин) использование усреднения по крупным фрагментам матрицы, например 16×16 элементов, дают возможность обнаружить крупные объекты с температурным контрастом менее 2 мК.

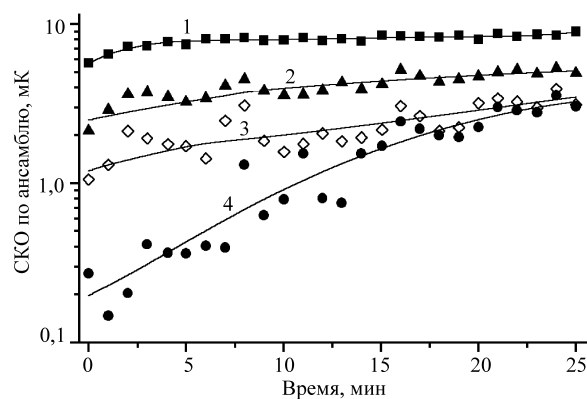


Рис. 9. Зависимости среднеквадратичного шума по ансамблю фоточувствительных фрагментов матрицы: кривая 1 – ансамбль из 128×128 фрагментов размером 1 пиксель, 2 – из 32×32 фрагмента размером 4×4 пикселя, 3 – из 8×8 фрагментов размером 16×16 пикселей, 4 – из 2×2 фрагмента размером 64×64 пикселя

Ряд фирм в качестве температурного разрешения тепловизионных систем приводит результаты видимости (минимальная разрешаемая разность температуры) специальных крупномасштабных мир [8]. Отличие этого параметра от NETD состоит в пространственном усреднении значения среднеквадратичного шума и физиологических особенностях зрения человека. Как видно из рис. 9, в зависимости от масштаба используемых мир при суммировании 128 кадров минимальная разрешаемая разность температур, определяемая таким способом, для нашего прибора составляет 2–3 мК (см. рис. 9, кривые 2, 3). Это в 2–4 раза меньше параметра NETD, равного 4–8 мК, полученного для единичного пикселя при тех же условиях (см. рис. 9, кривая 1). Зависимости, приведенные на рис. 8 и 9, демонстрируют высокую временную стабильность параметров тепловизора. Это дает возможность проводить тепловизионные исследования объектов с температурным разрешением ~8 мК при максимальном пространственном разрешении и обнаруживать крупномасштабные объекты с температурным контрастом всего 2–3 мК.

Тепловизор получил название ТКВр-ИФП «СВИТ» в память об основателе и руководителе работ по физике и технологии элементной базы полупроводниковой фотоэлектроники в ИФП СО РАН чл.-корр. РАН К. К. Свиташове. На тепловизор получен сертификат № РОСС RU.АЯ79.В56000 от 13.05.2005 г. Госстандарта России. В медицине это позволило тепловизионным методикам, ранее развивавшимся лишь в специализированных клиниках, перейти в разряд штатных в рядовых поликлиниках. Это свидетельствует о надежности и простоте применения тепловизора ТКВр-ИФП «СВИТ».

Тепловизионный микроскоп имеет особенности, отличающие его как от тепловизора, так и от микроскопа видимого диапазона [9]. В тепловизоре матрица фоточувствительных элементов находится на расстоянии $\approx F$ (F – фокусное расстояние объектива), а объект находится на значительном ($\geq 10F$) расстоянии от объектива. Поэтому входное окно криостата сконструировано так, чтобы поле зрения фотоприемной матрицы захватывало выходной зрачок объектива. В микроскопе для обеспечения формирования увеличенного изображения объекта на матрице объектив расположен на близком ($\sim F$) расстоянии от объекта и на заметно большем ($5-10F$) расстоянии от матрицы, что приводит к двум существенным моментам:

- значительно уменьшается интенсивность светового потока от объекта исследования;
- незанятое объективом поле зрения фотоприемника является источником избыточного фонового излучения.

Для микроскопа видимого диапазона достаточно экранировать избыточное поле зрения темным тубусом. Для ИК-микроскопа такой тубус будет источником дополнительного фонового излучения. Очевидно, что избыточное фоновое излучение приводит к уменьшению динамического диапазона и температурного разрешения ИК ФПУ. В используемом варианте криостата поле зрения приемника ограничено холодной диафрагмой, при этом угол зрения элементов приемника равен в среднем 0,314 ср, тогда как телесный угол объектива составляет $\sim (0,025-0,006)$ ср для расстояний от матрицы до объектива $L=5-10F$ (коэффициент оптического увеличения $K=L/F-1=4-9$).

Радикальное решение проблемы избыточного фонового излучения – создание охлаждаемого тубуса, но это приводит к неоправданно большим размерам охлаждаемой части прибора. В микроскопе экранирование фонового излучения обеспечивается зеркальным экраном. Коэффициент теплового из-

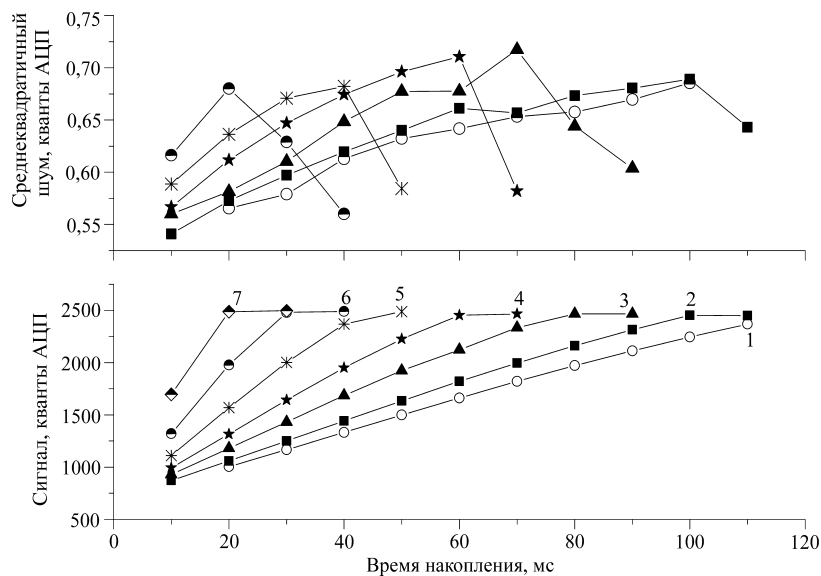


Рис. 10. Зависимости среднеквадратичного шума и сигнала от времени накопления для различных температур объекта: $T = 40$ (кривая 1), 57 (2), 76 (3), 95 (4), 115 (5), 136 (6), 157 °C (7)

лучения полированного алюминия при $T = 300\text{ К}$ и $\lambda = 3\text{ мкм}$ составляет 0,025 [10]. Следовательно, экранировка всего поля зрения приемника может снизить уровень фонового излучения в 40 раз, что эквивалентно уменьшению телесного угла до $\sim 0,009$ ср, т. е. до величины, сравнимой с телесным углом объектива.

Результаты измерения сигнала и шума в зависимости от времени накопления и температуры объекта приведены на рис. 10. Из этих данных видно,

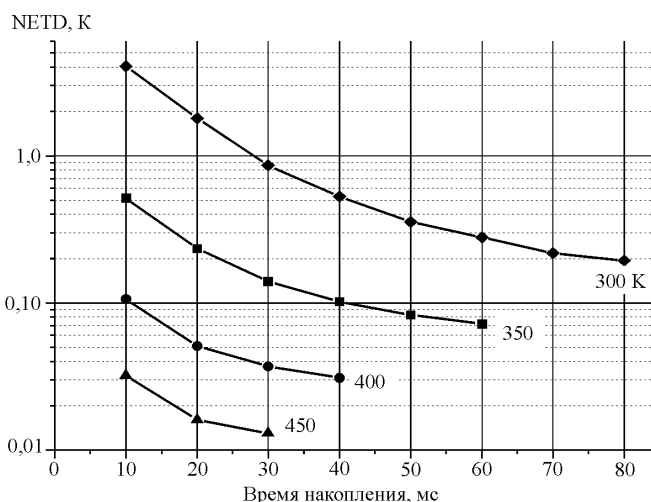


Рис. 11. Зависимости температурной чувствительности от времени накопления сигналов для разных температур объекта

что подавление фонового излучения позволило увеличить время накопления до 10 раз. При этом сигнал увеличился в 9 раз, а отношение сигнал/шум – приблизительно в 8 раз.

Зависимости NETD от времени накопления для разных температур объекта представлены на рис. 11. Как видно из графиков, NETD улучшается с увеличением времени накопления и температуры. При температуре объекта 450 К температурное разрешение не хуже 0,015 К.

Для формирования изображения объекта в тепловизионном микроскопе использовался линзовый объектив с фокусным расстоянием 20,5 мм и относительным отверстием 1 : 1,8. Теоретический (дифракционный) предел разрешения определялся выражением $\delta = 0,51\lambda/A$, где $A = n \sin(\alpha)$ – числовая апертура объектива, n – показатель преломления среды [11]. Для применяемого объектива $A \cong 0,55$, дифракционный предел разрешения диапазона длин волн $\approx 3,0$ мкм.

Для определения реального пространственного разрешения удобно использовать объект, имеющий контрастный пространственный рисунок с известными геометрическими размерами. В качестве такого тестового объекта

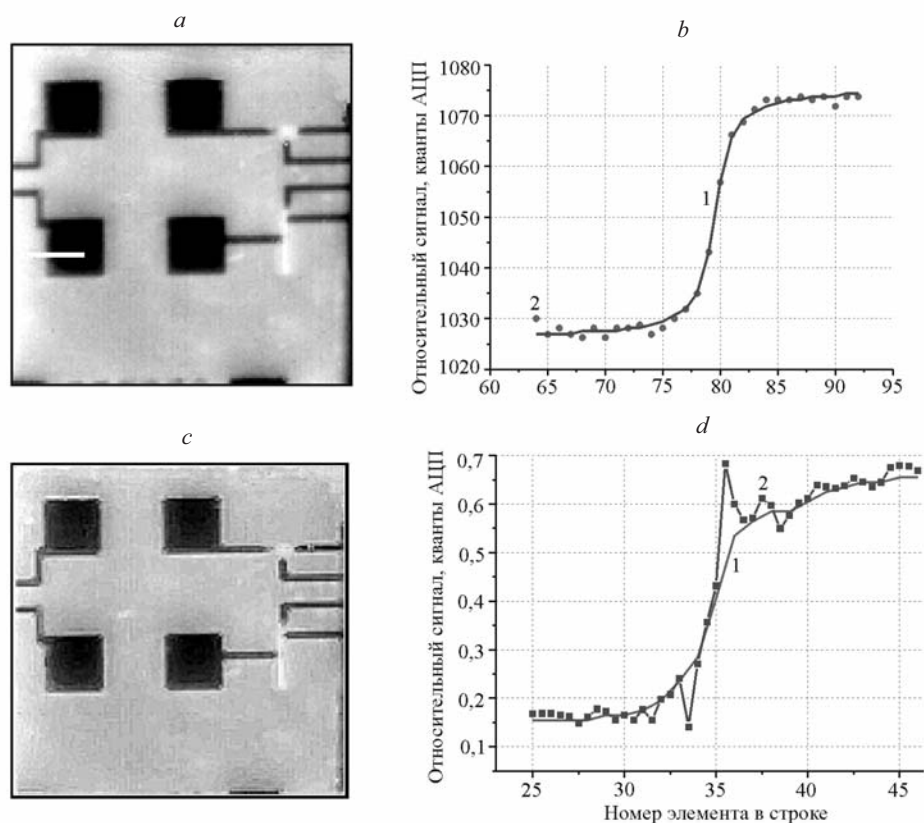


Рис. 12. Определение пространственного разрешения: *a* – исходное изображение тестового МДП-транзистора на кристалле кремниевого мультиплексора; *b* – зависимости сигнала от номера элемента вблизи края контактной площадки (исходная (кривая 1) и аппроксимация (2)); *c* – результат обработки изображения *a*; *d* – зависимости сигнала от номера элемента вблизи края контактной площадки (исходная (кривая 1) и результат математической обработки (2))

взят кристалл кремниевого мультиплексора, входящего в состав ФПУ. Изображение фрагмента кристалла, содержащего тестовый МДП-транзистор, дано на рис. 12. Размер контактных площадок 100×100 мкм. По определению, принятому в микроскопии, объекты считаются различимыми, если перепад интенсивности между ними $\geq 4\%$ [11]. Аппроксимируем зависимость сигнала от номера элемента вблизи края контактной площадки функцией $I(x) = I_0 + I_1 \arctg((x - x_0)/d)$. Эта функция описывает распределение интенсивности вблизи края полубесконечной полосы. Форму сигнала для полосы конечной ширины можно сформировать из сигналов двух полубесконечных (положительной и отрицательной) полос, сдвинутых на конечное расстояние. В пределе тонкой полосы получим форму сигнала $I_{th}(x)$, пропорциональную производной от $I(x)$: $I_{th}(x) \sim I_1 / (1 + (x/d)^2)$. Расчеты показывают, что две такие полосы будут различимыми (по критерию 4%) на расстоянии $\delta = 1,12d$. В результате обработки изображения тестового объекта, представленного на рис. 12, *a, b*, было получено значение $\delta = 7,1$ мкм. Пространственное разрешение при отношении сигнал/шум >20 улучшается с помощью математической обработки изображения примерно в 2 раза, т. е. до величины $\sim(3-4)$ мкм [12], что демонстрирует рис. 12, *c, d*.

Заключение. Приведены результаты разработки и исследования многоэлементных гибридных ИК ФПУ и тепловизионных систем на основе элементов ПЗИ на InAs. Показано, что эти системы имеют следующие преимущества:

1. В спектральном диапазоне 1–3 мкм контраст изображения более чем в 2–3 раза выше контраста в диапазоне 5–12 мкм. Уровень фонового излучения согласуется с зарядовой емкостью элементов ПЗИ, поэтому можно реализовать тепловизионные системы с максимально возможным температурным разрешением. Требования к динамическому диапазону измерительного канала тепловизионных систем в коротковолновом диапазоне на 4–8 двоичных разрядов меньше, чем в среднем и дальнем ИК-диапазонах, что упрощает считывание и обработку видеоизображений.

2. Температурное разрешение разработанного тепловизора ТКВр-ИФП «СВИТ» сохраняется в течение длительного времени после проведения операции калибровки. Высокая временная стабильность созданных на основе элементов ПЗИ на InAs тепловизионных систем различного назначения (ИК-спектрометр, тепловизор, тепловизионный микроскоп) позволяет значительно улучшить их чувствительность за счет суммирования кадров. Так, например, при эффективной кадровой частоте 1–10 кадр./с NETD тепловизора ТКВр-ИФП «СВИТ» составляет $\sim(4-8)$ мК, а для крупномасштабных объектов не хуже $\sim(2-3)$ мК, т. е. лучше температурного разрешения тепловизоров, чувствительных в диапазоне 5–12 мкм.

3. Только в коротковолновом диапазоне 3,0–3,5 мкм на основе элементов ПЗИ на InAs и HgCdTe можно реализовать ИК ФПУ с температурным разрешением $\sim(20-30)$ мК, охлаждаемые термоэлектрическим холодильником.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А. и др. Многоэлементные гибридные ИК ФПУ на основе приборов с зарядовой инжекцией. Ч. I. Принципы считывания сигналов // Автметрия. 2007. 43, № 4. С. 25.

2. **Овсюк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г и др.** Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Новосибирск: Наука, 2001. Гл. 1.
3. **Корнюшкин Н. А., Валишева Н. А., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л.** Влияние свойств границы раздела и глубоких уровней в запрещенной зоне на вольт-фарадные характеристики МДП-структур на арсениде индия // ФТП. 1996. **30**, № 5. С. 914.
4. **Базовкин В. М., Валишева Н. А., Ефимов В. М. и др.** Гибридное фотоприемное устройство на основе линейки 1×384 InAs МДП структур для спектрометрических применений // Прикладная физика. 2003. № 6. С. 85.
5. **Азам Р., Башара Н.** Эллипсометрия и поляризованный свет. М.: Мир, 1981.
6. **Базовкин В. М., Половинкин В. Г., Ефимов В. М. и др.** Фотоэлектрические свойства спектрометрического модуля 1×384 InAs в составе быстродействующего ИК-спектрометра // Матер. Девятой конф. «Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III-V». Томск: ТГУ, 2006. С. 416.
7. **Курьшев Г. Л., Ковчавцев А. П., Вайнер Б. Г. и др.** Медицинский тепловизор на основе матричного ФПУ 128×128 , работающий в диапазоне спектра 2,8–3,05 мкм // Автометрия. 1998. № 4. С. 5.
8. **Ллойд Дж.** Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.
9. **Базовкин В. М., Гузев А. А., Ковчавцев А. П. и др.** Тепловизионный микроскоп // Тез. докл. совещания «Актуальные проблемы полупроводниковой фотоэлектроники» (ФОТОНИКА-2003). Новосибирск: ИФП СО РАН, 2003. С. 17.
10. **Физические** величины: Справочник /Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991.
11. **Микроскопы** /Под ред. Н. И. Полякова. Л.: Машиностроение, 1969.
12. **Kuryshv G. L., Polovinkin V. G.** Differential method of instrument resolution enhancement // Proc. of the 2nd IASTED Intern. Conf. "Automation, Control, and Information Technology" (ACIT-ACA 2005). Anaheim – Calgary – Zurich: ACTA Press, 2005. P. 45.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.