

## Литература

1. Milton A. F., Barone F. R., Kruer M. R. Influence of non-uniformity on infrared focal plane array//Optical engineering. 1985. V. 24. No. 5. P. 855—862.
2. Scriber D. A., Schuler J. M., Warren P. et al. Image Preprocessing for the infrared//SPIE. 2000. V. 4028. P. 222—232.
3. Рогольский А. Инфракрасные детекторы. — г. Новосибирск: Наука, Сиб. отд., 2003.
4. Приборы с зарядовой связью/Под ред. М. Хоувза, Д. М. Моргана. — М.: Энергоиздат, 1981.
5. Chen L., Hewitt M., et al. Overview of advances in high performance ROIC designs for use with IR FPAs//SPIE. 2000. V. 4028. P. 124—138.
6. Канакин В. А., Ли И. И. Прибор с зарядовой связью// А. с. 795343; приоритет от 11.04.1979; Бюл. № 20.
7. Кляус Х. И., Ли И. И., Черепов Е. И. Многоканальное устройство ввода на приборах с зарядовой связью: А. с. 1044204; приоритет от 18.03.1982; Бюл. № 17, 1995. С. 288.
8. Кляус Х. И., Крымский А. И., Ли И. И. и др. Многоканальное устройство считывания на приборах с зарядовой связью: А. с. 1429855; приоритет от 11.07.1988; Бюл. № 23 от 20.08.95. С. 306.
9. Крымский А. И., Ли И. И., Ольшанецкая В. В. Многоканальное устройство считывания на приборах с зарядовой связью: А. с. 1702829; приоритет от 11.07.1988; Бюл. № 23 от 23.08.95.
10. Крымский А. И., Ли И. И., Ольшанецкая В. В. Многоканальное устройство считывания на приборах с зарядовой связью: А. с. 1776164; приоритет от 28.09.1988; Бюл. № 14 от 20.05.95.
11. Ли И. И., Попов М. В. Многоходовой процессор с адаптивными устройствами предпроцессорной обработки сигналов для многоэлементных датчиков//Автометрия. 1997. № 6.
12. Винецкий Ю. Р., Трищенко М. А. Потенциальное входное устройство прибора с зарядовой связью в режиме слабых сигналов//Радиотехника и электроника. 1981. № 4. С. 852—865.
13. Martijn H. H., Andersson J. Y. On-chip analog to digital conversion for cooled infrared detector arrays//SPIE. 2000. V. 4028. P. 183—191.
14. Zhou Z., Pain B., Panicacci R. et al. On-focal plane ADC: Recent progress at JPL//Ibid. 1996. V. 2745. P. 111—122.
15. Ли И. И. Многоканальное устройство считывания// Пат. 2282269; приоритет от 31.03.05; Бюл. № 23, 2006.
16. Ли И. И. Устройство ввода сигнала на приборах с зарядовой связью: А. с. 1625292; приоритет от 07.03.1989; Бюл. № 29 от 20.10.95. С. 335.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

## Multichannel signal preprocessors for multielement IR FPA

I. I. Lee

Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,  
Novosibirsk, Russia

*Structure and circuit solutions for implementing adaptive multichannel analog and digital signal preprocessing circuits integrated with readout circuits are considered. Experimental results of investigating multichannel signal preprocessing readout circuits and IR FPA based on them are represented.*

PACS: 07.57.Kp

УДК 621.383.3

## Предельные параметры многоэлементных гибридных МДП ИК ФПУ на InAs и приборов на их основе

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

Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Приведены результаты экспериментального обследования различных линейчатых и матричных гибридных модулей и инфракрасных (ИК) систем (матричного термографа с температурным разрешением 4—8 мК, ИК-микроскопа с пространственным разрешением 3—4 мкм, быстродействующего спектрографа  $\sim 10^4$  спектр/с) на основе InAs ПЗИ-приемников излучения. Достигнутые параметры для тепловизионных систем данного диапазона являются близкими к предельно достижимым.*

PACS: 85.60.Gz

## Введение

Важную роль в выборе спектрального диапазона тепловизионных систем играют уровень фонового излучения сцены и контраст изображения [1]. Контраст сцены монотонно уменьшается с увеличением длины волны. Для  $\lambda = 3$  мкм контраст выше почти в два раза, чем для  $\lambda = 5$  мкм, и более чем в три раза по сравнению с  $\lambda = 10$  мкм для диапазона температур сцены 300—500 К.

Для тепловизионных систем (тепловизоров) на основе многоэлементных фотоприемников наиболее информативным параметром является не обнаружительная способность, а эквивалентная шуму разность температур NETD [2, 3].

### Анализ температурного разрешения тепловизионных систем в зависимости от спектрального диапазона

На рис. 1 приведены численные расчеты NETD для тепловизоров в зависимости от длины волны и зарядовой емкости устройства считывания из работы [4]. Кривые 1 и 2 соответствуют зависимостям NETD( $\lambda$ ) "идеальных" тепловизоров [3]. Под "идеальным" мы понимаем тепловизор, в котором ИК ФПУ имеет обнаружительную способность, ограниченную лишь флуктуациями фонового излучения (режим ОФ), а устройства считывания имеют достаточную зарядовую емкость, обеспечивающую накопление фотосигнальных зарядов в течение всего времени кадра.

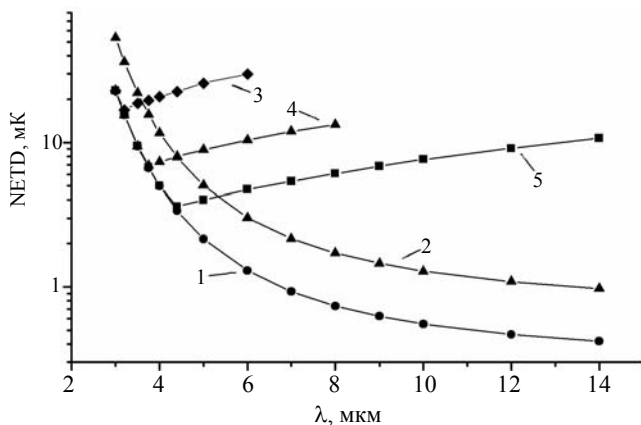


Рис. 1. Расчетные зависимости NETD от длины волны и зарядовой емкости устройства считывания в качестве параметра:

- 1 — апертура  $30^\circ$  ( $2F/D = 10$ ); 2 — апертура  $60^\circ$  ( $2F/D = 3$ ) с временем накопления, равным времени кадра 20 мс;  
3 —  $2 \cdot 10^6$ ; 4 —  $2 \cdot 10^7$ ; 5 —  $8 \cdot 10^7$  электронов при апертуре  $60^\circ$  ( $2F/D = 3$ )

Характер зависимостей NETD( $\lambda$ ) кардинально меняется, если оценки делать при условии ограниченной зарядовой емкости процессора. Как видно

из кривых 3—5 (см. рис. 1), уже для  $\lambda \geq 3,2$  мкм NETD тепловизоров полностью определяется зарядовой емкостью кремниевых устройств считывания. В отличие от "идеальных" в "реальных" тепловизорах с ограниченной зарядовой емкостью устройств считывания с ростом  $\lambda$  NETD ухудшается [3]. Для крайних правых точек кривых 3, 4 и 5 максимальное время накопления  $\leq 30$ —100 мкс, определяемое зарядовой емкостью устройства считывания, и становится сравнимо или меньше времени считывания одной строки. В этом случае матричные ФПУ не дают преимущества по температурному разрешению в сравнении с ФПУ на основе сканируемых фотоприемников линейчатого типа.

Из приведенного анализа следует, что наилучшее NETD тепловизионной системы достигается в том спектральном диапазоне, в котором уровень фонового излучения соответствует зарядовой емкости при времени накопления, равном времени кадра. Для ПЗИ-фотоприемников при комнатных температурах фона это условие выполняется в довольно узком спектральном диапазоне 2,9—3,5 мкм (зарядовая емкость InAs ПЗИ-элементов составляет  $\approx 5 \cdot 10^6$  электронов при площади элемента  $\sim 10^{-5}$  см<sup>2</sup>). Сдвиг спектральной чувствительности в коротковолновую область с 3 до 2 мкм (при комнатном фоне и постоянном времени накопления) приводит к уменьшению числа регистрируемых фотонов более чем на три порядка (см. рис. 1, кривая 4) и, соответственно, ухудшению NETD тепловизора. С уменьшением количества фотоносителей возрастают требования к уровню шума кремниевого устройства считывания, электронного блока управления. Сдвиг спектра чувствительности тепловизора в длинноволновую область в условиях ограниченной зарядовой емкости ПЗИ-элементов (см. рис. 1, кривые 3—5), также приводит к заметному ухудшению температурного разрешения.

Таким образом, оптимальным спектральным диапазоном для реализации гибридных ИК ФПУ на основе ПЗИ-элементов является диапазон  $\sim 2,9$ —3,5 мкм. В этом спектральном диапазоне ПЗИ-элементы можно реализовать на подложках InAs и HgCdTe.

### Принципы считывания фотосигналов с ПЗИ-фотоприемников

Некоторые схемотехнические решения, применяемые для считывания сигналов с фотодиодов, могут быть использованы и в гибридных ИК ФПУ на основе ПЗИ-элементов. Однако для ПЗИ-элементов предпочтительнее использовать устройства считывания с прямой инжекцией заряда. В этом

случае коэффициент ввода тока с ПЗИ-элементов близок к единице. Поэтому чувствительность ИК ФПУ на основе ПЗИ-элементов не будет уступать ИК ФПУ на основе фотодиодов [5—7].

Структура устройства считывания фотосигналов с внутренним накоплением в ПЗИ-элементе приведена на рис. 2.

При данном способе считывания если подложка ПЗИ-элемента *n*-типа, то для кремниевго устройства считывания необходимо использовать подложку *p*-типа. При подаче управляющих напряжений: постоянных  $U_{in}$ ,  $U_t$ , импульсных  $\Phi_{pr}$  (см. рис. 2, *a*, *б*) открываются транзисторы Т1 и на затворе МДП-фотоприемника, находящегося в режиме неравновесного обеднения, устанавливается напряжение  $U_{dis}$ . Для уменьшения количества управляющих напряжений этот узел можно соединить с подложкой (земля) кремниевго устройства считывания. С окончанием импульса  $\Phi_{pr}$  и подачей импульсов  $\Phi_{thr}$ ,  $\Phi_d$  напряжение на затворе ПЗИ-элемента, входной диффузионной области 1 задается поверхностным потенциалом под входным затвором 2 (см. рис. 2, *в*). Заряд с затвора ПЗИ-элемента стекает в источник питания  $U_t$  по цепи: входная диффузионная область 1 — зарядно-связанные затво-

ры 2—5. С окончанием импульса  $\Phi_{thr}$  и при подаче через разделительную емкость  $C_{inf}$  импульса инжекции  $\Phi_{inf}$  заряд неосновных носителей, накопленный в инверсионном слое, инжектируется в подложку ПЗИ-элемента. С окончанием импульса  $\Phi_{inf}$  МДП-фотоприемники снова переводятся в режим неравновесного обеднения, а заряд, пропорциональный фотосигнальному заряду, накопленному в инверсионной области, вновь стекает с затвора ПЗИ-элемента по цепи: входная диффузионная область 1 — зарядно-связанные затворы 2, 3 и интегрируется под затвором накопления 4. С окончанием импульса  $\Phi_d$  информационный заряд из-под затвора накопления 4 может передаваться в линейку зарядно-чувствительных усилителей.

Таким образом, потенциал затвора ПЗИ-элемента привязывается к поверхностному потенциалу под входным затвором устройства считывания до и после подачи импульса инжекции  $\Phi_{inf}$  в каждом цикле считывания. Коррелированная выборка обеспечивает подавление низкочастотных компонент шума ПЗИ-фотоприемников типа  $1/f$ . С окончанием импульсов  $\Phi_{inf}$ ,  $\Phi_d$  начинается новый цикл накопления.

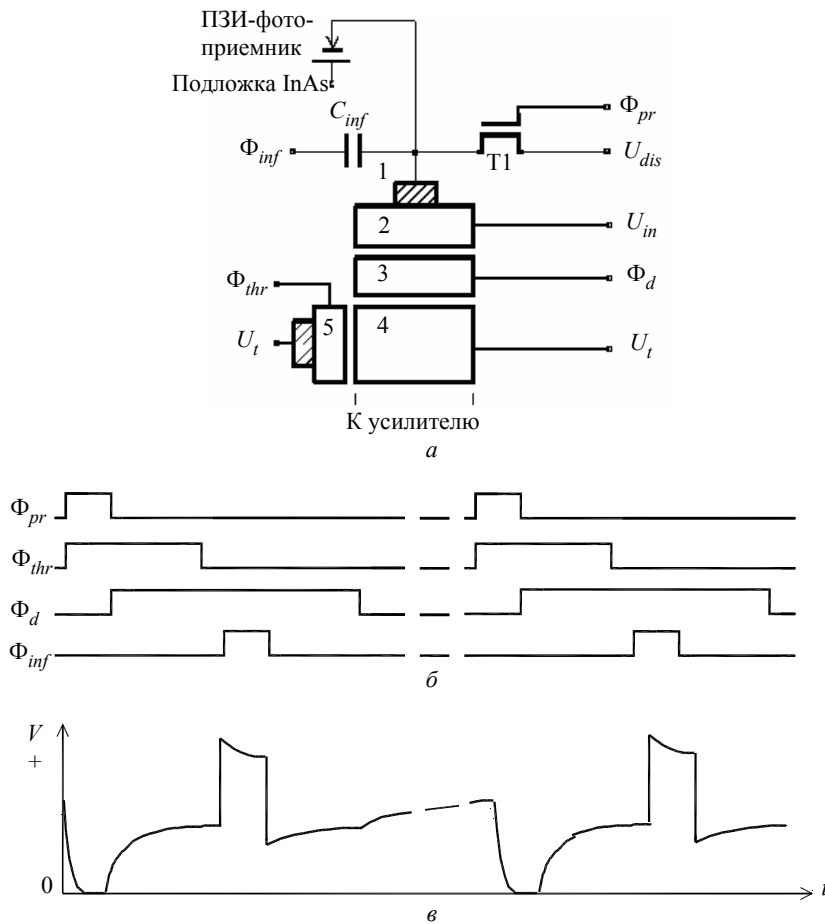


Рис. 2. Принцип считывания сигнала с МДП-фотоприемников с внутренним накоплением: *a* — принципиальная схема ячейки кремниевго мультиплексора; *б* — эпюры управляющих напряжений; *в* — эпюры напряжений на затворе ПЗИ-элемента

Для данного способа считывания сигналов для обеспечения линейности передаточных характеристик и минимизации уровня собственных шумов устройства считывания так же, как и для устройства приведенного на рис. 4, важно правильно выбрать временные интервалы между окончанием импульсов  $\Phi_{pr}$ ,  $\Phi_{thr}$  и импульсов  $\Phi_{inf}$  и  $\Phi_d$ . Длительность обоих временных интервалов должна лежать в пределах 2—10 мкс.

### Матричные ФПУ форматов 128×128 и 256×256 элементов на основе InAs

Нами разработаны фотоприемные матричные модули реальных форматов 128×128 (шаг матрицы 50 мкм) и 256×256 (шаг 40 мкм) элементов. Для матричного ФПУ 128×128 истинный формат устройства считывания 130×130 элементов (как и формат матрицы ПЗИ-элементов) связан с тем, что периферийные элементы имеют отличную от внутренних элементов чувствительность. На экран монитора выводятся сигналы только с внутренних фотоприемников, так что реальный формат ФПУ 128×128 элементов.

Для матричных гибридных модулей ИК-излучение от объекта исследования падает на неплазменную сторону сильнолегированной подложки  $n^{2+}$ -InAs. За счет сдвига края фундаментального поглощения (эффект Мосса—Бурштейна) излучение в спектральном диапазоне ~2,4—3,05 мкм проходит и поглощается в тонком эпитаксиальном слое  $n$ -InAs. Длинноволновая граница ( $\lambda \approx 3,05$  мкм) определяется фундаментальным краем поглощения в эпитаксиальном слое  $n$ -InAs. Коротковолновый край зависит от уровня легирования вырожденной подложки InAs и изменяется в пределах 2,4—2,5 мкм. Нам удалось разработать технологию ПЗИ-элементов с плотностью поверхностных состояний на границе раздела эпитаксиальный слой  $n$ -InAs (сторона А) — диэлектрик до уровня  $\leq 2 \cdot 10^{10}$  см<sup>2</sup>·эВ<sup>-1</sup>. Малая плотность поверхностных состояний достигнута формированием на поверхности InAs тонкого ~15 нм фторсодержащего анодного окисного слоя с последующим осаждением двуокиси кремния в реакторе пониженного давления при  $T = 220$  °С, толщиной ~130 нм.

Среднее значение обнаружительной способности ( $D^*$ ) для матричного ИК ФПУ формата 128×128 (величина приборного фона  $\sim 6,4 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>) составляет  $3,3 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>. Число дефектных элементов, имеющих обнаружительную способность, ниже  $3 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> ~1 %.

### Тепловизор на основе многоэлементной матрицы формата 128×128

Гибридный модуль формата 128×128 ФПУ устанавливается в заливной вакуумный криостат с угольным геттером. Время удержания вакуума в криостате — не менее 11 лет (подтверждено экспериментально).

Устройство калибровки состоит из двух подвижных заслонок (зеркальной и черной) с электромагнитными приводами. Электронный блок управления обработки данных с гибридной микросхемы выполнен на двух печатных платах, механически закрепленных на задней крышке вакуумного криостата. Плата имеет стандартный USB-разъем и с помощью стандартного кабеля может быть подключена к порту компьютера USB2.0. Дополнительного источника питания не требуется. Ниже приведены технические характеристики тепловизора.

Объектив.....	( $D/F = 1/1,8$ ; $F = 20,5$ мм)
Поле обзора, град .....	18×18
Фоточувствительный элемент, мкм .....	40×40
Степень дискретизации кадра, элементов .....	128×128
Спектральный диапазон чувствительности*, мкм.....	2,4—3,05
Частота кадров $f_k$ , с <sup>-1</sup> .....	100
Температурное разрешение NEDT ( $f_k = 100$ с <sup>-1</sup> , $T = 32$ °С), °С .....	0,025
Предельная чувствительность ( $f_k = 1,25$ с <sup>-1</sup> , $T = 32$ °С) .....	0,004
Динамический диапазон ( $f_k = 100$ с <sup>-1</sup> ), дБ.....	72
Температурный диапазон измерений**, °С .....	20—40
Точность измерения температуры ( $T$ прибора $22 \pm 2$ °С), °С .....	$\pm 0,25$
Питание от USB2.0 порта компьютера, мощность, потребляемая тепловизионной камерой, Вт .....	1,1
Хладагент .....	жидкий азот
Время непрерывной работы при одной заправке (0,2 л), ч, не менее .....	12
Габаритные размеры тепловизионной камеры, мм:	
диаметр.....	110
длина.....	240
Масса камеры, кг .....	3,5

\* Коротковолновая граница спектральной чувствительности может меняться в пределах 2,4—2,5 мкм в зависимости от уровня легирования подложки InAs.

\*\* При калибровке прибора для медицинских применений; для других применений может быть расширен до температуры 500 °С и выше с помощью установки серых фильтров.

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

определить абсолютное значение температуры в любой заданной точке;

выводить график распределения температуры вдоль выбранного сечения термограммы;

получить 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 графическом формате (BMP);

проводить запись видеопленки в реальном масштабе времени;

сопровождать каждую термограмму текстовым описанием.

На рис. 3 приведены зависимости температурного разрешения тепловизора от температуры объекта исследования. По сравнению с тепловизором, выпускавшимся до 2005 г. [5], удалось улучшить NETD более чем в два раза. Улучшение достигнуто за счет применения объектива с большей светосилой, снижения энергопотребления и уровня собственных шумов электронного блока, что позволило получить температурное разрешение тепловизора, близкое к теоретическому пределу для данной конфигурации тепловизора.

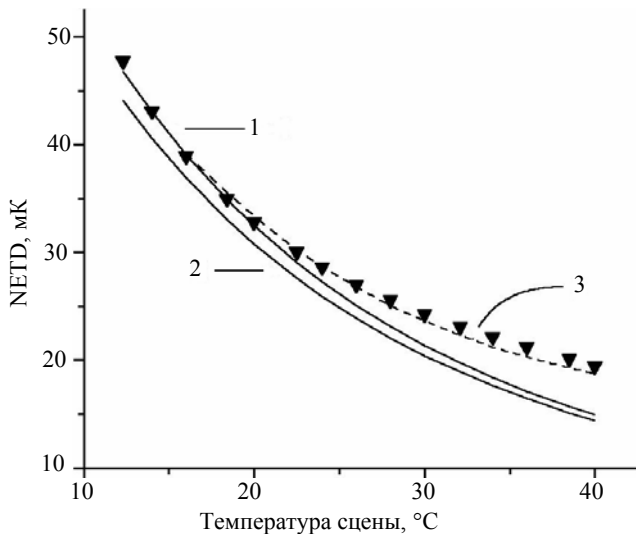


Рис. 3. Расчетные зависимости температурного разрешения от температуры сцены:

▼ — экспериментальные данные:

- 1 — для электронного тракта без собственного шума;
- 2 — при СКО-шума тракта = 700 е; 3 — расчетные зависимости с учетом уменьшения квантовой эффективности в процессе накопления заряда в ПЗИ-элементе

Температурное разрешение тепловизора можно существенно повысить за счет суммирования фотосигналов с нескольких кадров. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости температурного разрешения от количества суммируемых кадров при температуре сцены 30 °С, из которых видно, что вплоть до 128 циклов накопления зависимости NETD(N) близки к зависимости  $N^{-1/2}$ , где

$N$  — число циклов накопления, а NETD(N) улучшается с 25 мК при одном цикле накопления до 4 мК — при 128 циклах накопления.

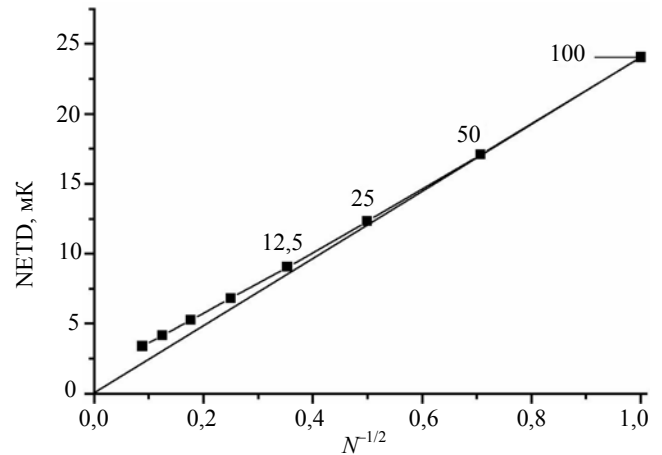


Рис. 4. Зависимость температурного разрешения количества суммируемых кадров  $N^{-1/2}$  (над экспериментальными точками приведены значения эффективной частоты кадров,  $c^{-1}$ )

На рис. 5 приведены временные зависимости среднеквадратичного шума по ансамблю фоточувствительных элементов тепловизора. Каждая точка получена суммированием 128 кадров. В начальный период времени после проведения калибровки (до 3—10 мин) использование усреднения по крупным фрагментам матрицы, например  $16 \times 16$  элементов, дают возможность обнаружить крупные объекты с температурным контрастом менее 2 мК.

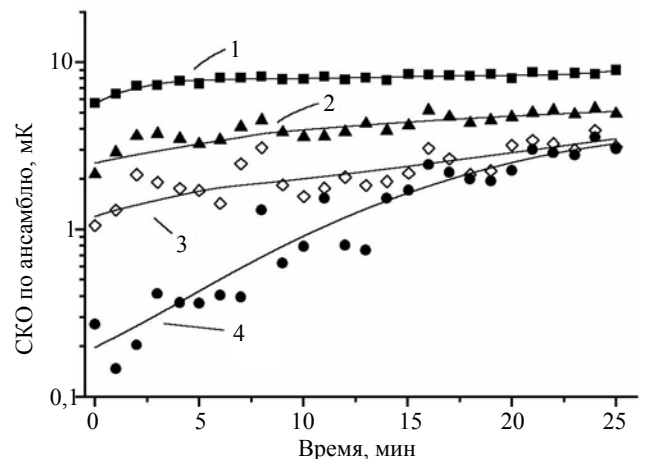


Рис. 5. Зависимость СКО-шума по ансамблю фоточувствительных фрагментов матрицы:

- 1 — ансамбль из  $128 \times 128$  фрагментов размерностью в 1 пиксель;
- 2 —  $32 \times 32$  размерностью  $4 \times 4$  пикселей;
- 3 —  $8 \times 8$  размерностью  $16 \times 16$  пикселей;
- 4 —  $2 \times 2$  размерностью  $64 \times 64$  пикселей

Таким образом, режим с внутренним накоплением сигналов в ПЗИ-фотоприемнике, структура устройств считывания, обеспечивающая коррелированную выборку фотосигналов в каждом цикле считывания, и разработка технологии InAs

МДП-структур с плотностью поверхностных состояний ниже  $2 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  позволили снизить угловую частоту шумов типа  $1/f$  до частот порядка  $1 \text{ с}^{-1}$ .

Ряд фирм в качестве температурного разрешения тепловизионных систем приводят результаты видимости (минимальная разрешаемая разность температуры) специальных крупномасштабных "миров" [8]. Отличие этого параметра от NETD состоит в пространственном усреднении СКО-шума и физиологических особенностях зрения человека. В зависимости от масштаба используемых "миров" при суммировании 128 кадров минимальная разрешаемая разность температур, определяемая таким способом, для нашего прибора составляет 2—3 мК (см. рис. 5, кривые 2, 3). Это в 2—2,5 раза меньше параметра NETD, равного 4—8 мК, полученного для единичного пикселя при тех же условиях (см. рис. 3, кривая 1). Зависимости, приведенные на рис. 4 и 5, демонстрируют высокую временную стабильность параметров тепловизора. Это дает возможность проводить тепловизионные исследования объектов с температурным разрешением  $\sim 8 \text{ мК}$  при максимальном пространственном разрешении и обнаруживать крупномасштабные объекты с температурным контрастом всего 2—3 мК.

Тепловизор получил название ТКВр-ИФП "СВИТ" в честь основателя и руководителя работ по физике и технологии элементной базы полупроводниковой фотоэлектроники в ИФП СО РАН, чл.-кор. РАН К. К. Свиташова. На тепловизор получен сертификат РОСС RU.АЯ79.В56000 от 13.05.2005 г. Госстандарта России. Некоторые научные результаты, полученные на нашем тепловизоре, опубликованы в работах [9—12]. В медицине это позволило тепловизионным методикам, ранее развивающимся лишь в специализированных клиниках, перейти в разряд штатных в рядовых поликлиниках, что характеризует надежность и простоту в использовании тепловизора ТКВр-ИФП "СВИТ".

### Тепловизионный микроскоп

Тепловизионный микроскоп имеет особенности, отличающие его как от тепловизора, так и от микроскопа видимого диапазона [13]. В тепловизоре матрица фоточувствительных элементов находится на расстоянии  $\approx F$ , а объект — на значительном  $\geq 10 F$  расстоянии от объектива (где  $F$ -фокусное расстояние 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 замет-

но большем ( $5—10 F$ ) 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 также 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. Ограниченный диафрагмой угол зрения элементов приемника составляет в среднем 0,314 ср, тогда как телесный угол объектива составляет  $\sim 0,025—0,006$  ср для расстояний от матрицы до объектива  $L = 5—10 F$  (коэффициент оптического увеличения  $K = L/F - 1 = 4—9$ ).

Радикальное решение проблемы избыточного фонового излучения — создание охлаждаемого тубуса. Но такой путь приводит к неоправданно большим размерам охлаждаемой части прибора. В микроскопе экранирование фонового излучения было обеспечено применением зеркального экрана.

Коэффициент теплового излучения полированного алюминия при  $T = 300 \text{ К}$  и  $\lambda = 3 \text{ мкм}$  составляет 0,025 [14]. Следовательно экранировка всего поля зрения приемника может уменьшить фоновое излучение в 40 раз, что эквивалентно уменьшению телесного угла до  $\sim 0,009$  ср, т. е. до величины, сравнимой с телесным углом объектива.

На основании проведенных расчетов была переработана конструкция входной части криостата. Подавление фонового излучения позволило увеличить время накопления до 10 раз. При этом сигнал увеличился в 9 раз, а отношение сигнал/шум в  $\sim 8$  раз. Полученные зависимости были аппроксимированы функцией  $I(T) = I_0 + I_1 \exp(T_g/T)$ , где  $I_0$ ,  $I_1$  и  $T_g$  — подгоночные параметры. Эквивалентная шуму разность температур  $\delta T_{ne}$  определялась из уравнения  $I(T + \delta T_{ne}) = I(T) + \sigma$ , где  $\sigma$  — СКО-сигнала.

На рис. 6 представлены зависимости, эквивалентные шуму разности температур от времени накопления для разных температур объекта. Как видно из графика, температурное разрешение 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 использован линзовый объектив с фокусным расстоянием 20,5 мм, отно-

сительное отверстие 1:1,8. Теоретический (дифракционный) предел разрешения определяется выражением  $\delta = 0,51 \lambda/A$ , где  $A = n \cdot \sin(\alpha)$  — числовая апертура объектива;  $n$  — показатель преломления среды [15]. Для используемого объектива  $A \cong 0,55$  дифракционный предел разрешения для нашего диапазона длин волн составляет  $\approx 3,0$  мкм.

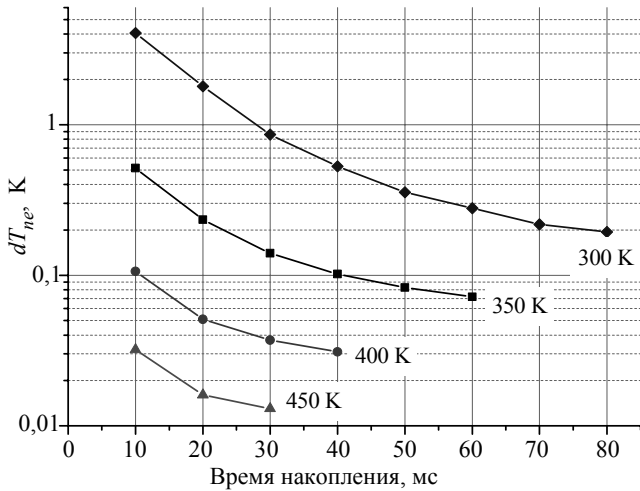


Рис. 6. Температурная чувствительность в зависимости от времени накопления для разных температур объекта

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

кристалл кремниевого мультиплексора, входящего в состав ФПУ. На рис. 7 представлен фрагмент кристалла, содержащий тестовый МДП-транзистор. Размер контактных площадок  $100 \times 100$  мкм. По определению, принятому в микроскопии, объекты считаются различимыми, если перепад интенсивности между ними  $\geq 4\%$  [15]. Аппроксимируем зависимость сигнала от номера элемента вблизи от 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 различимы (по критерию 4%) на расстоянии  $\delta = 1,12 d$ . В результате обработки изображения тестового объекта, представленного на рис. 7 а, б, было получено значение  $\delta = 7,1$  мкм. Улучшение пространственного разрешения с помощью математической обработки изображения демонстрируется на рис. 7, в, г, из которых видно, что при отношении сигнал/шум  $> 20$  можно улучшить пространственное разрешение примерно в два раза, т. е. до величины  $\sim 3-4$  мкм [16].

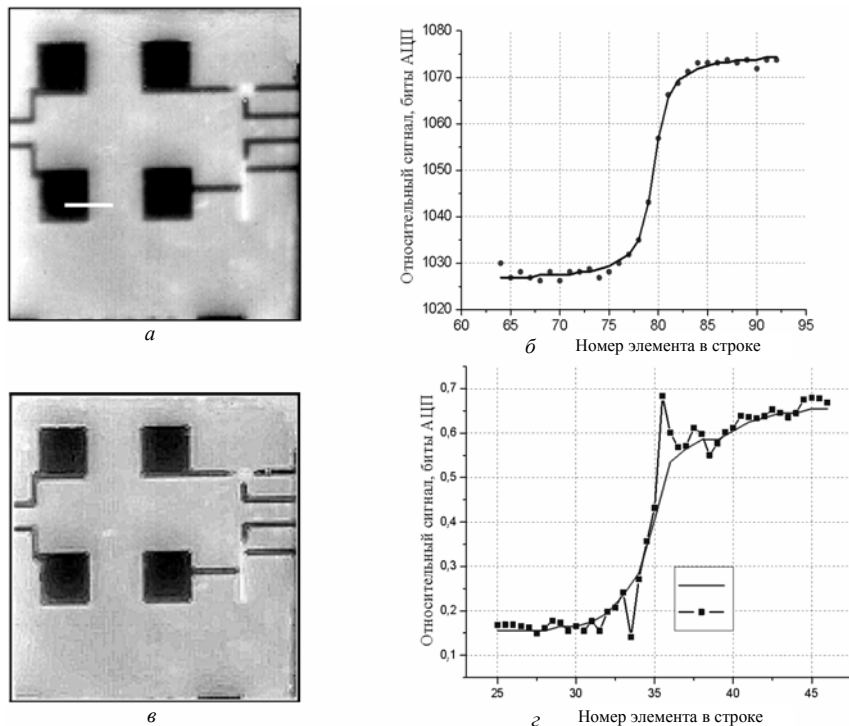


Рис. 7. Определение пространственного разрешения:

а — исходное изображение тестового МДП-транзистора на кристалле кремниевого мультиплексора; б — зависимости вблизи от края контактной площадки: исходная (.....) и аппроксимация (—); в — результат обработки изображения а; г — зависимости вблизи от края контактной площадки: исходная (■ ■ ■) и результат математической обработки (—). Размер контактных площадок  $100 \times 100$  мкм

### Модуль 8×8 для регистрации импульсных оптических сигналов

Одной из технически сложных проблем в оптоэлектронике является задача регистрации координаты и времени прихода слабых импульсных сигналов, необходимых в системах лазерной локации. В ИК-области эта задача усложняется тем, что фоновое излучение на 2—3 порядка превышает уровень информационных сигналов. Для решения этой задачи устройство считывания должно удовлетворять следующим требованиям:

фотосигнал с каждой фотоприемной ячейки необходимо передавать без задержки во времени на выходные строчные и столбцовые шины;

ячейка устройства считывания должна содержать усилитель и фильтр высоких частот для подавления низкочастотных неинформационных компонент сигналов.

Принципиальная схема кремниевого устройства считывания приведена в работах [17, 18]. Важным преимуществом данного устройства считывания является использование емкости подзатворного диэлектрика МДП-структур в качестве составной части RC-фильтра. Для устройств считывания на основе фотодиодов емкость RC-фильтра ( $C = 0,4$  пФ) пришлось бы размещать на кремниевом кристалле. Эта емкость заняла бы значительную часть площади в ячейке устройства считывания на кремниевом кристалле, существенно ограничивая возможности выбора принципиальной схемы и оптимизации топологии устройства считывания.

На рис. 8 приведены расчетные зависимости коэффициента усиления дифференциального усилителя устройства считывания (кривые 1—3) и устройства считывания с RC-фильтром высоких частот (кривые 4 и 5)  $K(f)$  от частоты и напряжения смещения  $U_{dis}$  в качестве параметра. Как видно из этих зависимостей, RC-фильтр обеспечивает подавление низкочастотных компонент сигналов. Увеличение напряжения смещения приводит к сдвигу передаточных характеристик RC-фильтра в область более высоких частот. В области частот выше 2—3 МГц уменьшение коэффициента усиления устройства считывания обусловлено высокочастотной границей полосы пропускания дифференциального усилителя.

Кремниевые устройства считывания были изготовлены по КМОП-технологии с топологическими нормами 0,8 мкм, с двумя уровнями металлизации. В центре кремниевого кристалла располагается матрица 8×8 ячеек устройств считывания с шагом по обеим координатам 50 мкм. Размер InAs ПЗИ-элементов 40×40 мкм. Гибридные модули собирались методом flip-chip на индиевых микростолбиках. Экспериментальное обследование показало,

что ИК ФПУ формата 8×8 элементов обеспечивает регистрацию оптического импульса с пороговой энергией  $\sim 8 \cdot 10^{-17}$  Дж/элемент. Точность определения времени прихода оптического сигнала определялась как длительность фронта сигналов на выходах ФПУ при достижении амплитуды сигналов, равных 6 уровням СКО-шума, и была не хуже 50—100 нс.

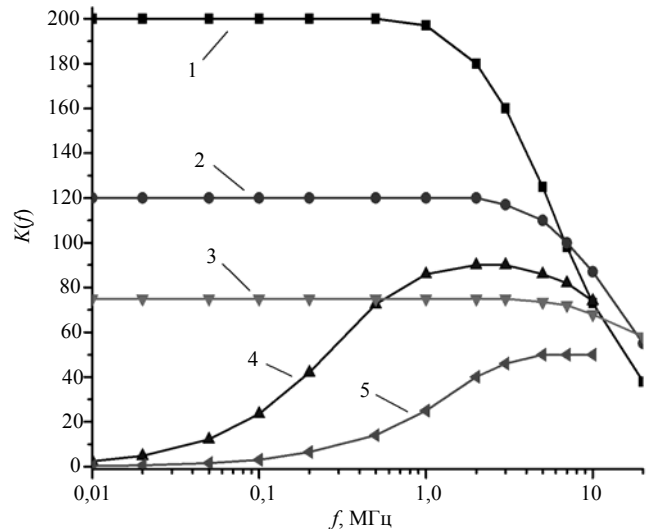


Рис. 8. Расчетные частотные характеристики дифференциального усилителя устройства считывания (1—3) и устройства считывания с RC-фильтром высоких частот — (4, 5) при напряжении смещения  $U_{dis}$ : 1 — 2,0 В; 2 — 2,3 В; 3 — 2,8 В; 4 — 2,3 В; 5 — 2,8 В

### Конструкции гибридных линейчатых ИК ФПУ на основе InAs ПЗИ-элементов

Технологические вопросы создания многоэлементных InAs ПЗИ-фотоприемников рассмотрены в работах [5, 19].

На рис. 9 показана упрощенная принципиальная схема мультиплексора формата 2×192 с накоплением фотосигналов в ПЗИ-элементах [20]. Кремниевый мультиплексор содержит два зеркально-симметричных 192 входных мультиплексора с шагом 50 мкм, смещенных относительно друг друга на 25 мкм.

Основные параметры кремниевого мультиплексора приведены ниже.

Число входных контактных площадок.....	2×192
Шаг входных устройств, мкм .....	50
Максимальная емкость накопительной ячейки, электрон .....	$2,0 \cdot 10^7$
Уровень собственных шумов, электрон, не более.....	600
Тактовая частота, МГц .....	до 8
Регулируемое время накопления, минимальное, мкс .....	от 100
Потребляемая мощность, мВт .....	50
Число информационных выводов .....	2
Динамический диапазон, дБ, не менее.....	75



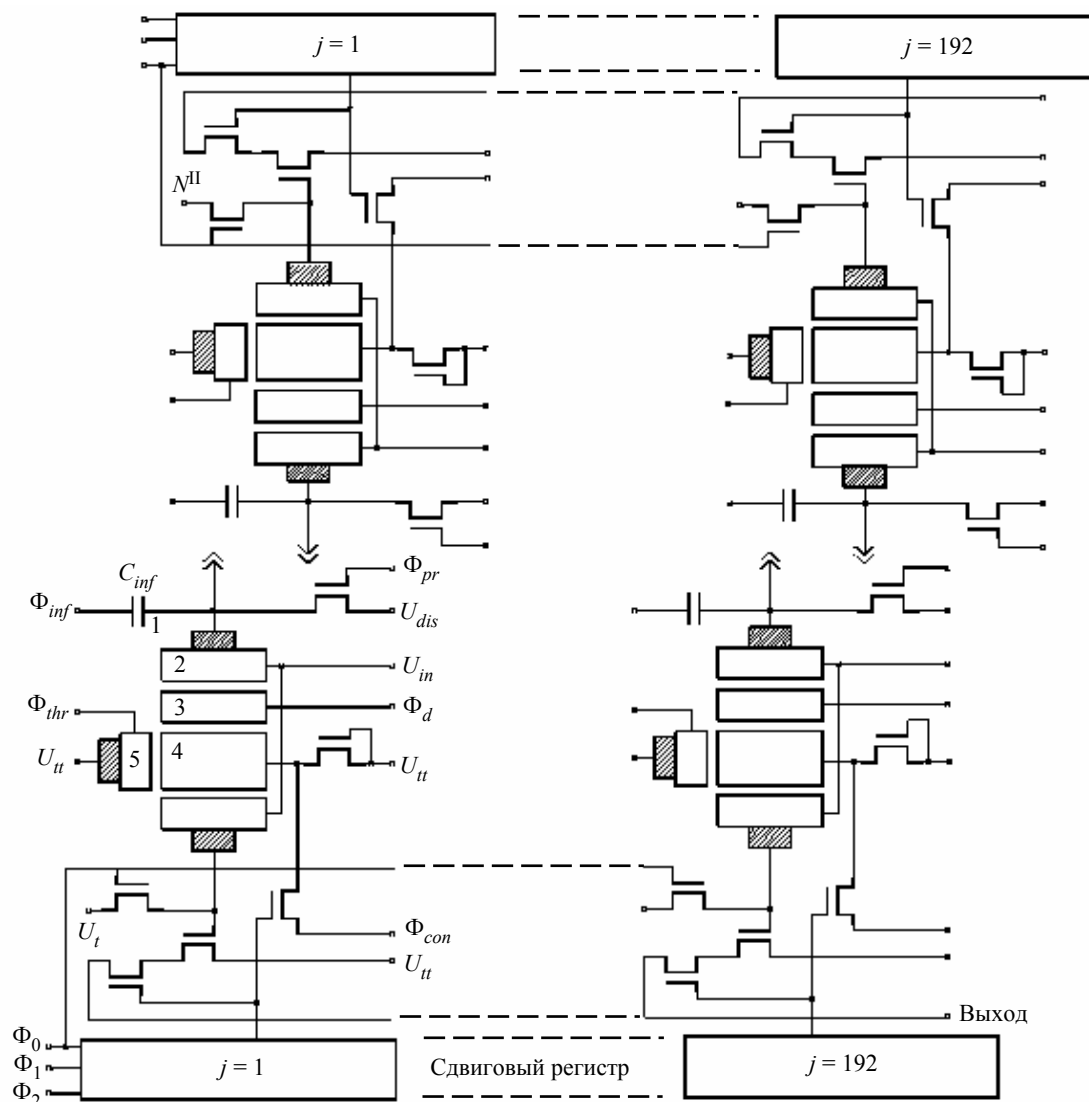


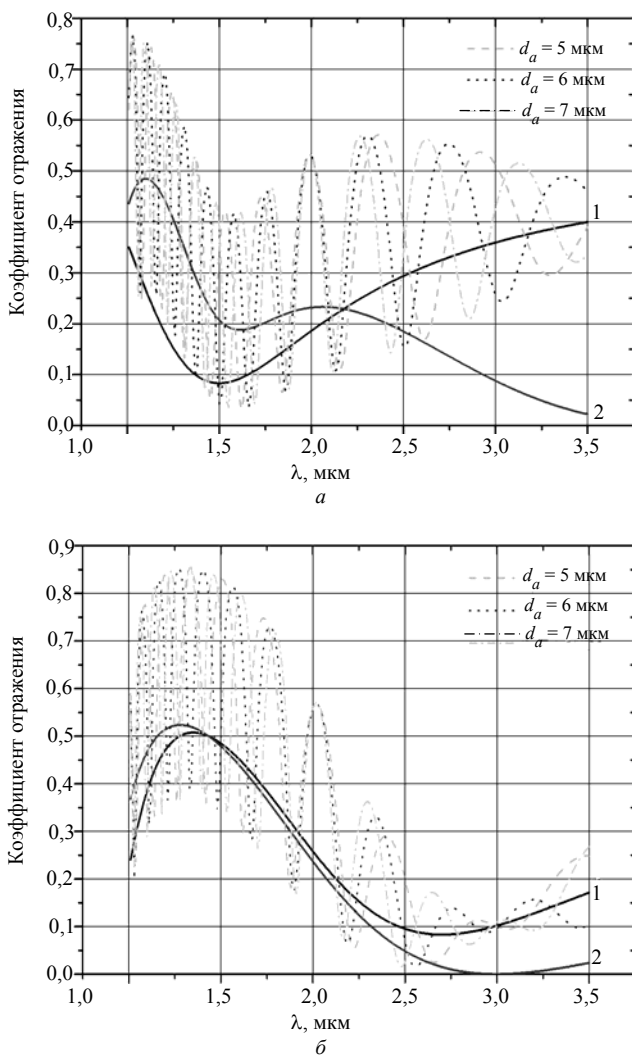
Рис. 9. Упрощенная принципиальная схема модифицированного кремниевого мультиплексора 2x192

Конструкция Si-мультиплексора допускает возможность реализации двух вариантов гибридной микросхемы. В первом варианте кристалл ФП-линейки размещается между входами двух зеркально-симметричных мультиплексоров и электрически соединяется с последними In микростолбами 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 (~1,1 мкм). Длинноволновая граница чувствительности (3,05 мкм) определяется собственным краем поглощения в InAs. Во втором варианте 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.

Для тепловизионных систем разработана двоякая линейка 2x192 фотоприемников с шахматным расположением элементов и шагом 50 мкм. Размер ПЗИ-затвора 26x26, 38x38 мкм, зазоры между фотоприемниками защищены металлическим экраном (титан). Для решения задач спектроскопии — однорядная линейка фотоприемников 1x384 с шагом 25 мкм, размер ПЗИ-затвора 17x300 мкм.

Расчет оптических потерь на элементах конструкции фотоприемного модуля в двух конструктивных вариантах проводился известным методом "матрицы рассеяния" [21]. Для конструктивного варианта с засветкой через кремниевый коммутатор 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. На рис. 10 показаны спектры отражения структур, состоящих из "толстого" кремния со слоями просветления с двух сторон и отстоящей от нее на расстояние  $d_a$  МДП-фотоприемниками с учетом интерференции в зазоре в зависимости от толщины проводящего затвора из  $\text{In}_2\text{O}_3$  ( $d_{\text{In}_2\text{O}_3}$ ) для различных толщин защитного диэлектрика ( $d_2 \text{SiO}_2$ ). Толщина подзатворного диэлектрика ( $d_1 \text{SiO}_2$ ) фиксирована = 0,15 мкм. Диапазоны изменения толщины МДП-затвора ( $d_{\text{In}_2\text{O}_3} = 0,15; 0,20$  и  $0,25$  мкм) и защитного диэлектрика ( $d_2 \text{SiO}_2 = 0$  и  $0,4$  мкм) определяются нашими технологическими возможностями.



**Рис. 10. Спектры модуля ФПУ с просветленным с обеих сторон кремниевым кристаллом и МДП-структурой с вакуумным зазором ( $d_a$ ) 5, 6 и 7 мкм между ними:**  
 а — на диапазон 1,5 мкм; б — на диапазон 2,7 мкм;  
 1 — спектр отражения просветленного с обеих сторон кремниевом кристалла; 2 — спектры отражения МДП-структуры с толщиной полевого электрода МДП-структуры  $d_{\text{In}_2\text{O}_3} = 0,20$  мкм и толщиной слоя защитного диэлектрика  $d_2 = 0,4$  мкм

Проведенные расчеты показывают, что спектры отражения имеют сложную структуру, обусловленную интерференцией в зазоре гибридного модуля ИК ФПУ. Среднее значение квантовой эффективности составит 0,3—0,5 в диапазоне 1,5—2,2 мкм, тогда как в диапазоне 2,5—3 мкм можно обеспечить квантовую эффективность не ниже 0,6—0,8. Необходимо отметить, что точно контролировать величину зазора в гибридном модуле технически невозможно. Поэтому для спектрального диапазона 1—2,5 мкм, а также для спектрометрических приборов предпочтительнее вариант с прямой засветкой элементов.

В ряде задач необходимо иметь более высокое временное разрешение. Основным фактором, ограничивающим минимальное время накопления и время считывания фотосигналов с линейки ПЗИ-элементов в устройство считывания (см. рис. 9), является то, что во время считывания строки включается дополнительное время считывания информации со строки ПЗИ-элементов (время от переднего фронта импульса  $\Phi_{pr}$  до заднего фронта импульса  $\Phi_d \sim 15$ —20 мкс).

В настоящее время проводятся испытания кремниевого мультиплексора, в котором путем формирования дополнительных аналоговых ячеек хранения операцию удастся разделить на считывание сигналов с ПЗИ-фотоприемных элементов и последовательный вывод сигналов на общую шину считывания. Оптимизация технологии, топологии фотоприемных ячеек и топологии кремниевого мультиплексора позволила снизить входную емкость ячейки ФПУ с 1,8 до 0,65 пФ для ПЗИ-фотоприемника с размерами  $38 \times 38$  мкм. При тактовой частоте считывания фотосигналов 6—8 МГц минимальное время считывания строки уменьшается до 30—40 мкс, а уровень собственных шумов до 300—400 электронов. На основе этого мультиплексора разрабатывается линейчатое ИК ФПУ на 1536 элементов, состоящее из четырех стыкуемых модулей.

#### **Фотоэлектрические характеристики ФПУ формата $1 \times 384$**

Экспериментально измерены параметры гибридного модуля ФПУ формата  $1 \times 384$  при засветке через подложку кремниевого мультиплексора [20]. В качестве источника излучения использовалось АЧТ с температурой полости 573 К, уровень комнатного фона с охлаждаемой апертурной диафрагмой в виде узкой щели  $2 \times 13$  мм, расположенной на расстоянии 11 мм от ПЗИ-элементов,  $\approx 2 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>.

При времени накопления 10 мс теоретические расчеты в этих условиях дают  $D^* \approx 5,4 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>

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

**Быстродействующий ИК-спектрограф (0,5—3,0 мкм) на основе гибридного модуля 1×384 InAs**

Использование ФПУ линейчатого типа позволяет создавать быстродействующие спектрографы, с помощью которых за короткое время (0,2—50 мс) может быть записан спектр излучения или пропускания исследуемого объекта [21].

Спектрофотометры такого типа хорошо известны и широко применяются для видимого диапазона длин волн. Создание таких приборов для ближнего ИК-диапазона (1—3 мкм), характерного для валентных колебаний многих известных молекул и молекулярных комплексов, сдерживается отсутствием многоэлементных ФПУ для этого диапазона.

**Спектрометрический модуль.** Фоточувствительная линейка для спектрометрического модуля содержит однорядную линейку из 384 МДП-конденсаторов, расположенных с шагом 25 мкм, с фоточувствительной областью, имеющей размеры 17×300 мкм. Для улучшения частотно-контрастной характеристики ФПУ зазоры между фотоприемниками защищены металлическим экраном (Ti). Контактные площадки для подключения к мультиплектору расположены с двух сторон с шагом 50 мкм.

Кремниевый мультиплексор обеспечивает возможность считывания фотосигналов как с МДП-фотоприемников, так и с фотодиодов. Фоточувствительные элементы работают в режиме неравновесного обеднения, считывание сигнала производится одновременно со всех элементов прямой инжекцией заряда в устройство ввода кремниевого мультиплектора. Вывод считанных сигналов осуществляется последовательно на один выход.

Спектрометрический модуль собирается методом групповой холодной сварки из фотоприемной линейки и двух кремниевых мультиплексоров. Для этого на линейке и на мультиплексоре изготавливались индиевые столбики высотой 5—7 мкм. Соб-

ранный модуль устанавливается в заливной вакуумный криостат с угольным геттером. Ниже приведены основные параметры криостата.

Объем жидкого азота, л.....	0,2
Теплоприток, Вт.....	0,52
Время непрерывной работы без дозаправки азотом, ч.....	$\geq 10$
Температура платформы, К.....	80±2
Время выхода на режим, мин.....	10
Масса (без азота), кг.....	1,2
Габаритные размеры, мм.....	104×83×155
Расстояние от ФПУ до наружной поверхности окна, мм.....	12±1
Максимальное число электрических выводов.....	32
Расчетное время удержания вакуума в криостате, лет, не менее.....	11

Для управления работой спектрометрического модуля, считывания сигнала с элементов и их передачи в персональный компьютер (ПК) разработан и изготовлен оригинальный электронный блок, подключаемый к ПК через порт USB 2.0. Блок состоит из двух частей — аналоговой и интерфейсной. Питание блока осуществляется от порта USB. Потребляемая мощность — не более 1 Вт. Для оцифровки информационных сигналов используется 12-разрядный АЦП AD9235 фирмы Analog Devices с максимальной частотой выборки 20 МГц. Обмен с ПК осуществляется через порт USB 2.0 контроллером CY7C 68013A. Работа контроллера в режиме High Speed позволяет реализовать скорость обмена до 4200 спектр/с. Минимальное время накопления фотосигналов равно 0,23 мс. Предусмотрена возможность кратного увеличения этого времени до 128 раз. Реально максимальное время накопления ограничивается величиной фонового потока и равно примерно 20 мс. При времени накопления 10 мс были проведены измерения обнаружительной способности. В составе прибора получено среднее значение  $D^* \approx 1,5 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup> и лишь несколько элементов имели избыточные шумы, их  $D^*$  не хуже  $0,5 \cdot 10^{12}$  см·Гц<sup>1/2</sup>·Вт<sup>-1</sup>. Динамический диапазон — не менее 1000. В качестве спектрального прибора используется монохроматор-спектрограф MS2004I фирмы Solar ТП (Минск, Беларусь), управляемый от ПК через интерфейс RS-232. Предусмотрены выбор по команде от ПК одной из четырех предварительно установленных решеток, управление углом поворота решетки (длиной волны), шириной входной щели от 0 до 2 мм с шагом 0,5 мкм. При работе с решеткой 400 шт/мм спектрограф имеет рабочий диапазон длин волн 1135—3400 нм. Обратная линейная дисперсия на выходе монохроматора 12,34 нм/мм на длине волны в угле блеска решетки 1700 нм, что позволяет получить спектральное разрешение 0,31 нм на элемент. При этом одновременно регистрируемый

ФП модулем диапазон длин волн равен 118 нм. При выборе решетки 1200 шт./мм рабочий диапазон смещается в сторону коротких длин волн и становится равным 400—1200 нм. Внешний вид спектрометра, состоящего из монохроматора — спектрографа и спектрометрического ФПУ, показан на рис. 11, а.

**Программное обеспечение.** Специализированное программное обеспечение позволяет:

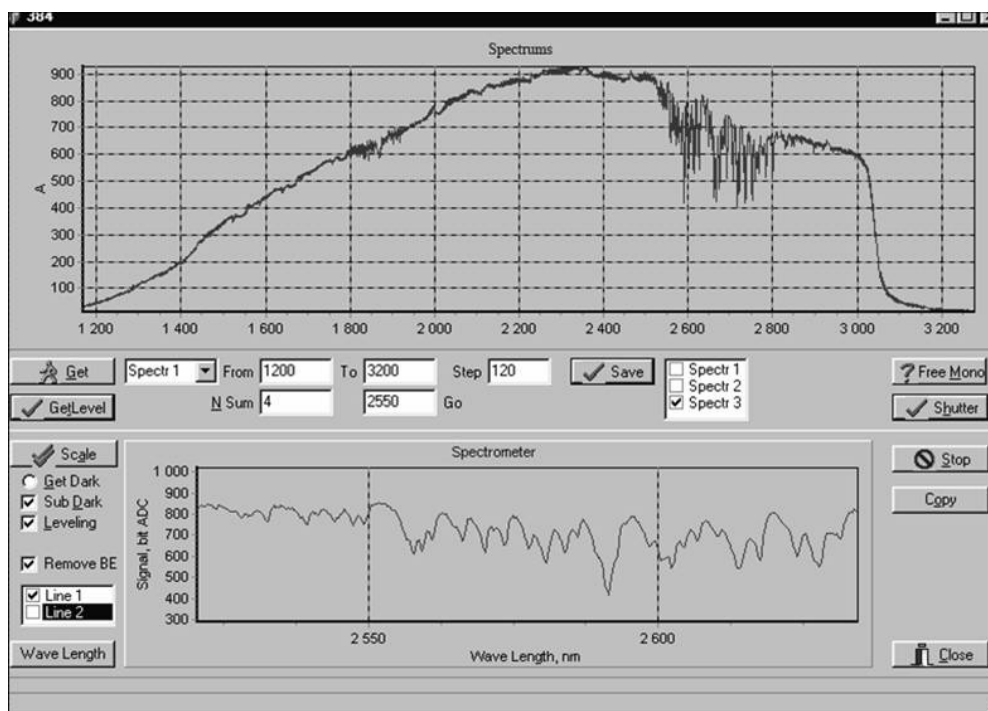
- выводить на монитор текущие значения сигнала на элементах линейки;
- суммировать отдельные сканы для увеличения отношения сигнал/шум;
- управлять углом поворота решетки (центральной длиной волны);

- управлять шириной входной щели;
- преобразовывать номера элементов фотоприемной линейки в длину волны при различных углах поворота решетки;
- измерять обзорные спектры, комбинируя фрагменты, полученные при различных углах поворота решетки;
- вычислять отношение двух спектров (спектр пропускания);
- создавать каталог спектров на жестком диске и дискетах.

Вид окна программы Spectrums 384 показан на рис. 11, б.



а



б

Рис. 11. Внешний вид спектрографа (а) и окна программы Spectrums (б)

### Заключение

Спектральный диапазон 2,9—3,5 мкм имеет ряд преимуществ перед диапазоном 5—12 мкм.

1. Контрастность изображения в диапазоне до 2,9—3,5 мкм существенно выше, чем в диапазоне 5—12 мкм. Требования к зарядовой емкости устройств считывания и, следовательно, к измерительному каналу тепловизионных систем в коротковолновом диапазоне на 4—8 двоичных разрядов меньше, чем в среднем и дальнем ИК-диапазонах, что упрощает проблемы считывания и обработки видеоизображений.

2. Температурное разрешение тепловизора ТКВр-ИФП "СВИТ" на основе InAs ПЗИ-элементов практически не уступает лучшим тепловизионным системам в среднем и дальнем ИК-диапазонах. Высокая временная стабильность созданных нами на основе InAs ПЗИ-элементов тепловизионных систем различного назначения (ИК-спектрометр, тепловизор, тепловизионный микроскоп) обеспечивает возможность за счет суммирования кадров значительно улучшить их чувствительность. Так, например, при эффективной кадровой частоте 1—10 кадр/с NETD тепловизора ТКВр-ИФП "СВИТ" ~ 5—8 мК, а для крупномасштабных объектов не хуже ~ 2—3 мК, т. е. лучше, чем температурное разрешение известных по литературным источникам тепловизоров, чувствительных в диапазоне 5—12 мкм.

3. Для ИК-микроскопии использование коротковолнового диапазона обеспечивает лучшее пространственное разрешение. Тепловизионный микроскоп на основе гибридной микросхемы матричного фотоприемного устройства InAs 128×128, с шагом элементов 50 мкм в диапазоне длин волн 2,5—3,1 мкм при 10-кратном оптическом увеличении позволил получить пространственное разрешение 3,5 мкм при использовании объектива с фокусным расстоянием 15 мм. Достигнутое температурное разрешение составляет 0,2 и 0,015 К для объектов, имеющих температуру 300 и 450 К, соответственно.

4. В описанных выше приборах используется азотный заливной криостат. Возможна конфигурация тепловизора с газовой криогенной машиной. Ведутся работы по реализации приборов на основе InAs, HgCdTe ПЗИ-элементов в диапазоне 2,9—3,5 мкм с термоэлектрическим холодильником. На наш взгляд, принципиальных преимуществ неохлаждаемые ИК ФПУ перед ИК ФПУ с термоэлектрическим охлаждением не имеют, так как для всех неохлаждаемых ИК ФПУ, например на основе микромеханических болометров, необходимы вакуумированный корпус и стабилизация температуры подложки приемников с использованием термоэлектрического холодильника.

5. Реализована малоформатная (8×8) матрица для регистрации импульсных оптических сигналов с энергией  $8 \cdot 10^{-17}$  Дж/элемент.

6. На основе гибридного линейчатого модуля формата 1×384 разработан быстродействующий ИК-спектрограф (0,5—3,0 мкм) DIMS-384, обеспечивающий регистрацию спектров с временем 0,1—0,2 мс и спектральным разрешением до ~0,3 нм/элемент. При фиксированном положении дифракционной решетки регистрируемый диапазон длин волн ~120 нм. Данный спектрофотометр, созданный при поддержке фонда Бортника, с успехом применяется в ИФП и ИХКиГ СО РАН.

### Литература

1. Woolaway J. New sensor technology for the 3-to 5  $\mu\text{m}$  imaging band//Photonics spectra, February. 1991. P. 113.
2. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
3. Таубкин И. И., Трищенко М. А. Предельные чувствительность и информативность тепловизоров и других оптико-электронных преобразователей изображения//Оптический журнал. 1996. № 6. С.18—41.
4. Ли И. И. Анализ зависимости температурного разрешения тепловизионных систем от зарядовой емкости устройства считывания//Автоматика. 2001. № 2. С. 32.
5. Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. и др. Матричные фотоприемные устройства инфракрасного диапазона. Гл. 1 "Фотоприемники зарядовой инжекции на арсениде индия". — Новосибирск: Наука, 2001.
6. Ли И. И., Базовкин В. М., Ефимов В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Половинкин В. Г., Царенко А. В. Многоэлементные гибридные ИК-фотоприемные устройства на основе приборов с зарядовой связью. Часть 1. Принципы считывания сигналов //Автоматика. 2007. № 4. С. 25.
7. Ли И. И., Базовкин В. М., Ефимов В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Половинкин В. Г., Царенко А. В. Многоэлементные гибридные ИК-фотоприемные устройства на основе приборов с зарядовой связью. Часть 2. Тепловизионные системы с элементами на InAs//Там же. С. 36.
8. Ллойд Дж. Системы тепловидения. — М.: Мир, 1978. С. 414.
9. Черных В. В., Егорова Е. В., Беленький В. Я., Дружинин И. Б. Возможности термографии в хирургии катаракты. Современные технологии катарактальной и рефракционной хирургии – 2006//Сб. науч. статей по матер. VII междунар. науч.-практ. конф. Москва, 26—28 октября, 2006.
10. Воронцов С. С., Забайкин В. А., Пикалов В. В., Третьяков П. К., Чугунова Н. В. Исследование структуры факела водорода в сверхзвуковой высокоэнтальпийной струе воздуха//ФГВ. 1999. Т. 35. № 5. С. 3.
11. Cherkassky V. S. et al. Imaging techniques for a high-power THz free electron laser//Nuclear Instr. And Methods in Physics Research A. 543. 2005. P.102.
12. Vainer B. G., Kataev G. N., Kuryshev G. L. Application of the narrow spectral range InAs-FPA-based IR camera for the investigation of the interface voids in silicon wafer bonding//J. Cryst. Growth, 2000. V. 210. No 1—3. P. 351.
13. Базовкин В. М., Гузев А. А., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Ларшин А. С., Половинкин В. Г. Тепловизионный микроскоп// Прикладная физика. 2005. № 2. С. 97.
14. Физические величины: Справочник/Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991.

15. Микроскопы/Под ред. Н. И. Полякова. — Л.: Машиностроение, 1969.

16. *Kuryshv G. L., Polovinkin V. G.* Differential method of instrument resolution enhancement//Proceedings of the second IASTED International Multi-conference Automation, Control, and Applications (ACIT-ATA). June 20—24. — Novosibirsk, Russia. P. 75.

17. *Ли И. И., Курьшев Г. Л.* Устройство считывания с МДП-фотоприемников: Пат. 2282270. Приоритет от 11.04.2005 г.

18. *Ли И. И., Базовкин В. М., Валишева Н. А., Гузев А. А., Ефимов В. М., Ковчавцев А. П., Курьшев Г. Л., Половинкин В. Г.* Фотоприемное устройство на основе матрицы МДП ИК-фотодиодов на InAs для регистрации импульсных оптических сигналов//Прикладная физика. 2007. № 2. С. 68.

19. *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.

20. *Базовкин В. М., Валишева Н. А.* и др. Гибридное фотоприемное устройство на основе линейки  $1 \times 384$  InAs МДП-структур для спектрометрических применений//Прикладная физика. 2003. № 6. С. 85.

21. *Азам Р., Башара Н.* Эллипсометрия и поляризованный свет. — М.: Мир, 1981.

22. *Базовкин В. М., Половинкин В. Г.* и др. Фотоэлектрические свойства спектрометрического модуля  $1 \times 384$  InAs в составе быстродействующего ИК-спектрометра: Матер. 9-й конф. "Арсенид галлия и полупроводниковые соединения группы III—V". — Томск, 3—5 октября 2006. С. 416.

Статья поступила в редакцию 9 октября 2008 г.

## Ultimate parameters of multielement hybrid MOS InAs IR FPA and devices based of them

*G. L. Kuryshv, I. I. Lee, V. M. Bazovkin, N. A. Valisheva, A. A. Guzev, V. M. Efimov, A. P. Kovchavtsev, V. G. Polovinkin, A. S. Stroganov*  
A. B. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

*Results of experimental investigation of various linear and matrix hybrid modules and IR systems (a thermography system, IR microscope, and fast spectrograph) based on InAs CID devices are presented.*

PACS: 85.60.Gz

УДК 621.315.5

## Фоточувствительные свойства структур ZnTe/CdTe/HgCdTe

*А. А. Гузев, В. С. Варавин, С. А. Дворецкий, А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курьшев, И. И. Ли, З. В. Панова, Ю. Г. Сидоров, М. В. Якушев*  
Институт физики полупроводников СО РАН им. А. В. Ржанова, г. Новосибирск, Россия

*Представлены результаты исследования многослойной системы на основе эпитаксиальной пленки HgCdTe с тонкими слоями CdTe, ZnTe. Структуры характеризуются отсутствием гистерезиса, низкой плотностью встроенного заряда и плотностью поверхностных состояний  $N_{ss} < 3 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2} \cdot \text{эВ}^{-1}$ . Такая система близка по ряду характеристик к структурам металл—диэлектрик—полупроводник (МДП) и представляется перспективной для создания многоэлементных ИК ФПУ на основе КРТ.*

PACS: 73.40.QV

### Введение

Известно использование МДП-структур на основе InAs, HgCdTe в качестве фоточувствительных элементов спектрального диапазона 3—5 мкм [1]. Основной проблемой является задача создания качественной границы раздела диэлектрик—полупроводник и диэлектрик, обеспечивающей работу МДП-структуры в режиме неравновесного обеднения. Однако для выращивания качественно-

го подзатворного диэлектрика (двуокись и нитрид кремния) требуется проводить процесс с нагревом подложек до температуры выше 180 °С, что резко ухудшает свойства фоточувствительного слоя. Представляется перспективным использование вместо диэлектрика широкозонных полупроводниковых пленок  $A_2B_6$  (CdTe, ZnTe), выращенных на поверхности слоя КРТ без контакта с атмосферой.