

1. Chen Y. P., Sivanathan S., Faurie J. P.// J. Electron. Mat. 1991. V. 22. P. 951.
2. Zanatta J. P., Ferret P., Duvaut P., Isselin S., Rolland G., Theret G., Million A.// J. of Cryst. Growth 184-185. 1998. P. 1297—1301.
3. Zanatta J. P., Ferret P., Theret G., Million A., Wolny M., Chamonal J. P., Destefanis G.// J. Electron. Mat. 1998. V. 27. № 6. P. 542—545.
4. Ballet P., Castelein P., Baylet J., Laffosse E., Fendler M., Pottier F., Gout S., Vergnaud C., Ballerand S., Gravrand O., Deplanche J. C., Martin S., Zanatta J. P., Chamonal J. P., Million A., Destefanis G., to be presented in Warsaw// Poland in August 2005. An account will appear on the proc. of SPIE. V. 5957.
5. Destefanis G., Astier A., Baylet J., Castelein P., Chamonal J. P., DeBorniol E., Gravrand O., Marion F., Martin J. L., Million A., Rambaud P., Rothan F., Zanatta J. P.// J. Electron. Mat. 2003. V. 32. № 7. P. 592—601.
6. Badano G., Garland J. W., Sivanathan S.// J. Cryst Growth. 2003. V. 251. P. 571—575.
7. Johs B., Herzinger C. M., Dinan J. H., Cornfeld A., Benson J. D.// Thin Solid Films. 1998. V. 313. P. 137—142.
8. Buell A. A., Pham L. T., Newton M. D., Venzor G. M., Norton E. M., Smith E. P., Varesi J. B., Harper V. B., Johnson S. M., Coussa R. A., De Lyon T. J., Roth J. A., Jensen J. E.// J. Electron. Mat. 2004. V. 33. № 6. P. 662—666.
9. Hannert and Schenk// J. of Cryst. Growth. 1990. V. 101. P. 251.
10. Chen Y. P., Brill G., Campo E. M., Hierl T., M. Hwang J. C., Dhar N. K.// J. Electron. Mat. 2004. V. 33. № 6. P. 498—502.
11. Large improvement in HgCdTe photovoltaic detector performance at LETI, G. Destefanis and J. P. Chamonal, LETI/CEA/Grenoble, France// Journal of Electronic Materials. 1993. V. 22. № 8).
12. New compact staring detectors for MW and LW applications, A. MANISSADJIAN & al.// SPIE, London 2004, [5612-05].

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## HgCdTe large staring arrays at SOFRADIR

*Ph. Tribolet*

SOFRADIR, CHATENAY-MALABRY, France

*G. Destefanis*

LETI/CEA, Grenoble Cedex, France

*The staring array numbers of pixels are larger and larger and offer system solutions in the different IR wavebands. At SOFRADIR, the HgCdTe (Mercury Cadmium Telluride / MCT) material and process, as well as the hybridization technology, have been taken to an even more advanced level of sophistication to achieve these new high performance staring arrays. A lot of technological improvement have been made regarding uniformity of Focal Plan Arrays (FPA), read-out circuits with new functions like the Analog to Digital Conversion (ADC), and finally the reliability of the whole dewar detector and cooler assembly have been drastically increased during these last years. In mid-wave (MWIR) 1280x1024 HgCdTe high performance staring array is presented. Also, development trends for future IR detectors are presented.*

УДК 621.383

## Низкофонное субматричное ФПУ формата 288×32 на основе InSb с цифровым режимом ВЗН

*В. Ф. Чишко, И. Л. Касаткин, И. Д. Бурлаков, А. А. Лопухин,  
В. П. Пономаренко, А. М. Филачёв*

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

*Д. В. Бородин, Ю. В. Осипов*  
ООО "Импекс", Москва, Россия

*В. В. Карпов*  
ОАО «Московский завод «Сапфир»», Россия

*А. М. Крошин*  
ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс», Самара, Россия

*Разработано гибридное субматричное фотоприемное устройство (ФПУ) формата 288×32 элемента с фотодиодными чувствительными элементами на InSb и исследованы*

**пороговые характеристики ФПУ при фоновом потоке  $\Phi \cong 5 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>, уровень темновых токов при различных температурах и характер спектра шума напряжения. Проведено моделирование внешнего цифрового режима временной задержки накопления сигналов (ВЗН) с использованием экспериментальных данных и установлено, что эффективное число ступеней ВЗН не менее 26 и пороговый поток при этом не более  $(3-4) \cdot 10^{-15}$  Вт/эл.**

В последние годы весьма актуальной является задача разработки приборов для дистанционного зондирования Земли в области спектра 3—5 мкм. Такие приборы работают в условиях низких фоновых потоков, лежащих в диапазоне  $(5 \cdot 10^{-7} \div 5 \cdot 10^{-6})$  Вт/см<sup>2</sup>. Для получения максимальной чувствительности используется режим ВЗН, поэтому к ФПУ предъявляются жесткие требования как по уровню темновых токов, так и по характеристикам шума напряжения: его предельной величине и характеру спектра, который определяет эффективность режима ВЗН. Другим важным требованием является получение максимальной квантовой эффективности фотодиода (ФД) матрицы при минимальной фотоэлектрической взаимосвязи между ними. Учитывая эти требования, а также условия эксплуатации на орбите (дрейф вектора скорости бега изображения), был выбран “разреженный” вариант топологии расположения фотодиодов при освещении лицевой стороны субматрицы через окна прозрачности в мультиплексоре (МП).

## Эксперимент

### Мультиплексор

Мультиплексор изготовлен по КМОП-технологии с нормами проектирования 0,8 мкм и обеспечивает покадровое накопление тока матрицы и считывание сигнала на четыре параллельных выхода с тактовой частотой не менее 4 МГц. Он может работать как в режиме конвейерного считывания (rolling), так и в режиме “мгновенной фотографии” (sneer-shot). Для сканирования в МП имеются “окна прозрачности” для ИК-излучения, через которые оно попадает на ФД матрицы. Каждый пиксель МП состоит из емкости накопления ( $C_s = 3 \cdot 10^{-13}$  Ф), согласующего транзистора, истоквого повторителя и тестового транзистора.

### Субматричный фотоприемник

Субматричный фотодиодный приемник изготовлен из InSb *n*-типа марки ИСЭ-2а методом ионной имплантации  $Be^+$  по планарной технологии. Размер фоточувствительной области составлял  $A_F = 40 \times 40$  мкм, а электрической площадки —  $A_E = 56 \times 30$  мкм. Индиевые микростолбики высотой 7 мкм получали химическим травлением термически напыленного индия. Изготовленные по

такой технологии ФД имеют квантовую эффективность не менее 70 % и токовую чувствительность в максимуме не менее 2,5 А/Вт при фронтальном освещении.

### Экспериментальная установка

Измерения проводили на газовой криогенной машине типа Мак-Магон СТИ-CRYOGENICS 22С, обеспечивающей проведение измерений в температурном интервале 20—300 К. Необходимый фоновый поток  $\Phi \cong 5 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> обеспечивался набором “холодных” фильтров совместно с “холодной” диафрагмой с апертурным углом  $2\theta = 20^\circ$ . Точность стабилизации температуры была не хуже 0,1 К.

Аналоговый сигнал с выхода гибридной фоточувствительной микросборки (ГФМС), состоящей из МП и фотоприемника, состыкованных между собой с помощью индиевых микростолбиков, усиливался малошумящим широкополосным предварительным усилителем и оцифровывался аналогоцифровым преобразователем с частотой дискретизации 10 МГц и разрядностью 14 бит.

## Экспериментальные результаты

### Вольт-амперные характеристики

Зависимость тока ФД от обратного смещения измерялась путем подачи на затвор согласующего транзистора напряжения  $U_{com}$  меньшего, чем напряжение на базе МФЧЭ, что соответствует отрицательному смещению  $dU_{com}$  на ФД МФЧЭ. Измерялось также выходное напряжение  $U$  ГФМС при времени накопления  $T_s$ , при котором напряжение на емкости накопления лежит в области постоянства коэффициента передачи [1]. Величина тока  $I$  вычисляется из соотношения:

$$I = CU/kT_s,$$

где  $k$  — коэффициент передачи напряжения с емкости накопления на выход МП ( $k = 0,5$ ).

На рис. 1 представлены обратные ветви ВАХ в бесфоновом режиме и в условиях фоновой облученности  $\Phi = 5 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> при  $T = 77$  К. Видно, что в области оптимальных обратных смещений на затворе согласующего транзистора — (1,16—1,4) В величина темнового тока находится в диапазоне  $I_c = (1,5-3) \cdot 10^{-11}$  А. Фоновый ток, вычис-

ленный как разница двух токов, изображенных кривыми 2 и 1, равен  $I_F \cong 2 \cdot 10^{-11}$  А.

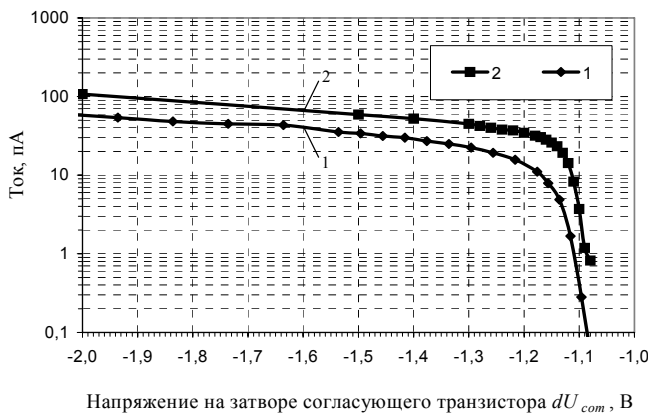


Рис. 1. Зависимость обратного тока от изменения напряжения на затворе согласующего транзистора  $dU_{com}$ : 1 — темновой ток; 2 — ток при фоновом потоке  $\Phi = 5 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>

Очевидно, что уровень темнового тока не позволяет работать в режиме ограничения флуктуациями фонового излучения (ОФ) при  $T = 77$  К.

Для определения температуры ОФ-режима, когда темновой ток на порядок величины меньше фонового, было проведено исследование зависимости его от температуры, результаты которых представлены на рис. 2. Видно, что эта зависимость имеет активационный характер с энергией активации  $W \cong Eg(0)/2$ , что характерно для генерации темнового тока в ОПЗ [2]. При  $T \cong 65$  К темновой ток на порядок величины меньше фонового, и эту температуру можно считать температурой реализации режима ОФ для фонового потока  $\Phi = 5 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>.

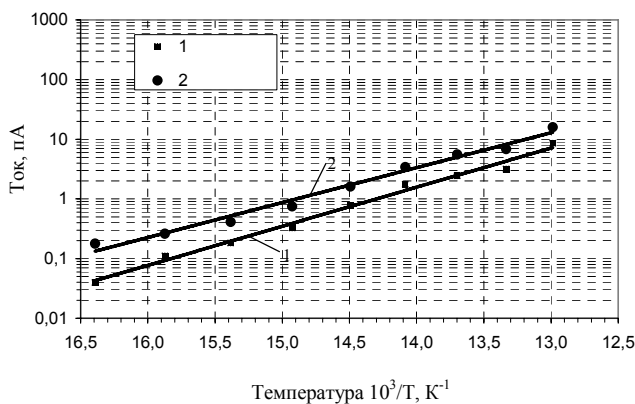


Рис. 2. Зависимость темнового тока от температуры при различных обратных смещениях на затворе согласующего транзистора  $dU_{com}$ , В: 1 — -1,15; 2 — -1,20

### Шумы ГФМС

Среднеквадратичное значение напряжения шума на выходе ГФМС находилось по 32 выборкам и усреднялось по всем пикселям. Измерение напряжения шума проводилось при фоновом потоке  $\Phi = 5 \cdot 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup>. На рис. 3 приведены зависимости шума напряжения от времени накопления при напряжении смещения на затворе согласующего транзистора 1,2 В (кривая 1 — экспериментальные данные) и расчетная зависимость для тока  $I \cong 5 \cdot 10^{-11}$  А.

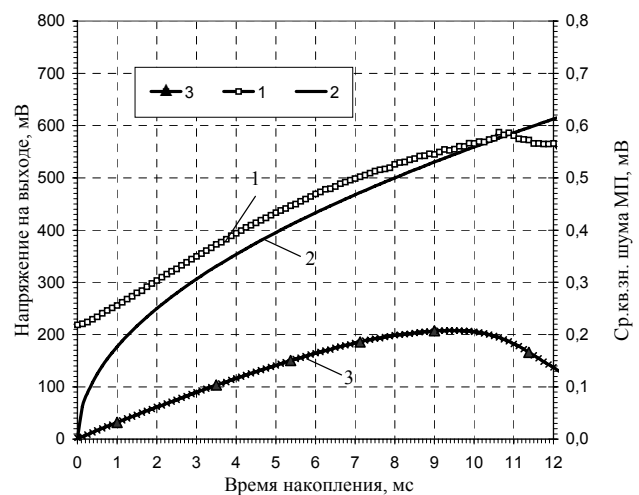


Рис. 3. Зависимость шума напряжения ГФМС от времени накопления:

1, 2 — экспериментальные данные и расчет, соответственно; 3 — сигнал ГФМС от АЧТ

При  $T_s = 0$  наблюдаемый шум является шумом считывания МП, и при  $C_s = 3 \cdot 10^{-13}$  Ф он составляет примерно 400 электрон. При временах накопления  $T_s > (6-7)$  мс наблюдается насыщение в зависимости шума напряжения от времени накопления, связанное с нелинейностью коэффициента передачи при малых напряжениях на емкости накопления.

Кривая 3 на рис. 3 представляет зависимость сигнала ГФМС от АЧТ с  $T = 500$  К от времени накопления, из которой видно, что при больших временах накопления ( $T_s > 10$  мс) передача сигнала имеет нелинейный характер. Спектры шума напряжения, усредненные по всем пикселям ГФМС, для двух смещений на затворе согласующего транзистора приведены на рис. 4, из которого видно, что в области низких частот ( $f < 3-5$  Гц) шум напряжения сильно зависит от обратного смещения на фотодиодах матрицы.



Рис. 4. Спектральное распределение шума напряжения ГФМС при напряжении на затворе согласующего транзистора  $dU_{com} = -1,16$  В (нижняя кривая) и  $dU_{com} = -1,18$  В (верхняя кривая)

**Вольтовая чувствительность и пороговая мощность**

Зависимость вольтовой чувствительности ГФМС в максимуме спектральной чувствительности  $S_{\omega, m}$  от времени накопления в координатах  $\lg S_{\omega, m} = f(T_s)$  представлена на рис. 5 (кривая 1). В координатах  $S_{\omega, m} = f(T_s)$  она линейно возрастает до  $T_s = 6 \cdot 10^{-3}$  с. Используя измеренные зависимости вольтовой чувствительности и напряжения шума от времени накопления, была построена зависимость порогового потока  $P_{\lambda, max}$  от времени накопления, представленная на рис. 5 (кривая 2). Видно, что при максимальном времени накопления в рабочем диапазоне  $T_s = 6$  мс,  $P_{\lambda, max} \cong 2 \cdot 10^{-14}$  Вт/эл, что соответствует удельной обнаружительной способности

$$D_{\lambda, m}^* = \frac{\sqrt{A}}{P_{\lambda, m} \sqrt{2T_s}} \cong 2 \cdot 10^{12} \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}.$$

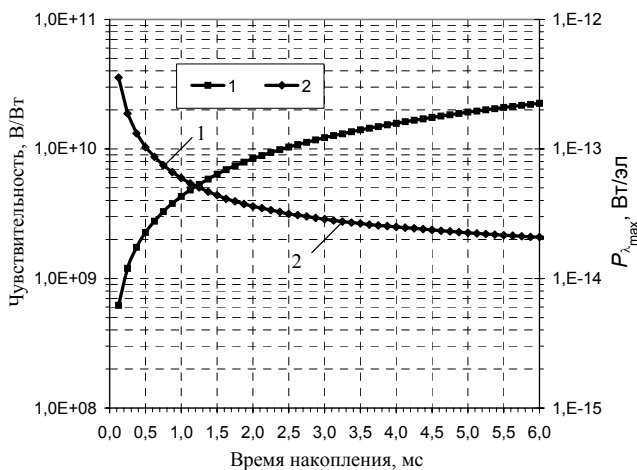


Рис. 5. Зависимость вольтовой чувствительности (1) и пороговой мощности (2) от времени накопления

**Моделирование режима ВЗН**

Учет режима ВЗН производился следующим образом. При времени накопления  $T_s = 1$  мс были записаны 1024 выборки сигнала каждого пикселя. Далее была построена зависимость шума напряжения от числа выборок, по которым рассчитывалась его величина (среднеквадратичного отклонения амплитуды выборки от среднего значения). Найдено, что оптимальное число выборок лежит в диапазоне 16—32. При числе выборок, меньшем, чем 16, играют роль случайные выбросы амплитуды выборки, а при большем, чем 32, — долговременные процессы, формирующие шумы типа "1/f". В дальнейшем для вычисления напряжения шума использовались 32 выборки. Анализ показал, что наличие дефектных элементов в направлении сканирования (суммирования шумов в нашем случае) существенно влияет на конечный результат, и моделирование режима ВЗН по этому критерию (отсутствие дефектных элементов) проводилось по 80 столбцам. Другим важным обстоятельством, обнаруженным в процессе моделирования режима ВЗН, оказалось наличие повышенных шумов на периферийных строках ГФМС и очень сильная их зависимость от величины обратного смещения. Для минимизации влияния этого обстоятельства суммирование шумов начиналось с центральной строки, и шаги суммирования симметрировались относительно центральной строки. Кроме того, напряжение шума каждой строки вычислялось как среднее значение по 80 выбранным пикселям в этой строке. На рис. 6 представлена зависимость пороговой мощности  $P_{\lambda, max}$  от числа  $N$  ступеней ВЗН для двух напряжений обратного смещения  $dU_{com}$  на фотодиодах матрицы в координатах  $\lg P_{\lambda, m} = f(\lg N)$ .

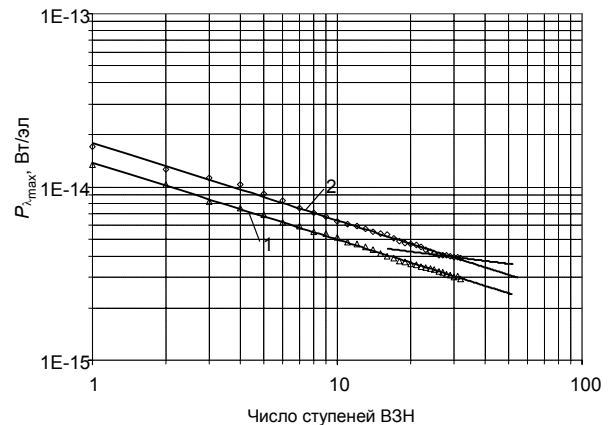


Рис. 6. Зависимость пороговой мощности от числа ступеней ВЗН при различных напряжениях на затворе согласующего транзистора  $dU_{com}$ , В: 1 — -1,16; 2 — -1,18

Видно, что с увеличением числа суммирований пороговая мощность уменьшается как  $P_{\lambda_m} \sim N^{(0,44-0,45)}$  до  $N \cong 20$  при  $dU_{com} = -1,18$  В и до  $N = 32$  — при  $dU_{com} = -1,16$  В, что близко к идеальному закону  $P_{\lambda_m} \sim N^{0,5}$ . Очевидно, что такое отличие в числе шагов ВЗН обусловлено отличием спектрального распределения шума в зависимости от  $dU_{com}$ . При числе суммирований  $N = 32$  пороговая мощность лежит в диапазоне  $P_{\lambda_m} \cong (3-4) \cdot 10^{-15}$  Вт/эл.

#### Л и т е р а т у р а

1. Бурлаков И. Д., Голубков А. В., Дирочка А. И., Касаткин И. Л., Лопухин А. А., Пасеков В. Ф., Пономаренко В. П., Чижко В. Ф. Матричные фотоприемники из антимонида индия для гибридных матричных фотоприемных устройств// Прикладная физика. 2005. № 2. С. 16—21.
2. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир. 2001. Т. 2. С. 54.

Статья поступила в редакцию 11 октября 2006 г.

## InSb 288×32 FPA with digital TDI for low background application

*V. F. Chishko, I. L. Kasatkin, I. D. Burlacov, A. A. Lopukhin,  
V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev*  
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

*D. V. Borodin, Yu. V. Osipov*  
RTK IMPEKS Ltd., Co., Moscow, Russia

*V. V. Karpov*  
SAPFIR Ltd., Co., Moscow, Russia

*A. M. Kroshin*  
GNPRKC "CSKB PROGRESS", Samara, Russia

*Indium antimonide photodiode 288×32 FPA with thick base region for low background application has been developed and fabricated. Photoelectrical properties at background flow  $5 \cdot 10^{-7}$  W·cm<sup>-2</sup> and dark current at various temperatures were investigated.*

УДК 535.247.049.7:621.383.52

## Многоэлементное фотоприемное устройство на основе матрицы МДП ИК-фотодиодов на InAs для регистрации импульсных оптических сигналов

*И. И. Ли, В. М. Базовкин, Н. А. Валишева, А. А. Гузев, В. М. Ефимов,  
А. П. Ковчавцев, Г. Л. Курьшев, В. Г. Половинкин*  
Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

*Разработано и изготовлено фотоприемное устройство (ИК-ФПУ) на основе МДП фотоприемников на автоэпитаксиальном слое InAs формата 8×8 элементов. Показано, что данное ИК-ФПУ обеспечивает определение координаты и времени прихода оптических импульсных сигналов с энергией  $8 \cdot 10^{-17}$  Дж/эл и точностью не хуже 100 нс.*

Задача регистрации координаты и времени прихода слабых импульсных сигналов, необходимых в системах лазерной локации, — одна из самых технически сложных проблем в оптоэлектронике