

Indium antimonide assemblies for hybrid focal plane arrays

I. D. Burlakov, A. V. Golubkov, A. I. Dirochka, I. L. Kasatkin, A. A. Lopukhin,
V. F. Pasekov, V. P. Ponomarenko, V. F. Chishko
ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Indium antimonide photodiode assemblies with thin base region been developed and fabricated. Photoelectrical properties and mechanisms which produce dark current were investigated.

УДК 621.383

Быстродействующее матричное фотоприемное устройство формата 128x128 элементов на основе InSb с покадровым накоплением и функцией дальномера

А. М. Филачев, И. Д. Бурлаков, А. И. Дирочка, И. Л. Касаткин,
А. А. Лопухин, В. Ф. Пасеков, В. Ф. Чишко

ФГУП «Научно-производственное объединение "Орион"» — государственный научный центр
Российской Федерации, Москва, Россия

В. Н. Приходько, Л. З. Сюняев

ФГУП «Научно-производственное объединение "Государственный институт прикладной оптики"»,
г. Казань, Россия

А. К. Панфиленко

НП ООО "Микротелеком", г. Минск, Белоруссия

Изготовлен и исследован макет матричного фотоприемного устройства из антимониды индия на область спектра 3—5 мкм. Фотоприемное устройство состоит из смотрящей матрицы, состыкованной на индиевых микростолбиках с мультиплексором с покадровым накоплением, и микрокриогенной системы Сплит-Стирлинг. При частоте кадров 800—1000 Гц пороговая мощность не более $7 \cdot 10^{-13}$ Вт/эл. и динамический диапазон — 60—80 дБ.

Оптикоэлектронные системы (ОЭС) второго поколения ИК-диапазона на основе смотрящих матриц имеют по сравнению с ОЭС первого поколения лучшие массогабаритные показатели и меньшее энергопотребление в первую очередь за счет отсутствия системы оптического сканирования. Кроме того, фотоприемные устройства со смотрящими матрицами имеют лучшие пороговые характеристики за счет большого времени накопления фототока, что улучшает тактико-технические данные ОЭС.

На область спектра 3—5 мкм разрабатываются как монокристаллические смотрящие матрицы на основе силицида платины, так и гибридные на основе антимонида индия и КРТ, полупроводников с собственной фотопроводимостью [1]. Несмотря на очевидные технологические преимущества матриц из PtSi (совместимость с кремниевой технологией, монокристаллический вариант), их область применения сильно сужается из-за низкой квантовой эффективности, что не позво-

ляет одновременно реализовать высокую чувствительность и быстродействие.

Гибридная смотрящая матрица — это двухкристаллическая сборка, состоящая из матричного фотоприемника на фотодиодах из InSb или КРТ и кремниевой ИС обработки и считывания сигнала с матричного фотоприемника (мультиплексора), соединенных чаще всего с помощью индиевых микростолбиков. Высокая квантовая эффективность этих полупроводников и приемлемый уровень фоновых токов позволяют одновременно проводить накопление фотосигнала в МП с каждого пикселя матрицы, что обеспечивает высокое быстродействие и чувствительность. Однако реализация гибридного варианта требует решения ряда сложных технологических проблем, основными из которых являются: разработка матричного фотоприемника для детектирования ИК-излучения при освещении с тыльной стороны, причем его конструкция должна обеспечивать максимальную компенса-

цию термомеханических напряжений, возникающих за счет разности коэффициентов термического расширения приемника и МП; разработка технологии создания индиевых микро-столбиков и стыковки; разработка МП с широкими функциональными возможностями, обеспечивающего обработку сигнала с элементов матрицы без ухудшения их характеристик.

Ниже излагаются результаты разработки гибридных фокальных матриц на основе антимонида индия, конструкция и некоторые фотоэлектрические и эксплуатационные характеристики ФПУ.

Матричный фотоприемник

При гибридном варианте построения матричного фотоприемного устройства (МФПУ) неизбежно возникают термомеханические напряжения при охлаждении до рабочей температуры, связанные с различием коэффициентов термического расширения (КТР) МФП и МП. Эти напряжения действуют на индиевые микро-столбики, и поэтому конструкция МФП должна обеспечивать их максимальное уменьшение. Кроме того, сама толщина базовой области, в которой происходит поглощение излучения, должна быть порядка 15–20 мкм [2].

Одновременное удовлетворение этих требований привело к разработке нескольких способов реализации гибридного варианта МФПУ. В работе [3] описан способ, когда сначала происходит стыковка на индиевых микро-столбиках МП и МФП с толстой базовой областью с дальнейшим уменьшением толщины до требуемой величины. Такой подход требует механико-химической обработки вместе с МП, что приводит к необходимости нанесения дополнительных покрытий для придания механической прочности и защиты сборки. Другим недостатком такого подхода является то, что возникающие термомеханические напряжения полностью приложены к индиевым микро-столбикам, это может приводить к нарушению контакта, что особенно критично для больших форматов.

Нами разработан вариант МФП с тонкой базовой областью, применение которого в значительной степени устраняет влияние термомеханических напряжений на индиевые микро-столбики и, кроме того, в этом варианте в процессе изготовления возможно создание различных структур на поверхности базовой области, уменьшающих оптическую взаимосвязь без заметного уменьшения квантовой эффективности, предложенных в [4].

Разработанный МФП (рис. 1) содержит несущую кремниевую подложку с просветленными на область 3–5 мкм поверхностями, на которой с помощью криогенного клея закреплен матричный фотодиодный приемник с тонкой базовой областью n -типа.

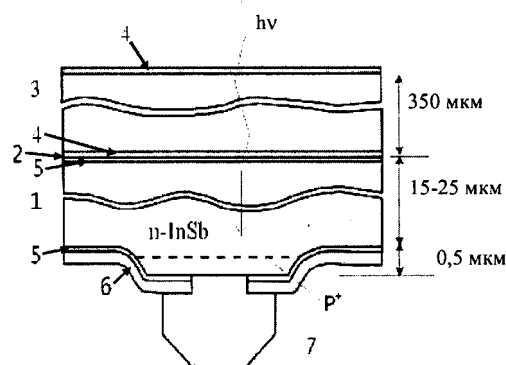


Рис. 1. Структура МФП:

1 — базовая область n -InSb; 2 — промежуточный клеевой слой; 3 — Si-подложка; 4 — просветляющее покрытие; 5 — анодный окисел; 6 — SiO; 7 — In-микро-столбик

Поскольку площадь клеевого соединения примерно на порядок превышает площадь индиевых микро-столбиков, то и величина термомеханических сдвиговых усилий на них гораздо меньше, что повышает надежность стыковки МП и МФП.

Технология изготовления МФП включает операции изготовления их с толстой базовой областью, аналогичные описанным в работе [5], на пластинах n -типа диаметром 25–30 мм с последующей приклейкой с помощью термостабильного клея фронтальной стороной на сапфировую подложку соответствующего диаметра. Следующий этап содержит операции механической шлифовки и полировки до толщины 25–35 мкм. Финишная обработка поверхности базовой области производится в свободном травлении, при этом удаляется слой толщиной не менее 10 мкм. На этом этапе методом двухсторонней фотолитографии возможно создание либо металлической сетки, либо мезаструктур, расположенных соответствующим образом по отношению к пикселям на фронтальной стороне [4] с последующим нанесением пассивирующего покрытия как для уменьшения скорости поверхностной рекомбинации, так и просветления. Финишными этапами являются переклейка с промежуточной сапфировой подложки на просветленную кремниевую подложку криогенным клеем, создание индиевых микро-столбиков путем термического напыления индия и стандартных операций фотолитографии, а также резка пластины на отдельные МФП. Проведенные испытания на термоциклирование при скорости охлаждения $1 \text{ K} \cdot \text{с}^{-1}$ для матриц формата 288×384 с шагом пикселей 35 мкм, состыкованных с МП, не выявили каких-либо существенных деградиационных явлений. Некоторые характеристики таких МФП изложены в [2].

Мультиплексор

В работе использовался КМОП МП формата 128×128 элементов с шагом пикселей 35 мкм, с нормами проектирования 1,2 мкм.

По функциональному назначению МП состоит из аналоговой и цифровой частей. Аналоговая часть обеспечивает интегрирование фототока с пикселей матричного фотоприемника и его передачу на выход и состоит из матрицы ячеек накопления формата 128×128 и 256 истоковых повторителей. Ячейка содержит транзистор для тестирования работоспособности МП, согласующий транзистор, работающий в подпороговом режиме, емкость накопления $C1=0,8$ пФ и транзистор, работающий в ключевом режиме и обеспечивающий как передачу напряжения с емкости $C1$ на истоковый повторитель, так и "обнуление" напряжения на емкости $C1$ после считывания. Как видно из изложенного, для считывания принят метод прямой токовой инжекции как самый простой в реализации.

Основным требованием к аналоговой части является передача без ухудшения отношения сигнал/шум с фотодиода матричного ФП. Характеристики согласующего транзистора в подпороговом режиме являются определяющими в выполнении этого требования. Измерения показали [2], что в диапазоне токов $I = (10^{-12} - 10^{-8})$ А дифференциальное сопротивление канала R_k и ток I связаны соотношением $R_k = mkT/I$ ($m = 1,2 - 2$), что обеспечивает коэффициент инжекции $\eta \approx 1$ при фоновом токе диода $I_d \approx (2 - 5) \cdot 10^{-9}$ А и дифференциальном сопротивлении фотодиодов МФП $R_d = 10^9$ Ом.

Цифровая часть МП обеспечивает его работу в режиме непрерывного считывания сигналов с емкостей накопления (тепловизионный режим) и работу в режиме дальномера, когда считывание производится с центральной зоны формата $4N \times 2V$ и состоит из горизонтального (Н) регистра (дешифратор столбцов) и вертикального регистра (счетчик столбцов). Для обеспечения максимальной частоты кадров как в тепловизионном режиме, так и режиме дальномера считывание информации производится на четыре выхода при максимальной частоте такта не менее 4 МГц. Блок задания режимов формирует необходимую диаграмму импульсных напряжений для работы цифровой части и переключение режимов работы в течение одного кадра, причем при работе в режиме дальномера предусмотрен режим закорачивания всех фотодиодов матрицы на время, задаваемое внешней схемой управления. Напряжение питания МП равно 5 В, рассеиваемая мощность — не более 30 мВт. МП содержит металлизированные площадки для формирования индиевых микростолбиков.

Конструкция МФПУ

Вакуумная конструкция разработана для охлаждения микрокриогенной системой (МКС) Сплит-Стирлинга производства НТК "Криоген-

ная техника" (г. Омск) второго класса. Вакуумный корпус состоял из металlostеклянного держателя диаметром 12 мм, на боковую стенку которого нанесены токоведущие дорожки, металлокерамического узла, с помощью которого осуществлялся вывод из холодной зоны электрических сигналов, и колпака с окном из просветленных на область 3—5 мкм германия или сапфира. На рис. 2 представлен общий вид МФПУ, состыкованного с МКС типа МСМГ-3А-0,6/80. Фоточувствительная сборка, состоящая из состыкованных на индиевых микростолбиках МП и МФП, приклеивалась на сапфировый растр, который в свою очередь приклеивался на металlostеклянный держатель. На сапфировом растре монтировались "холодная" диафрагма с апертурным углом $2\theta = 40^\circ$ и два термодатчика для управления работой МКС. Количество выводов из холодной зоны не превышает 30 шт.

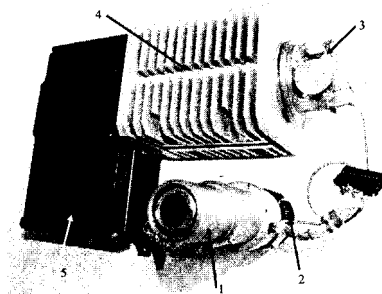


Рис. 2. Общий вид МФПУ, состыкованного с МКС:

- 1 — защитный корпус; 2 — радиатор охладителя;
- 3 — компрессор; 4 — радиатор компрессора;
- 5 — блок управления МКС

Фотоэлектрические характеристики

Измерение фотоэлектрических характеристик проводилось на экспериментальном стенде, состоящем из АЧТ с $T = 500$ К, 14-разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) с частотой дискретизации 10 МГц и собственным напряжением шума не более 10^{-4} В, а также малошумящих источников питания МП. Оцифрованный аналоговый сигнал с выхода МФПУ обрабатывался с помощью персонального компьютера Pentium 166. Измерение сигнала проводилось по всем элементам в масштабе реального времени с числом выборок не менее 16 с наименьшим усреднением по каждому элементу. Напряжение шума вычислялось как среднеквадратичное значение по каждому элементу по результатам не менее 32 выборок.

На рис. 3 представлены зависимость вольтовой чувствительности S_u в $\lambda_{\max}$, усредненной по всем пикселям, от времени накопления при различных значениях смещения на затворе транзистора $MP2 \Delta U_{ВМА} = (U_{ВМА} - U_{ВССМ})$, при которых достигается максимальная однородность

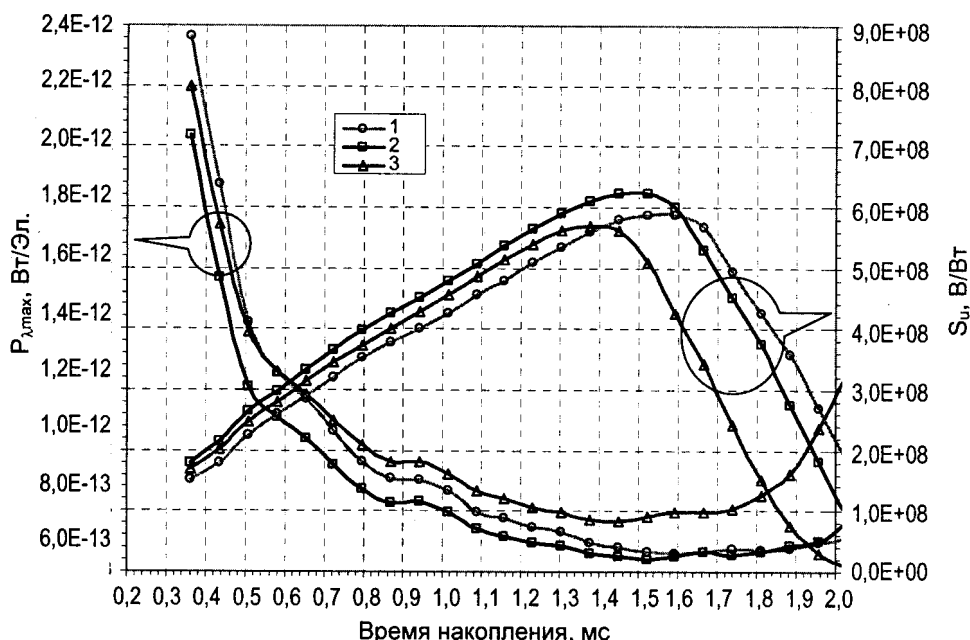


Рис. 3. Зависимости вольтовой чувствительности S_u и минимально обнаруживаемой мощности $P_{\lambda\max}$ от времени накопления при нескольких значениях ΔU_{BMA} , В:
1 — (-1,22); 2 — (-1,37);
3 — (-1,27)

распределения S_u по всем пикселям МФП. Видно, что в области времен накопления $T_A = (0,4-1,4) \cdot 10^{-3}$ с S_u линейно зависит от T_A , уменьшение S_u при $T_A > 1,4 \cdot 10^{-3}$ с обусловлено тем, что часть пикселей, имеющих большую чувствительность, полностью разрежают емкость накопления и не дают вклад в среднее значение S_u . Дисперсия распределения вольтовой чувствительности не превышала $\sigma(S_u) < 15\%$.

Средняя величина фонового тока I_F при оптимальном напряжении смещения оказалась равной $I_F = 2,5 \cdot 10^{-9}$ А.

На рис. 4 представлены результаты измерения напряжения шума, усредненного по всем пикселям, в зависимости от времени накопления. Кривая 1 соответствует напряжению шума V_{N1} при отсутствии обратного смещения на фото-

диодах матрицы; кривая 2 — напряжению шума V_{N2} при оптимальном смещении $\Delta U_{BMA} = -1,27$ В. Предполагая, что шумы при $\Delta U_{BMA} = 0$ В и $\Delta U_{BMA} = -1,27$ В некоррелированы, из экспериментальных данных была вычислена величина напряжения шума МФП $V_{N3} = (V_{N2}^2 - V_{N1}^2)^{1/2}$, представленная кривой 3. Теоретическая зависимость напряжения шума V_{N4} при разряде емкости C1 фоновым током I_F , вычисленная из соотношения $V_{N4} = (qI_F T_A)^{1/2} \cdot (C1)^{-1} \cdot K$, представлена кривой 4 (K — коэффициент передачи [2]). Видно, что экспериментально измеренная величина напряжения шума при $T_A = 10^{-3}$ с в (1,5–2) раза превышает вычисленную, что, возможно, связано с влиянием посторонних источников в процессе измерений. Измеренная дисперсия напряжения шума V_{N2} равна $\sigma(V_{N2}) \approx 25\%$.

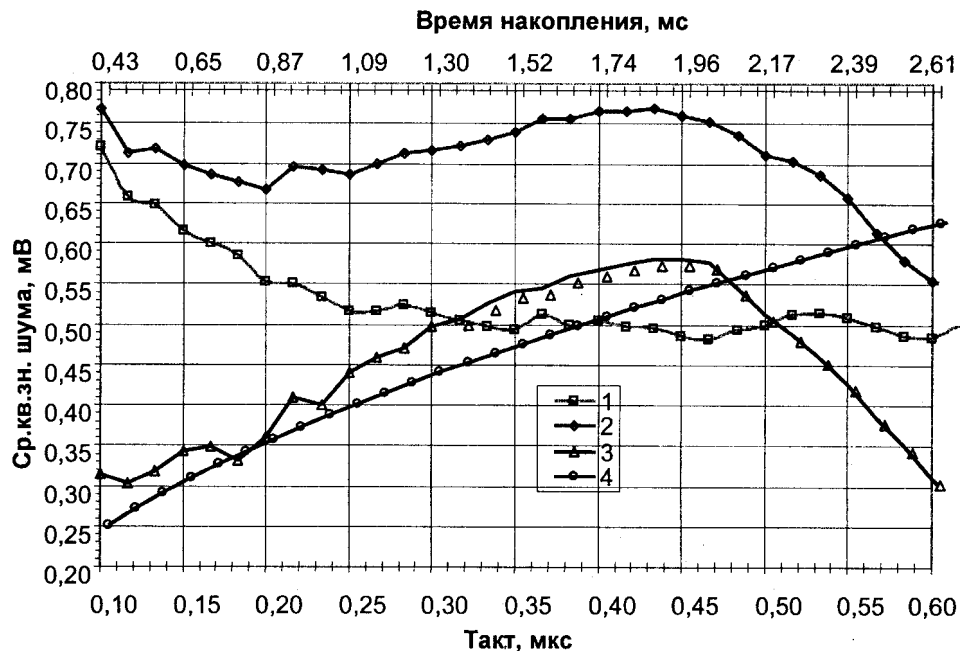


Рис. 4. Зависимости напряжения шума от времени накопления:

- 1 — $\Delta U_{BMA} = 0$ В;
- 2 — $\Delta U_{BMA} = -1,27$ В;
- 3 — вычисленное из выражения $V_{N3} = (V_{N2}^2 - V_{N1}^2)^{1/2}$;
- 4 — вычисленное из соотношения $V_{N4} = (qI_F T_A)^{1/2} \cdot (C1)^{-1} \cdot K$

На рис. 3 представлены также зависимости минимально обнаруживаемой мощности $P_{\lambda\max}$ от времени накопления при нескольких значениях $\Delta U_{\text{ВМА}}$. Видно, что при времени накопления $T_A = 10^{-3}$ с $P_{\lambda\max} \cong (8-10) \cdot 10^{-13}$ Вт/эл. Дисперсия распределения минимально обнаруживаемой пороговой мощности $\sigma (P_{\lambda\max}) \leq 16\%$.

Как видно из представленных результатов, при апертурном угле $2\theta = 40^\circ$ оптимальное время накопления, при котором достигаются как наилучшие значения пороговой чувствительности, так и обычно требуемое значение динамического диапазона $D = 60-80$ дБ, составляет величину $T_A = (1-1,2) \cdot 10^{-3}$ с, что при считывании на четыре выхода дает частоту кадров 800—1000 Гц.

На рис. 5 приведен пример тепловизионного изображения, полученного с помощью разработанного МФПУ с объективом $F/1,4$ и обработкой, аналогичной описанной в работе [6].

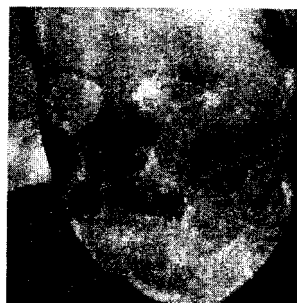


Рис. 5. Пример тепловизионного изображения

Литература

1. Рогальский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Бурлаков И. Д., Голубков А. В. и др.// Прикладная физика. 2005. № 2. С. 16—21.
3. Ashley T., Ballingall R. A., Beale J. E. P. et al.// Proc. SPIE, 2003. V. 4820. P. 400—404.
4. Bloom I. and Nemirovsky Y.// IEEE Trans. Electron Devices. 1991. V. 38. № 8. P. 1792—1796.
5. Астахов В. П., Гиндин Д. А., Карпов В. В. и др.// Прикладная физика. 1999. № 2. С. 73—78.
6. Болтарь К. О., Бовина Л. А., Сагинов Л. Д. и др.// Там же. С. 50—54.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

Fast-operating array photodetective assembly of a 128x128 elements format on the basis of InSb with the frame-accurate accumulation and function of the range finder

A. M. Filachev, I. D. Burlakov, A. I. Dirochka, I. L. Kasatkin, A. A. Lopukhin,
V. F. Pasekov, V. F. Chishko

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

V. N. Prihodko, L. Z. Sunyaev
State Institute of Applied Optics, Kazan, Russia

A. K. Panfilenko
"Microtelecom" Ltd. Co., Minsk, Byelorussia

Indium antimonide MWIR Focal-Plane Array (FPA) have been developed and investigated. FPA consists of staring photodetector bonded by indium bumps with CMOS-multiplexer and Split-Stirling cooler. Noise equivalent power NEP is $\approx 7 \cdot 10^{-13}$ W/pixel and dynamic range 60—70 dB at frame frequency (800—1000) Hz.