

MWIR and LWIR MCT FPA development

V. M. Akimov, K. O. Boltar, I. D. Burlakov, Ye. A. Klimanov,
N. G. Mansvetov, V. P. Ponomarenko, L. D. Saginov, V. N. Solyakov,
V. I. Stafeev, A. A. Timofeev, A. M. Filachev

ORION Research-and-Production Association, Moscow, Russia

The review contains the results of MWIR and LWIR spectral ranges MCT photodiodes and FPAs research and development in RD&P Center ORION. Structure, topology and performance of MCT photodiodes, silicon readout electronics, staring and TDI FPAs, thermal imager are presented.

УДК 621.383

Матричные фотоприемники из антимонида индия для гибридных матричных фотоприемных устройств

И. Д. Бурлаков, А. В. Голубков, А. И. Дирочка, И. Л. Касаткин, А. А. Лопухин,
В. Ф. Пасеков, В. П. Пономаренко, В. Ф. Чишко

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

Разработаны и изготовлены матричные фотодиодные приемники с тонкой базовой областью на основе антимонида индия. Проведены исследования фотоэлектрических характеристик и механизмов генерации темнового тока разработанных матричных фотоприемников.

Различные ИК-системы с использованием матричных фотоприемников имеют ряд преимуществ по сравнению с системами с одноэлементными и линейными фотоприемниками: отсутствие сложной механической сканирующей системы, что приводит к значительному снижению массогабаритных и энергетических показателей; упрощение конструкции фотоприемного устройства (ФПУ) за счет уменьшения числа выводов из холодной зоны, в которой находится матричный фотоприемник (МФП), и, наконец, возможность достижения лучших пороговых характеристик за счет больших времен накопления фотосигнала. На область спектра 3–5 мкм разработка МФП ведется с 80-х годов XX века из антимонида индия, КРТ и барьеров Шоттки на основе силицида платины. Достоинства МФП на основе PtSi, связанные с высокой однородностью параметров и совместимостью со стандартной технологией изготовления ПЗС-структур, уменьшаются из-за низкой квантовой эффективности барьера Шоттки, что значительно сужает область их применения [1]. Фотоприемники на основе антимонида индия, полупроводника с собственным поглощением обладают высокой внутренней квантовой эффективностью (до 90 %)

и большим быстродействием. Первые монолитные матричные фотоприемники на его основе были разработаны на основе ПЗИ-структур с $p-n$ -переходом [2]. В таком МФП в ячейке реализовывались функции детектирования ИК-излучения и его накопление на емкости МДП-структуры. Организация ячеек в матричную структуру осуществлялась по схеме с X-Y адресацией, причем все функции по считыванию фотосигнала и его предварительной обработке выполнялись периферийными устройствами. Наряду с очевидными недостатками, связанными со сложностью конструкции МФПУ, которые возрастают по мере увеличения формата, пороговая чувствительность таких МФПУ принципиально ограничена схемой с X-Y адресацией. Кроме этого наличие, кроме $p-n$ -перехода в МФП, еще и двухуровневой контактной системы существенно снижало процент выхода годных МФП.

В настоящее время для построения МФПУ из антимонида индия используется гибридная схема, показанная на рис. 1. Сам матричный фотоприемник содержит только матрицу фотодиодов и выполняет функцию преобразования оптического сигнала в электрический, а обработка электрического сигнала (накопление, фильтра-

ция, считывание и т. д.) выполняет мультиплексор (МП) — кремниевая интегральная схема. Электрическое и механическое соединение МФП и МП осуществляется с помощью индиевых микростолбиков. В гибридном варианте МФПУ отсутствуют недостатки, присущие схеме с X-Y адресацией.

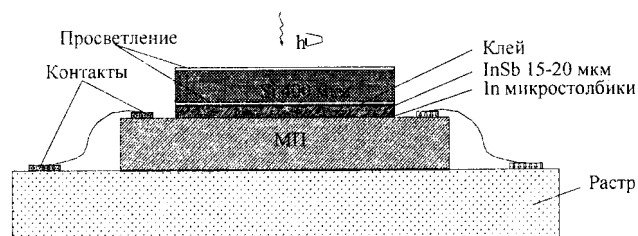


Рис. 1. Гибридный вариант построения МФПУ

Реализация гибридного варианта МФПУ требует решения ряда сложных научно-технических и технологических проблем.

Для этого необходимо:

разработать технологию изготовления МФП с тонкой базовой областью, обеспечивающую высокую квантовую эффективность, так как в этом случае излучение поглощается со стороны базовой области;

разработать технологию получения индиевых микростолбиков;

разработать технологию и создать установку стыковки матричного фотоприемника с мультиплексором;

разработать схемотехнику, топологию и изготовить мультиплексор.

Изготовление матричного фотоприемника из антимонида индия для гибридного варианта МФПУ может быть условно разбито на несколько основных этапов:

- изготовление матрицы фотодиодов с толстой базовой областью *n*-типа по мезоструктурной технологии с помощью ионной имплантации Be^+ с энергией 40 кэВ и формирование контактной системы $\text{Cr}-\text{Au}$ на каждом фотодиоде;
- уменьшение толщины базовой области механохимической обработкой и приклейка МФП базовой областью на просветленную подложку из кремния криогенным клеем;
- формирование индиевых микростолбиков размерами порядка 15×15 мкм и высотой 4–5 мкм на контактной системе $\text{Cr}-\text{Au}$.

Очевидно, что для получения максимального значения внутреннего квантового выхода при освещении со стороны базовой области ее толщина d должна быть не менее глубины поглощения излучения δ в интересующей области спектра, а с другой стороны, — не превышать значение эффективной диффузионной длины дырок L_p , которая в свою очередь зависит от объемного времени жизни неравновесных дырок

и скорости поверхностной рекомбинации на освещаемой поверхности.

На рис. 2 приведена спектральная зависимость коэффициента поглощения антимонида индия при $T = 77$ К (кривая 1) [3]. Видно, что в области края собственного поглощения коэффициент поглощения $\alpha \approx 2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ (при $\lambda \approx 5,2$ мкм). Проведенные измерения времени жизни неравновесных носителей заряда дали значения $\tau \approx (2-3) \cdot 10^{-7}$ с. Оценка величины эффективной диффузионной длины дырок с использованием соотношения Эйнштейна дает величину $L_p \approx 20$ мкм. Таким образом, толщина базовой области должна лежать в диапазоне $d \leq L_p \approx 20$ мкм.

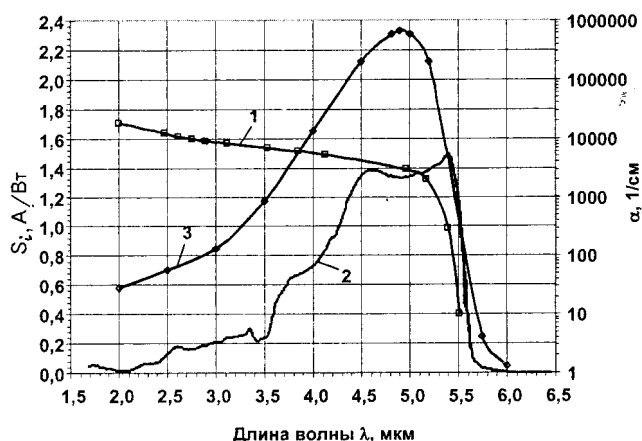


Рис. 2. Спектральное распределение коэффициента поглощения α (1) и фоточувствительности S_f при освещении через базовую область (2) и со стороны залегания *p-n*-перехода (3)

Разработанная технология уменьшения толщины базовой области позволяет воспроизводимо получать МФП с толщиной базовой области (20–30) мкм. Тестовые измерения показали, что при достижении $d \approx 5$ мкм у фотодиодов МФП увеличиваются темновые токи, что, вероятно, вызвано механическими напряжениями на обрабатываемой поверхности.

На рис. 2 также приведено спектральное распределение токовой чувствительности S_f фотодиодов из антимонида индия при толщине базовой области 20 мкм при освещении через базовую область (кривая 2) и освещении с фронтальной стороны (кривая 3) при толщине базовой области 400 мкм. Видно, что максимум токовой чувствительности для кривой 2 совпадает с началом собственного поглощения. Спектральное распределение токовой чувствительности МФП с тонкой базовой областью промодулировано интерференцией излучения в слое криогенного клея (≈ 10 мкм) между поверхностью несущей кремниевой подложки и поверхностью антимонида индия. Видно, что токовая чувствительность в максимуме составляет $S_f \approx 1,5$ А/Вт, что соответствует внешней квантовой эффективности $\eta \approx 0,3$ для непроектной поверхности базовой области.

Другой важной характеристикой МФП является уровень темновых токов, величина которых может зависеть как от объемного времени жизни, так и от толщины и качества обработки поверхности базовой области. В работе [4] было исследовано влияние различных технологических режимов при изготовлении линеек фотодиодов с толстой базовой областью и установлено, что на величину темнового тока существенное влияние оказывали режимы разварки и распайки электрических проводников. Для исключения этого фактора измерения темновых токов проводились на МФП с тонкой и толстой базовыми областями, состыкованными с мультиплексором. На рис. 3 представлена ячейка мультиплексора, которая состоит из емкости накопления $C1 \cong 0,8$ пФ, транзистора MP2, работающего в подпороговом режиме, транзистора MP3, работающего в ключевом режиме и обеспечивающего считывание напряжения с емкости C1 на шину OUT, а также "обнуление" емкости C1.

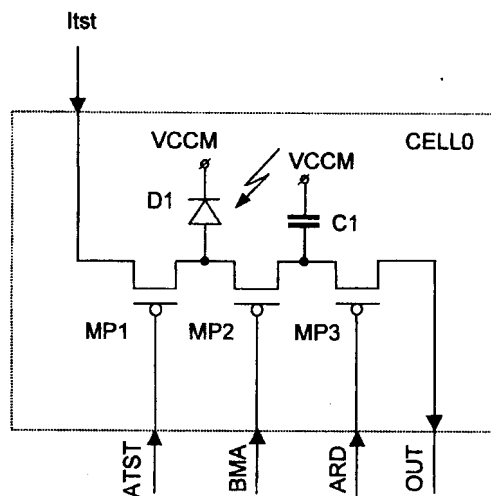


Рис. 3. Принципиальная схема ячейки мультиплексора

Шина OUT через истоковый повторитель, расположенный на периферии поля ячеек (не показан на рисунке), соединена с аналогово-цифровым преобразователем. Транзистор MP3 необходим для тестирования работоспособности ячейки накопления и последующего тракта, с его помощью измерялся также коэффициент передачи $K = \frac{\Delta U_{out}}{\Delta U_{C1}}$ (ΔU_{out} — изменение напряжения на выходе МП при изменении напряжения на емкости ΔU_{C1}). При коэффициенте передачи истокового повторителя $\alpha \approx 0,9$ типичное значение $K \cong 0,3$, что связано с влиянием емкости шины OUT. Измерение зависимости обратного тока ФД от напряжения проводилось путем изменения напряжения U на шине ВМА, а сама величина тока I определялась из соотношения

$$I = \frac{\Delta U_{out} C1}{TK},$$

где T — время интегрирования тока на емкости C1.

Величина тока I является функцией напряжения на фотодиоде V_d и напряжения затвористок V_{zi} на транзисторе MP2, при этом справедливы соотношения:

$$I = I_d(V_d) = I_T(V_{zi});$$

$$V = V_d + V_{zi}. \quad (1)$$

С учетом (1) для приращения ΔI можно записать

$$\Delta I = \frac{\partial I_d}{\partial V_d} \Delta V_d = \frac{\partial I_T}{\partial V_{zi}} (\Delta V - \Delta V_d)$$

или

$$\Delta V_d = \frac{g_T}{g_d + g_T} \Delta V,$$

где $g_T = \frac{\partial I_T}{\partial V_{zi}}$, $g_d = \frac{\partial I_d}{\partial V_d}$ — дифференциальные

проводимости транзистора и диода, соответственно.

Таким образом, если справедливо соотношение $g_d \ll g_T$, то

$$\Delta V_d \approx \Delta V; \quad \Delta V_{zi} \approx 0; \quad V_{zi} \approx \text{const} = V_{zi}^* \quad (2)$$

и, изменяя напряжение на затворе транзистора MP2, можно измерить зависимость обратного тока фотодиода от изменения напряжения.

Если в некотором диапазоне обратных смещений ВАХ фотодиода описывается выражением

$$I_d = I_s \exp \left\{ \left(\frac{q V_d}{\beta k T} \right) - 1 \right\},$$

то тогда с учетом выражений (1) и (2) измеряемая ВАХ будет иметь вид

$$I_d = I_s \exp \left\{ \frac{q}{\beta k T} \left[(V - V_{zi}^*) \right] - 1 \right\}, \quad (3)$$

где β — коэффициент, зависящий от механизма генерации темнового тока.

Таким образом, из (3) видно, что "истинная" ВАХ диода при таком способе измерений сдвинута по оси напряжений на величину V_{zi}^* .

В противоположном случае, когда $g_d \gg g_T$, справедливы соотношения:

$$\Delta V_{zi} \approx \left(1 - \frac{g_T}{g_d} \right) \Delta V \approx \Delta V,$$

$$\Delta V_d \approx 0, \quad V_d \approx \text{const} = V_d^*.$$

ВАХ транзистора в подпороговом режиме описывается выражением [5]

$$I_T = A \left\{ \exp \left(\frac{V_{zi} - V^*}{mkT} \right) - 1 \right\} \approx A \left\{ \exp \left(\frac{V - V_d^* - V^*}{mkT} \right) - 1 \right\}, \quad (4)$$

где V^* — "пороговое" напряжение;
 m — коэффициент неидеальности ВАХ;
 A — постоянная, не зависящая от напряжения.

Из (4) видно, что измеряемая ВАХ транзистора также сдвинута по оси напряжений на величину V_d^* , которая тем меньше, чем больше g_d .

Измерения темновых токов проводились в полностью экранированном от внешнего излучения криостате, охлаждаемом жидким азотом,

причем температурные зависимости измерялись за счет естественного нагрева криостата после испарения жидкого азота.

На рис. 4 представлены типичные зависимости обратного тока от напряжения на затворе транзистора МР2 для МФП толщиной базовой области $d = 25$ мкм для пикселей, расположенных в центре (кривая 1), посередине (кривая 2) и на краю (кривая 3) матрицы при 77 К (размер пикселя 30×30 мкм).

Видно, что для центрального элемента при $|V| > +1,36$ В зависимость тока от приложенного напряжения носит экспоненциальный характер. По мере удаления от центра матрицы туннельная составляющая наблюдается при меньших напряжениях, а ее величина возрастает. Для выяснения механизма генерации темнового тока была измерена зависимость его от температуры в области минимальных напряжений обратных смещений. На рис. 5 представлены зависимости темнового тока от температуры для трех пикселей при напряжении смещения $V = -1,03$ В.

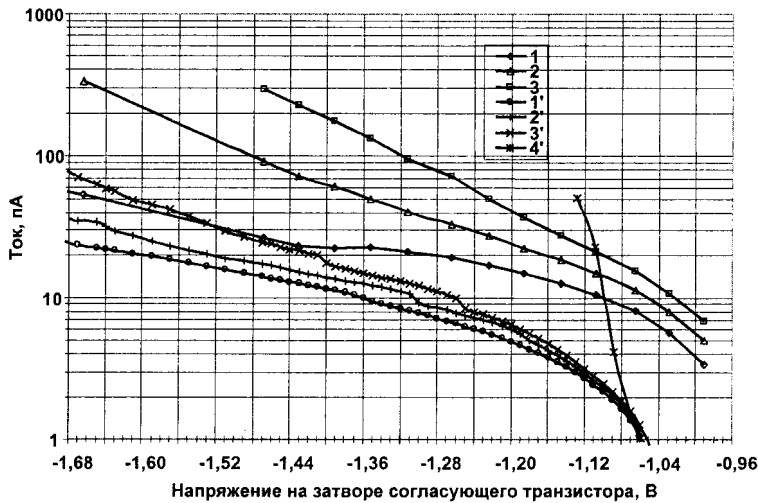
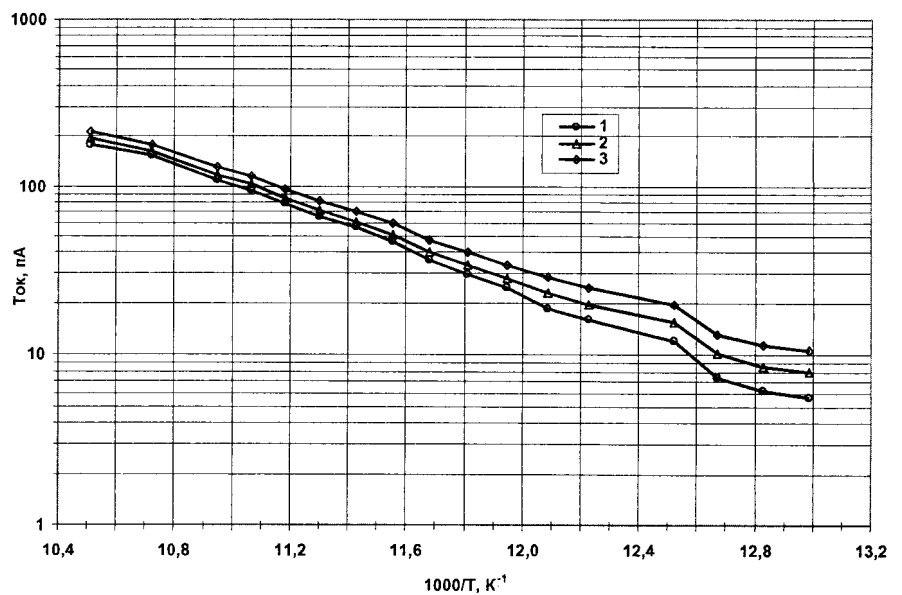


Рис. 4. Обратные ветви ВАХ при $T = 77$ К:

тонкая базовая область: 1 — пиксель № 2; 2 — пиксель № 44; 3 — пиксель № 62; толстая базовая область: 1' — пиксель № 1; 2' — пиксель № 29; 3' — пиксель № 58; 4' — ВАХ короткозамкнутого пикселя

Рис. 5. Температурная зависимость темнового тока для МФП с тонкой базовой областью (номера кривых соответствуют номерам на рис. 4)



Видно, что экспериментальные данные в области температур $T > 82$ К хорошо аппроксимируются экспоненциальной зависимостью с энергией активации $W_1 \approx 130$ мэВ для центрального элемента и $W_3 \approx 115$ мэВ — для крайнего элемента, что близко к $\frac{E_g(0)}{2} \approx 118$ мэВ [6]. Такая

температурная зависимость темнового тока характерна для генерации-рекомбинации в ОПЗ через центр, расположенный вблизи собственного уровня E_i , определяемого соотношением:

$$E_{i1} = \frac{E_{g1}(0)}{2} + kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \quad (m_h^*; m_e^* — \text{эффективные}$$

массы плотности состояний дырок и электронов, соответственно). Используя известные значения [7] $m_h^* = 0,4 m$ и $m_e^* = 0,015 m$, вычислим значение $E_i \approx 140$ мэВ. Точное выражение для энергии активации W в приближении постоянного поля в ОПЗ получено в работе [8]

$$W_1 = |E_{i1} - E_{T1}| + \frac{E_{g1}(0)}{2},$$

где E_{T1} — энергия рекомбинационного уровня, отсчитываемая от вершины валентной зоны.

Таким образом, для центрального элемента $|E_i - E_T| = 12$ мэВ.

Уменьшение энергии активации W по мере удаления от центра матрицы может быть объяснено влиянием растягивающих механических напряжений. Действительно, в работе [9] показано, что при всестороннем сжатии ширина запрещенной зоны в антимониде

индия увеличивается ($\beta = \frac{dE_g}{dP} = 15 \cdot 10^{-6}$ эВ/атм),

при этом величина E_T практически не зависит

от давления, а коэффициент $\beta_T = \frac{d(E_g - E_T)}{dP} \approx \beta$

[10]. В нашем случае растягивающие напряжения возникают за счет большего коэффициента линейного расширения антимонида индия по сравнению с кремнием и естественно предположить, что в этом случае ширина запрещенной зоны будет уменьшаться. Изменение энергии активации с учетом того, что $\beta_T = \beta$, равно $\Delta W = W_1 - W_3 = E_{g1}(0) - E_{g3}(0) \approx 15$ мэВ. Используя известные значения коэффициентов термического расширения антимонида индия и кремния и их упругих постоянных [11] в рамках одномерной модели была проведена оценка изменения ширины запрещенной зоны, которая лежит в интервале $\Delta E_g = (5-10)$ мэВ, что по порядку величины совпадает с ΔW . С другой стороны, уменьшение энергии активации для крайнего пикселя возможно связано с вкладом туннельной составляющей, величина которой, как видно из рис. 4, растет по мере удаления из центра.

Примененная методика измерения темновых токов справедлива при выполнении неравенства (2). На рис. 4 (кривая 4') представлена зависимость обратного тока от напряжения для короткозамкнутого пикселя, у которого дифференциальная проводимость $g_d \sim 10^{-3}$ Ом⁻¹. Видно, что ВАХ описывается экспоненциальной зависимостью типа (4), и вычисленный коэффициент неидеальности m лежит в интервале $m = 1,2-2$, и во всем интервале исследованных темновых токов выполняется неравенство (2).

На рис. 4 также представлены обратные ветви ВАХ при $T = 77$ К для центрального и крайнего пикселей для МФП с толщиной базовой области 500 мкм. Видно, что в случае толстой базовой области в целом разброс темновых токов как в области смещений, где доминирует генерация-рекомбинация в ОПЗ ($|V| < 1,20$ В), так и в области туннельных токов ($|V| > 1,20$ В) гораздо меньше. Такое поведение темновых токов может быть объяснено тем, что в случае толстой базовой области величина растягивающих механических напряжений меньше за счет деформации индиевых микростолбиков, что в конечном итоге приводит к уменьшению механических напряжений. В целом следует отметить, что уровень темновых токов в МФП с тонкой базовой областью больше по сравнению с МФП с толстой базовой областью даже в области генерационно-рекомбинационного механизма (область малых отрицательных смещений). Возможными причинами этого является влияние растягивающих механических напряжений и операций утоньшения на величину встроенного заряда в анодном окисле [12] и ширину запрещенной зоны, а также возникновение дополнительных центров рекомбинации в ОПЗ. Для количественной оценки влияния каждого из упомянутых факторов на величину темнового тока требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

1. Роговский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Морозов В. А., Осипов В. В., Селяков А. Ю., Таубкин И. И. // Микроэлектроника. 1996. Т. 25. № 3. С. 63—175.
3. Оптические свойства полупроводников. — М.: Мир, 1970. С. 183.
4. Астахов В. П., Гундин Д. А., Карпов В. В. и др. // Прикладная физика. 1999. № 2. С. 73—78.
5. Зу С. Физика полупроводниковых приборов. — М.: Мир, 2001. Т. 2. С. 54.
6. Мосс Т. Оптические свойства полупроводников. — М.: ИИЛ, 1961. С. 365.
7. Varshi Y. P. // Physica, Crav, 1967. V. 34. P. 149.
8. Sah C. T., Noyce R. N., Shockley W. // Proc. IRE. 1957. № 45. P. 12—28.
9. Keyes R. W. // Phys. Rev. 1955. № 99. P. 490.
10. Волков А. С., Галаванов В. В., Извозчиков Б. В., Таксали И. А. // ФТТ, 1966. Т. 8. № 12. С. 36—89.
11. Воронкова Е. М., Гречушников Б. Н., Дистлер Г. И., Петров И. П. Оптические материалы для инфракрасной техники. — М.: Наука, 1965.
12. Maniv S., Shamay M., Sinai Y. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. № 12. P. 4916—4918.

Статья поступила в редакцию 10 октября 2004 г.

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 кадровым 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 кадровым 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 антимониды 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-