

УДК 621.315.592 : 536.717 : 537.33

**ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННЫЕ ДЛИННОВОЛНОВЫЕ
ИНФРАКРАСНЫЕ МАТРИЧНЫЕ ФПУ
ФОРМАТА 320 × 256 ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ СЛОЁВ CdHgTe,
ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ МЛЭ**

**А. В. Предеин, Ю. Г. Сидоров, И. В. Сабинина, В. В. Васильев,
Г. Ю. Сидоров, И. В. Марчишин**

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: predein@isp.nsc.ru*

Приведены параметры фотоприёмных устройств (ФПУ) длинноволнового инфракрасного диапазона формата 320 × 256 элементов, изготовленных по новой усовершенствованной технологии на основе гетероэпитаксиальных структур кадмий—ртуть—теллур. В этих ФПУ минимизированы изменения напряжения смещения фотодиодов по площади матрицы; устранены области неработоспособных фотодиодов, связанные как с процессом гибридизации, так и с ростовыми дефектами эпитаксиальных плёнок типа «шип»; вольт-амперные характеристики диодов в полученных фотоприёмниках однородны и лимитированы диффузионной компонентой тока вплоть до -400 мВ. Величина темнового тока составляет $0,25-0,45$ нА, $R_0A = (0,6-3) \cdot 10^2$ Ом · см². Вольтовая чувствительность, пороговая облучённость и среднее значение NETD в максимуме чувствительности равны $11,8 \cdot 10^8$ В/Вт, $3,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/см² и $26,8$ мК соответственно. Доля дефектных элементов $1,5$ %.

Ключевые слова: кадмий—ртуть—теллур, матричные фотоприёмные устройства, вольт-амперные характеристики, гибридная сборка.

Введение. В тепловизионных системах используют фотоприёмные модули на основе охлаждаемых гибридных линейчатых или матричных инфракрасных фотоприёмников (ФП). Гибридная сборка методом перевёрнутого кристалла представляется наиболее технологичным методом изготовления ИК ФП, параметры составных частей которых могут быть оптимизированы независимо друг от друга [1]. Одними из развиваемых и производимых промышленным способом являются ИК ФП на основе гибридных сборок из диодных фоточувствительных элементов, изготовленных на базе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ, соединённых через индиевые столбы с кремниевыми ПЗС- или КМОП-мультимплексорами [1, 2].

Предельная чувствительность фотоприёмного устройства (ФПУ) для регистрации ИК-излучения на основе односпектрального ФП диодного типа определяется фотоэлектрическими параметрами последнего и спектральным диапазоном поглощаемого излучения.

В охлаждаемых матричных фотодиодных ФП формата более 128×128 элементов на основе ГЭС КРТ p -типа с чувствительностью в длинноволновом инфракрасном (ДВИК) диапазоне ($8-12$ мкм) значительную роль играет изменение рабочего смещения фотодиодов от центра матрицы к её краям вследствие падения напряжения в слое p -типа, имеющем большую величину последовательного сопротивления R_s , при протекании по нему суммарного тока фотодиодов, так как может привести к появлению области нечувствительности в центре матрицы — эффекта «бублика» [3]. Для устранения этого эффекта необходимо уменьшать суммарный ток фотодиодов матрицы и снижать последовательное сопротивление от каждого фотодиода матрицы к базовому контакту.

Темновой ток фотодиода лимитируется фундаментальными механизмами токопереноса и поверхностными токами утечки. Снизить его можно за счёт уменьшения или полного подавления поверхностных токов утечек, что позволяют широкозонные варизонные слои у

поверхности [4]. Объёмную компоненту темнового тока можно снизить путём разработки технологии выращивания совершенных слоёв КРТ с оптимальной конструкцией фоточувствительного слоя.

Матричные ФПУ, чувствительные в ИК-диапазоне, представляют собой гибридную сборку, состоящую из матрицы фоточувствительных элементов и кремниевой схемы считывания, соединённых между собой индиевыми микроконтактами. Важнейшей технологической операцией в изготовлении таких ФПУ является гибридизация, а именно совмещение и соединение матрицы фоточувствительных элементов и схемы считывания. При этом с уменьшением размеров отдельных элементов и шага между ними и при одновременном увеличении линейных размеров ФПУ требования к качеству выполнения гибридизации резко возрастают.

В данной работе представлены параметры матричных ФПУ формата 320×256 элементов, изготовленных по усовершенствованной технологии на основе ГЭС КРТ МЛЭ новой архитектуры, в которых реализованы решения, позволяющие уменьшить темновые токи и неоднородность параметров фотодиодов по площади ФПУ, значительно понизить количество дефектов, возникающих при гибридизации ФПУ, а также минимизировать эффект изменения рабочего смещения диодов.

Минимизация эффекта изменения рабочего смещения диодов. Для оценки падения напряжения $U(x, y)$ от центра к общему контакту на периферии прямоугольной матрицы размера 320×256 элементов и упрощения вычислений рассмотрим расчёт падения напряжения $U(r)$ для радиально-симметричной матрицы с тем же числом пикселей и площадью, как у прямоугольной матрицы. Аналитический расчёт $U(r)$ в матрице с рабочим слоем p -типа и общим контактом на периферии даёт формулу

$$U(r) = \left(1 - \frac{r^2}{R_M^2}\right) U_{\max}, \quad U_{\max} = \frac{\rho_0 N I_d}{4\pi w},$$

где U_{\max} — максимальная величина U ; N — число диодов; I_d — ток диода; $\rho_s = \rho_0/w$ — поверхностное сопротивление слоя; R_M — радиус матрицы; $\pi R_M^2 = N A_d$ (A_d — площадь пикселя в матрице).

Рассчитаем величину U_{\max} для ГЭС КРТ с параметрами: базовый слой p -типа вакансионно-легированный, концентрация дырок $p_0 = 8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, подвижность $\mu_p = 500 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$, толщина слоя $w = 8 \text{ мкм}$, $\rho_s = \rho_0/w = 2,0 \text{ кОм}/\square$, длина волны отсечки $\lambda_{1/2} = 9,5 \text{ мкм}$ при температуре $T = 77 \text{ К}$, температура фона $T_{\text{ф}} = 300 \text{ К}$, угол поля зрения $\theta = 28^\circ$ ($f/2$ -оптика), площадь пикселя $A_d = 30 \times 30 \text{ мкм}$, $N = 320 \times 256$ элементов, коэффициент отражения от подложки арсенида галлия 0,3. Тогда расчётная величина фототока диода составит $I_d = 21 \text{ нА}$, а падение напряжения — $U_{\max} = 0,28 \text{ В}$, т. е. если на центральных диодах минимальное обратное смещение будет равно -50 мВ , то на крайних диодах оно достигнет -320 мВ . Для того чтобы пренебречь этим эффектом, необходимо иметь качественные диоды, у которых фототок значительно превышает темновой ток при обратных смещениях больших чем $-U_{\max}$. На практике значительное увеличение темнового тока диодов на многих образцах происходит уже при смещениях меньших чем -200 мВ .

При росте потока теплового излучения, поглощаемого диодом, например при увеличении длинноволновой границы поглощения, вырастет и падение напряжения U_{\max} .

Уменьшить эффект изменения рабочего смещения диодов можно, снижая ток диодов и продольное сопротивление слоевой структуры КРТ.

Чтобы уменьшить сопротивление активного слоя, необходимо увеличивать его толщину и концентрацию дырок. Но при концентрациях $p > 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ в вакансионно-легированном КРТ быстро уменьшается время жизни неосновных носителей заряда и их

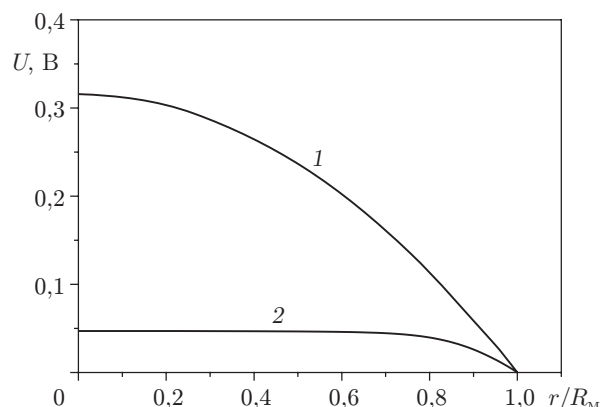


Рис. 1. Падение напряжения в активном слое матрицы с осевой симметрией при протекании суммарных токов фотодиодов: кривая 1 — p -слой, $\rho_s = 1,56$ кОм/□; кривая 2 — p -слой, $\rho_s = 2$ кОм/□ + n -подслой, $\rho_s = 10$ Ом/□. Размер пиксела 25 мкм

диффузионная длина становится < 10 мкм. Соответственно увеличение толщины активного слоя будет приводить к снижению квантовой эффективности. Кроме того, при высоких концентрациях вакансий ухудшается качество диодов, т. е. темновой ток диода начинает быстро увеличиваться при меньших смещениях.

Другой путь — введение со стороны подложки низкоомного подслоя n -типа. Толщину и композиционный состав подслоя можно выбрать такими, чтобы он также выполнял функцию фильтра средневолнового излучения.

Результаты численного расчёта падения напряжения в базовом слое p -типа без подслоя и с подслоем n -типа в случае осесимметричной матрицы n -на- p -фотодиодов приведены на рис. 1. Параметры расчёта для p -слоя: $\lambda_{1/2} = 9,5$ мкм, $T_{\Phi} = 300$ К, $f/2$ -оптика, $\rho_{sp} = 1,56$ кОм/□ ($p_0 = 8 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, $\mu_p = 500$ см 2 /(В · с), $w = 10$ мкм), диаметр матрицы 322 пиксела, $N = 320 \times 256$ элементов, расчётный ток $I_d = 21$ нА. Для структуры с подслоем n -типа сопротивления слоёв $\rho_{sn} = 10$ Ом/□, $\rho_{sp} = 2$ кОм/□.

Из графиков видно, что использование легированного индием подслоя n -типа позволяет ограничить изменение рабочего смещения фотодиодов от центра к краям осесимметричной матрицы до величины < 50 мВ. Можно считать этот результат хорошей оценкой и для прямоугольной матрицы 320×256 элементов с подобной структурой.

Вольт-амперные характеристики (ВАХ) диодов. Для улучшения ВАХ фотодиодов и повышения однородности их параметров нами была усовершенствована архитектура ГЭС КРТ МЛЭ и технология изготовления ФПУ. Для матриц n -на- p -диодов размера 320×256 элементов, изготовленных с использованием новой технологии, характерна низкая величина изменения рабочего смещения, уменьшенные токи, улучшенная разрешающая способность. Пример ВАХ n -на- p -диодов с длинноволновой границей $\lambda_{1/2} = 9,2$ – $9,6$ мкм, измеренных при температуре жидкого азота (77 К) как при закрытой заслонке теплового излучения (угол поля зрения $\theta = 0^\circ$), так и при засветке фоном $T_{\Phi} = 293$ К и $\theta = 34^\circ$, приведён на рис. 2, а. Вольт-амперные характеристики диодов мало отклоняются от «полки» вплоть до смещений -400 мВ. Значение $R_0 = 10$ – 20 МОм (рис. 2, б) и величина площади детектора $A_d = 30 \times 30$ мкм использовались для расчёта произведения сопротивления при нулевом смещении на площадь: $R_0 A = (0,9$ – $1,8) \cdot 10^2$ Ом · см 2 , которая соответствует лучшим экспериментальным значениям различных авторов [5].

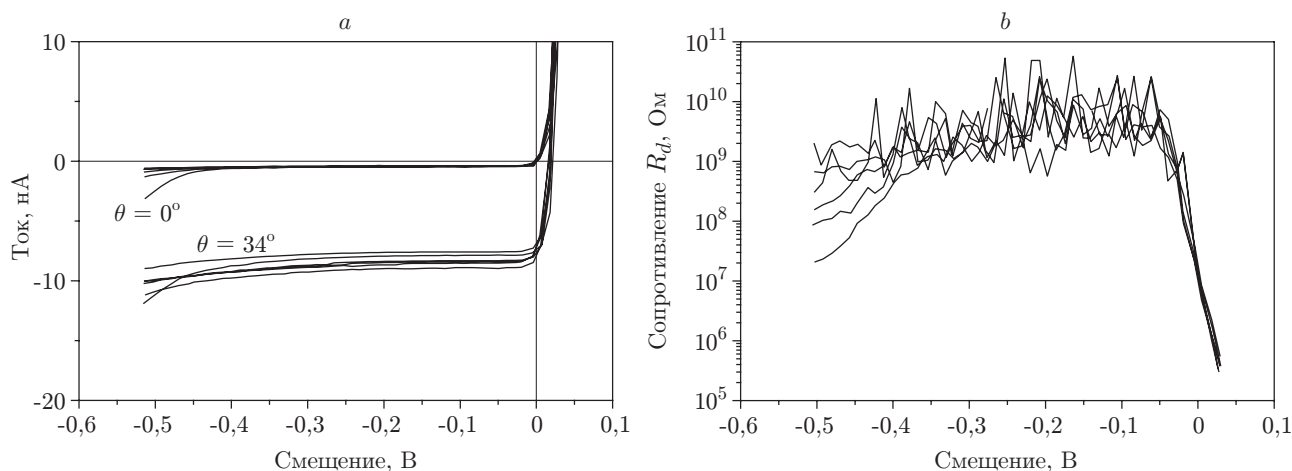


Рис. 2. Характеристики диодов КРТ130125 размера 30×30 мкм: *a* — ток в зависимости от смещения, *b* — сопротивление в зависимости от смещения

Возникновение дефектных элементов при изготовлении ФПУ методом гибридации. Основной методикой изготовления гибридных сборок является метод *flip-chip*, или метод перевёрнутого кристалла. По этой методике соединяемые чипы устанавливаются напротив друг друга, кристаллы — параллельно и производится совмещение микроконтактов. Далее верхний кристалл опускается вертикально вниз и осуществляется соединение микроконтактов за счёт диффузионной сварки индия под давлением.

Основные сложности, возникающие при изготовлении гибридных сборок, связаны с установкой параллельности соединяемых кристаллов. На практике соединяемые кристаллы никогда не являются идеально плоскими. Поэтому при отклонении кристаллов от плоскостности, превышающем высоту микроконтактов, в результирующем ФПУ часть фоточувствительных элементов оказывается неподключённой к мультиплексору или же имеет сильно шумящие контакты. Данный тип дефектов сборки можно выявить ещё на стадии подборки образцов при контроле их кривизны.

Когда же отклонение кристаллов от плоскостности не превышает высоты микроконтактов, на первый план выходит точность установки параллельности соединяемых образцов во время совмещения микроконтактов. Если на стадии совмещения кристаллов ошибка установки параллельности превысит некоторое значение, определяющееся размерами кристаллов и высотой микроконтактов, то возникший перекося кристаллов приведёт к отсутствию контактов между фоточувствительными элементами и схемой считывания на одном из краёв ФПУ.

Для установки параллельности кристаллов обычно используется схема с автоколлиматором, когда параллельность кристаллов достигается при совмещении двух отражённых от образцов лучей света. Однако в случае слабо отражающих образцов либо образцов, на поверхности которых имеется сильное рассеяние, точность данного метода будет снижена.

Другой проблемой, возникающей при изготовлении гибридных сборок, является сохранение установленной параллельности кристаллов в процессе сдавливания микроконтактов.

Сочетание двух указанных сложностей может приводить к неравномерному распределению давления по поверхности соединяемых кристаллов и неравномерному сдавливанию микроконтактов, в результате чего возможно возникновение повышенных шумов или недостаточной прочности полученных соединений. Неоднородное давление на образец может привести также к повреждению фоточувствительных элементов и ухудшению их параметров. На практике неоднородное сдавливание образца часто влечёт за собой характерные

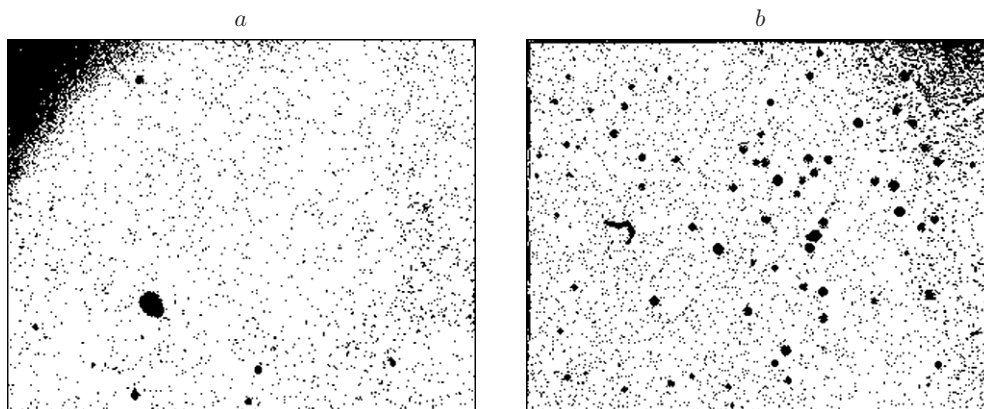


Рис. 3. Топограммы дефектных элементов ФПУ: *a* — повышенная плотность дефектных элементов в левом нижнем углу ФПУ, возникшая вследствие недостаточно точного выравнивания соединяемых кристаллов в процессе гибридации; *b* — области дефектных элементов в форме пятен на ФПУ, связанные с ростовыми дефектами типа шип на неоптимизированной структуре ГЭС КРТ МЛЭ

дефекты на изображении готового ФПУ. Эти дефекты чаще всего проявляются на краях ФПУ и связаны с повышенными токами и шумами фоточувствительных элементов. Дефекты такого типа приведены на рис. 3, *a*.

Для снижения влияния указанных факторов на качество изготавливаемых фотоприёмников был проведён ряд усовершенствований как в технологии изготовления фотоприёмных матриц и схем считывания, так и в технологии гибридации. Одним из таких усовершенствований стало использование алюминиевых отражающих площадок на поверхности мультиплексоров и матриц фоточувствительных элементов, что позволило повысить точность планаризации соединяемых кристаллов. Проведена оптимизация алгоритма гибридации, заключающаяся в подборе оптимальных температур и давлений. В результате удалось практически полностью исключить возможность возникновения дефектных элементов в результате неравномерного сдавливания.

При изготовлении ФПУ на основе эпитаксиальных плёнок КРТ на топограмме дефектных элементов могут наблюдаться скопления диодов с повышенными темновыми токами и пониженной чувствительностью, имеющие форму пятен или кругов (рис. 3, *b*). Вероятно, это связано с наличием в плёнках ростовых дефектов, имеющих форму шипов.

Усовершенствование структур ГЭС КРТ МЛЭ, применяемых для производства ФПУ, и технологии их изготовления позволило практически полностью устранить дефекты указанного типа. Характерная топограмма дефектных элементов для ФПУ формата 320×256 , изготовленного с использованием плёнок КРТ с оптимизированной структурой и усовершенствованной процедурой гибридации, показана на рис. 4, *a*. Напряжения 100 мВ, подаваемого на фотодиоды от мультиплексора, было достаточно для достижения рабочего режима фотодиодов по всей площади матрицы. Дефектные элементы распределены по поверхности матрицы однородно, и их доля составляет около 1,5 %. Дефектными элементами считаются те, у которых величина вольтовой чувствительности превышает отклонение от средней величины более чем на $\pm 35\%$ и значение пороговой облучённости в максимуме спектральной чувствительности превосходит $6 \cdot 10^{-7}$ Вт/см². Доля неработающих элементов из-за неприсоединения к схеме считывания незначительна и составляет около 0,05 % (рис. 4, *b*).

Основные параметры матричных ФПУ формата 320×256 элементов приведены в таблице.

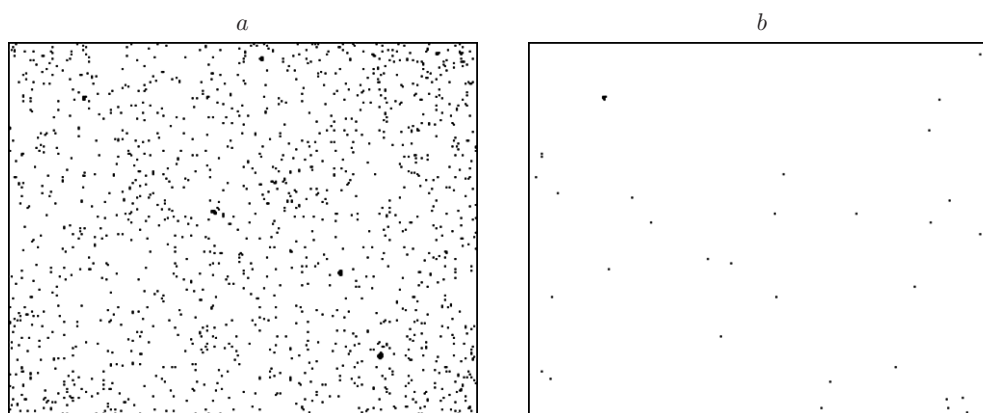


Рис. 4. Топограммы дефектных элементов ФПУ на основе оптимизированной ГЭС КРТ: *a* — дефектные элементы по чувствительности и пороговой облучённости (1,5 % от общего количества); *b* — неработающие элементы (0,05 % от общего количества)

№ п/п	Наименование характеристики	Значение параметра
1	Длинноволновая граница спектральной чувствительности по уровню 0,5 (от максимального значения)	9,5 мкм
2	Длинноволновая граница спектральной чувствительности по уровню 0,1 (от максимального значения)	10,0 мкм
3	Среднее значение пороговой облучённости по недефектным элементам в максимуме спектральной чувствительности	$0,37 \cdot 10^{-7}$ Вт/см ²
4	Максимальное значение пороговой облучённости по недефектным элементам в максимуме спектральной чувствительности	$6 \cdot 10^{-7}$ Вт/см ²
5	Среднее значение вольтовой чувствительности по недефектным элементам в максимуме спектральной чувствительности	$11,8 \cdot 10^8$ В/Вт
6	Разброс вольтовой чувствительности элементов (максимальное отклонение вольтовой чувствительности от среднего значения по недефектным элементам)	±35 %
7	Размах выходного напряжения (по недефектным элементам)	2,5 В
8	Динамический диапазон выходных сигналов (по недефектным элементам)	70 дБ
9	Кадровая частота	50 Гц
10	Количество дефектных элементов	1,51 %

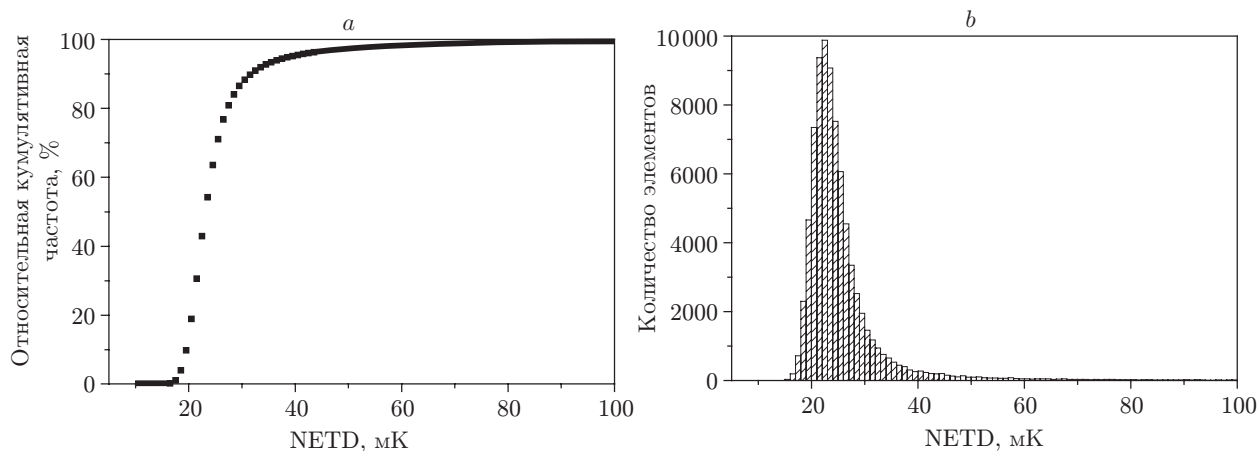


Рис. 5. Статистические характеристики измеренных величин NETD элементов ФПУ: *a* — кумулятивная относительная частота, *b* — гистограмма (среднее значение 26,8 мК)

Условия проведения измерений: температура образца 78 К, температура фона 295 К, угол поля зрения 30° , температура абсолютно чёрного тела 501 К, частота опроса выходного сигнала 2 МГц, длинноволновая граница по уровню 0,5 отрезающего фильтра 8,0 мкм, время накопления 666 мкс.

На рис. 5, *a, b* представлены гистограмма разности температур, эквивалентной шуму (NETD), и зависимость годных от NETD элементов ФПУ. Видно, что гистограмма характеризуется малой полушириной со среднеквадратичным отклонением 10,7 мК.

Заключение. Приведены результаты расчёта падения напряжения в базовом слое *p*-типа без подслоя и с подслоем *n*-типа в процессе работы матрицы *n*-на-*p*-диодов.

Изготовлены фотодиодные матрицы размера 320×256 элементов по усовершенствованной технологии на основе ГЭС КРТ МЛЭ новой архитектуры с широкозонным высокопроводящим подслоем *n*-типа проводимости, легированным индием для уменьшения последовательного сопротивления. Вольт-амперные характеристики диодов однородны и лимитированы диффузионной компонентой тока вплоть до -400 мВ. Величина темнового тока составляет 0,25–0,45 нА, $R_0A = (0,9-1,8) \cdot 10^2$ Ом \cdot см². Вольтовая чувствительность, пороговая облучённость и среднее значение NETD в максимуме чувствительности равны $11,8 \cdot 10^8$ В/Вт, $3,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/см² и 26,8 мК соответственно. Напряжения 100 мВ, подаваемого на фотодиоды от мультиплексора, достаточно для их нормальной работы по всей площади матрицы (эффект «бублика» не наблюдается). Доля дефектных элементов составляет около 1,5 %.

Произведён ряд изменений в технологии гибридной сборки, позволивших повысить точность планаризации фоточувствительной матрицы и кремниевой схемы считывания. В результате удалось исключить образование дефектных элементов, связанное с перекосами соединяемых кристаллов, снизить количество неприсоединённых ячеек и общее количество дефектных элементов матричного фотоприёмника.

Использование усовершенствованной технологии даёт возможность понизить влияние структурных дефектов типа шип на параметры получаемых ФПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Fossom E., Pain B. Infrared readout electronics for space-science sensors: state of art and future directions // Proc. SPIE. 1994. **2020**. P. 262–285.

2. **Tribolet Ph., Hirel Ph., Lussereau A., Vuillermet M.** Main results of Sofradir IRFPAs including IRCCD and IRCMOS detectors // Proc. SPIE. 1994. **2252**. P. 369–380.
3. **Vasiliev V. V., Predein A. V.** Influence of graded p - P heterojunction's potential barrier on characteristics of three-dimensional HgCdTe photodiode // Proc. SPIE. 2005. **5834**. P. 83–91.
4. **Dvoretzky S. A., Varavin V. S., Mikhailov N. N. et al.** MWIR and LWIR detectors based on HgCdTe/CdZnTe/GaAs heterostructures // Proc. SPIE. 2005. **5964**. P. 75–87.
5. **Рогальский А.** Инфракрасные детекторы: Пер. с англ. /Под ред. А. В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. С. 418–420.

Поступила в редакцию 2 июля 2013 г.
