

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 4

1998

УДК 621.383.5.029.71/73

**В. В. Васильев, Д. Г. Есаев, Т. И. Захарьяш, А. Г. Клименко,
А. И. Козлов, И. В. Марчишин, В. Н. Овсяк, Н. Х. Талипов,
Ю. Г. Сидоров, С. А. Дворецкий**

(Новосибирск)

**МАТРИЧНОЕ ФОТОПРИЕМНОЕ УСТРОЙСТВО 128×128
НА ОСНОВЕ СЛОЕВ CdHgTe, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ НА ПОДЛОЖКЕ GaAs**

Разработана технология и изготовлено матричное фотоприемное устройство на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) на подложках GaAs с длинноволновой границей чувствительности 13 и 8 мкм. Фоточувствительный слой CdHgTe являлся варизонным слоем с повышенным содержанием CdTe на границах слоя. Изготовленное ФПУ имеет температурное разрешение 32 и 17 мК для $\lambda_c = 13$ и 8 мкм соответственно при рабочей температуре 80 К и температуре фона 295 К.

Введение. До настоящего времени соединение CdHgTe является основным материалом для создания приемников ИК-диапазона [1]. Высокая квантовая эффективность приемников на основе CdHgTe выгодно отличает их от приемников на квантовых ямах на основе GaAs/AlGaAs [2], диодов Шоттки на основе PtSi и гетероструктурах GeSi/Si. Высокий уровень технологии позволяет создавать двухцветные фотоприемники для различных спектральных диапазонов в одном технологическом цикле [3]. Технология молекулярно-лучевой эпитаксии дает возможность контролируемо менять состав пленки в процессе роста и тем самым варьировать физические и фотоэлектрические параметры фотоприемников [4].

В данной работе описываются технологии выращивания пленок CdHgTe методом МЛЭ, изготовления матрицы фотоприемников размерностью 128×128 и кремниевого мультиплексора для считывания фотосигнала, гибридной сборки матрицы фотоприемников и мультиплексора. Приведены параметры фотоприемного устройства (ФПУ) для $\lambda_c = 13$ и 8 мкм и примеры теплового изображения.

Технология изготовления матрицы фотоприемников 128×128 . Для изготовления фотоприемников использовались слои CdHgTe, выращенные методом МЛЭ на подложках GaAs с ориентацией (130) и буферным слоем CdTe [5]. Выращивание велось на установке МЛЭ «Обь». Установка сконструирована как система последовательно связанных вакуумных камер с различным составом остаточной атмосферы. Установка позволяет одновременно производить загрузку подложек и выгрузку готовых гетеро-

структур, термический отжиг после химического травления, рост буферного слоя на подложке и пленок CdHgTe. Состав пленок контролируется путем измерения эллипсометрических углов в процессе роста и оптического пропускания после роста.

На рис. 1, *a*, *b* представлены профили состава двух пленок CdHgTe, используемые для изготовления матрицы фотоприемников размерностью 128×128 элементов. Содержание CdTe в пленке увеличивается на поверхности пленки CdHgTe и на границе CdHgTe-буферный слой. Эффективная толщина слоя с повышенным содержанием CdTe составляет около 1 мкм. Широкозонный слой на поверхности необходим для снижения поверхностных токов утечки *n-p*-переходов. Кроме того, наши расчеты показали, что наличие варизонного слоя с повышенным составом на поверхности приводит к уменьшению скорости поверхностной рекомбинации и увеличению эффективного времени жизни неосновных носителей заряда [6].

Исходные пленки после эпитаксиального роста имели *n*-тип проводимости. Затем отжигом в инертной атмосфере при температуре 210 °C в течение 120 ч они конвертировались в *p*-тип. Концентрация дырок и их подвижность, измеренная методом Ван-дер-Пау в магнитном поле 1,5 кГс,

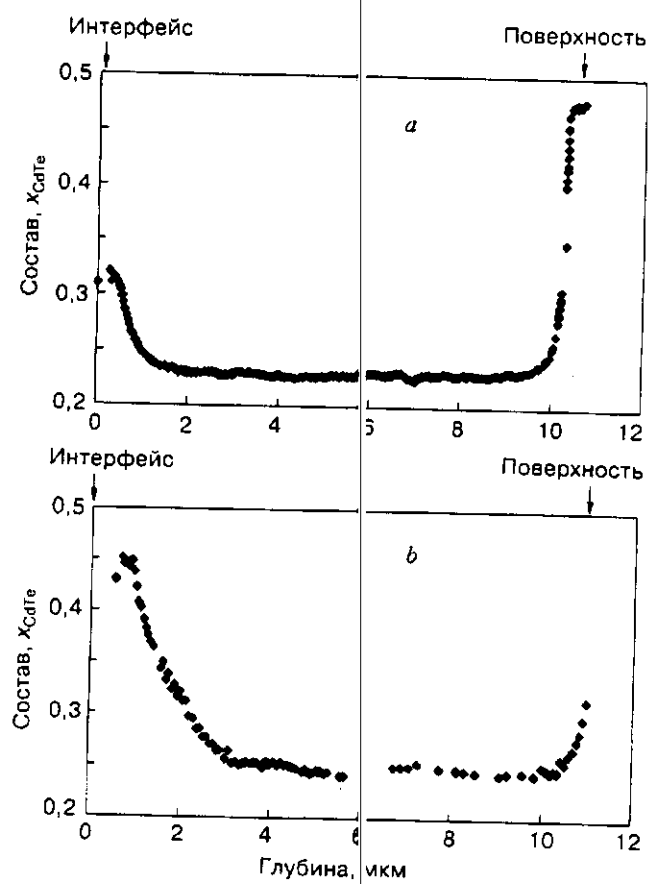


Рис. 1. Профили состава пленок CdHgTe с границей чувствительности:
a – 13 мкм, *b* – 8 мкм

при температуре 77 К составляла: для $\lambda_c = 13$ мкм $p = 1,2 \cdot 10^{16}$ см⁻³, $\mu_p = 510$ см²/В·с и для $\lambda_c = 8$ мкм $p = 5,5 \cdot 10^{15}$ см⁻³, $\mu_p = 590$ см²/В·с. Отсутствие знакопеременности в магнитополовой зависимости постоянной Холла свидетельствовало об однородности электрофизических свойств слоев CdHgTe как по площади, так и по глубине.

Фоточувствительные *n-p*-переходы в *p*-типе CdHgTe формировались ионной имплантацией бора [7]. В качестве омического контакта к *n*-области использовался индий, нанесенный методом термического испарения. Граница раздела CdHgTe–диэлектрик формировалась путем нанесения низкотемпературного диоксида кремния толщиной 70 нм методом CVD при пониженном давлении в процессе окисления моносилана кислородом в потоке аргона при $T = 100$ °С без дополнительной активации [8]. Последующая пассивация границы раздела производилась с помощью нанесения плазмохимического нитрида кремния толщиной 50 нм в процессе химической реакции моносилана с аммиаком в плазме тлеющего разряда при $T = 50$ °С [9]. Изготовленные таким образом структуры характеризуются следующими параметрами: плотностью фиксированного заряда $N_f \leq 5 \cdot 10^{10}$ см⁻², плотностью медленных поверхностных состояний $N_s \leq 2 \cdot 10^{10}$ см⁻².

Фотоприемные матрицы были изготовлены методом планарной технологии с использованием низкотемпературной фотолитографии по диэлектрикам и металлам с термообработкой слоев фоторезиста при $T < 90$ °С. Матрица размерностью 128 × 128 имела шаг 50 мкм, размер *n-p*-переходов 25 × 25 мкм. Индиевые столбы имели высоту 15 мкм.

КМОП-мультиплексор размерностью 128 × 128. На рис. 2, а, б схематически представлен мультиплексор, разработанный в Институте физики

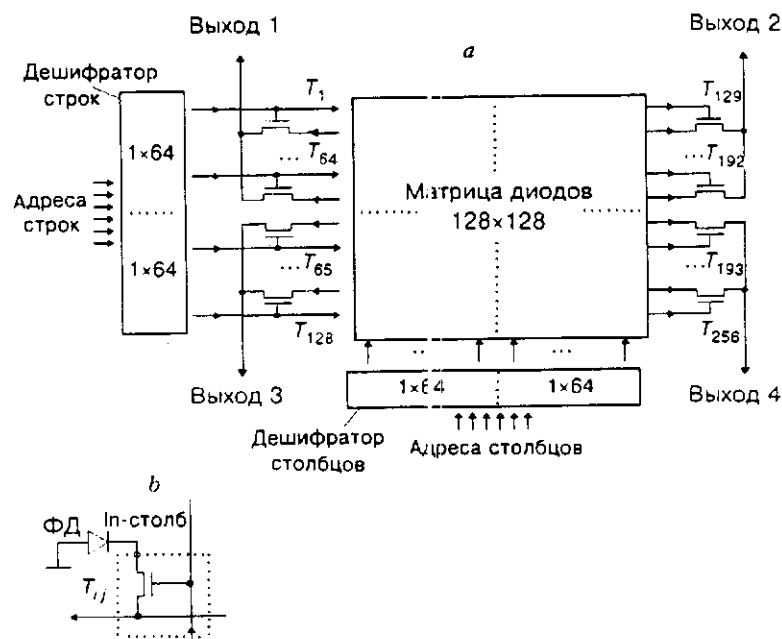


Рис. 2. Схематическое изображение КМОП-мультиплексора с произвольным доступом к элементам (а) и его элементарная ячейка (б)

полупроводников СО РАН и изготовленный по КМОП-технологии с *p*-каналом. Мультиплексор может использоваться как для считывания фотосигнала с матрицы фотодиодов на CdHgTe, так и для детального изучения вольт-амперных и шумовых характеристик диодов после гибридной сборки. Схема считывания обеспечивает прямой доступ к произвольным элементам матрицы, высокую однородность смещения диодов и возможность работы с большими темповыми и/или фоновыми токами. Мультиплексор может работать в широком диапазоне удельных дифференциальных сопротивлений диодов от 10^{-1} до 10^5 Ом·см².

Мультиплексор состоит из двух дешифраторов, матрицы ключей (T_{ij} , $i, j = 1 - 128$) и набора строчных ключей ($T_1 - T_{256}$). Выбор элемента фотоприемной матрицы задается 12-разрядным двоичным адресным кодом A0–A11. Младшие разряды (A0–A5) определяют номер столбца, старшие (A6–A11) – номер строки. Выбранный фотодиод подключается к одной из четырех выходных шин. Напряжение смещения на фотодиодах задается внешней прецизионной малощумящей схемой считывания, которая выполняет усреднение и преобразование фототока в сигнальное напряжение. Усреднение фотосигнала может осуществляться в течение времени адресации к выбранному фотодиоду. Описанный мультиплексор удобен в эксплуатации, так как требует для работы только один источник постоянного напряжения и 12-разрядные цифровые коды.

Гибридная микросборка матричного ФПУ размерностью 128 × 128. Технология гибридной микросборки, представленная в данной работе, является продолжением ранее опубликованной [7]. Используемые для сборки индиевые столбы имели высоту около 15 мкм как на мультиплексоре, так и на фотоприемной матрице. Каждый столб состоял из двух частей. Верхняя часть представляла собой усеченный конус диаметром 17 мкм по основанию, 10 мкм по вершине и высотой 10–11 мкм. Нижняя часть столба

Параметры	ФПУ 1	ФПУ 2
Граница чувствительности, мкм	13	8
Размерность	128 × 128	128 × 128
Шаг матрицы, мкм	50 × 50	50 × 50
Темповой ток, нА	190	2
R_{0A} , Ом·см ²	0,53	149
Время интегрирования, мкс	100	100
Токовая чувствительность, А/Вт	2,3	1,5
NEP, Вт/Гц ^{1/2}	$1,8 \cdot 10^{-14}$	$2,1 \cdot 10^{-8}$
Апертурный угол, град	45	45
Рабочая температура, К	80	80
NEDT, мК	32	17

имела размеры 20×20 мкм и высоту 4–5 мкм и служила платформой, уменьшающей механическое давление, приложенное к n - p -переходу. В процессе сборки деформация столбов начинается вблизи вершин встречных столбов, где развивается наибольшее давление. Верхняя часть индиевых столбов состоит из микрочерн размером, вдвое превышающим размер микрочерн в нижней части. В связи с этим пластичность в верхней части столба значительно выше, чем в нижней. В результате, когда верхняя часть столба испытывает пластическую деформацию в процессе сборки, нижняя часть остается практически недеформированной.

Среднее давление, соответствующее пластической деформации, в верхней части свариваемых столбов составляет около 1000 г/мм^2 , в то время как n - p -переход подвергается давлению, не превышающему 700 г/мм^2 . Такое давление гарантирует отсутствие деградации n - p -перехода [10]. Прямое наблюдение показало, что нижняя часть столбов остается практически недеформированной вплоть до 70 % поперечной деформации верхней части столбов. Однако для получения качественной холодной сварки достаточно механических усилий, увеличивающих поперечные размеры столба не более чем на 30 %. Полная суммарная высота индиевых столбов после сборки составляет около 22 мкм, этого достаточно для механической стабильности в процессе термоциклирования [11].

Матричное ФПУ размерностью 128×128 . Использование мультиплексора с произвольным доступом к элементам в сочетании с преобразователем ток – напряжение дает возможность обследования всех элементов матрицы: темнового тока, дифференциального сопротивления, фоточувствительности (температура АЧТ 500 К), шумового тока и температурного разрешения – NEDT. ФПУ монтировалось в заливной азотный криостат.

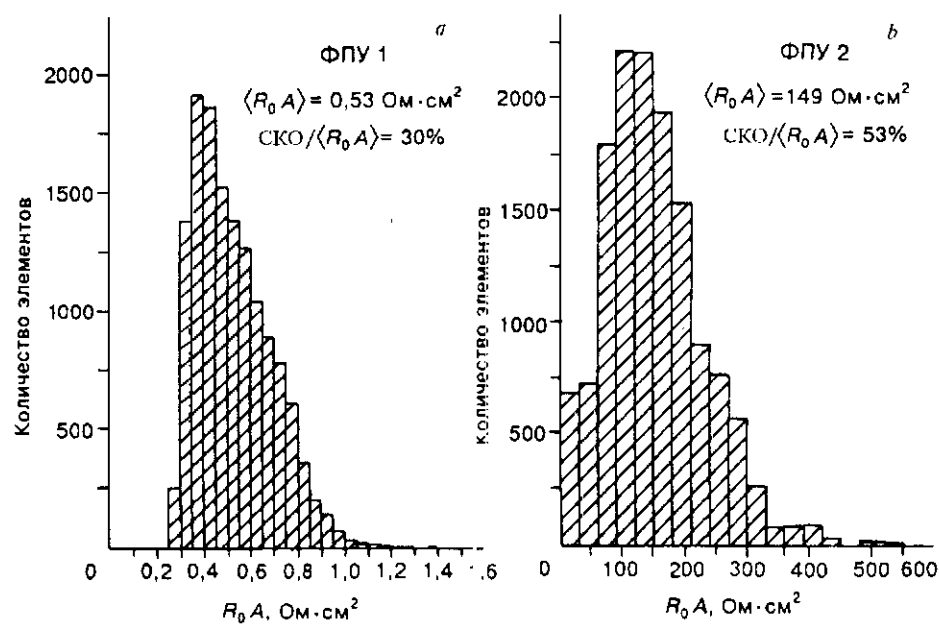


Рис. 3. Гистограмма распределения $R_0 A$ элементов ФПУ:
 $a - \lambda_c = 13 \text{ мкм}$, $b - \lambda_c = 8 \text{ мкм}$

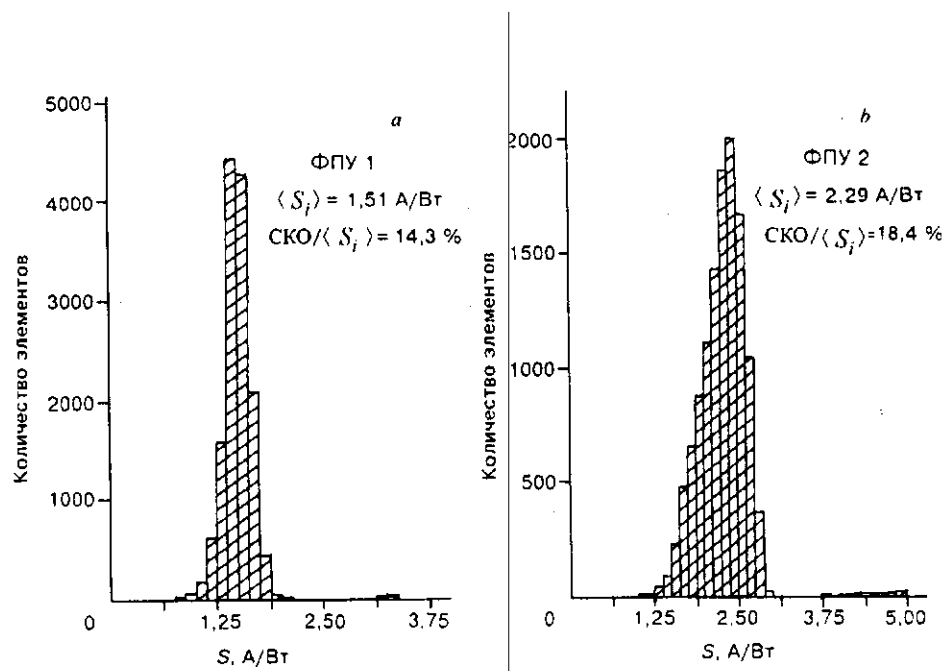


Рис. 4. Гистограмма распределения фоточувствительности элементов ФПУ:
а - $\lambda_c = 13 \text{ мкм}$, б - $\lambda_c = 8 \text{ мкм}$

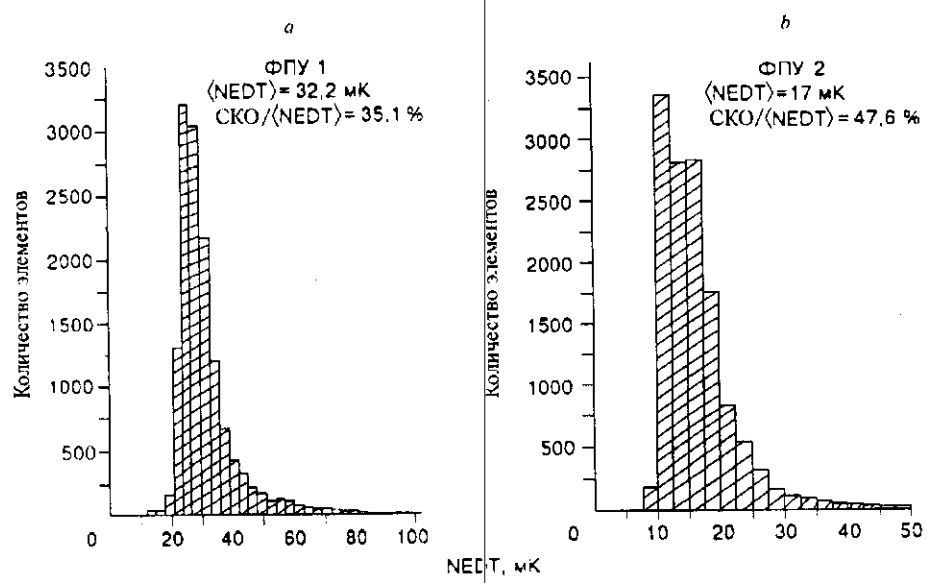


Рис. 5. Гистограмма распределения NEDT элементов ФПУ:
а - $\lambda_c = 13 \text{ мкм}$, б - $\lambda_c = 8 \text{ мкм}$

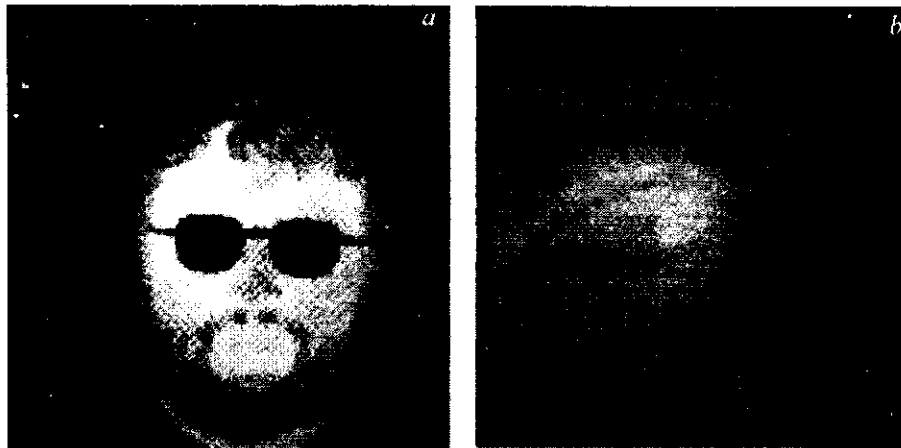


Рис. 6. Примеры теплового изображения с ФПУ размерностью 128×128 :
a – ФПУ 1, *b* – ФПУ 2

Угловая апертура формировалась коллодной диафрагмой. Накопление сигнала производилось на внешнем интеграторе. Напряжение смещения на фотодиодах выбиралось из соображений минимизации общего шума ФПУ – преобразователь ток–напряжение. В таблице представлены основные характеристики ФПУ с границей чувствительности 13 и 8 мкм.

На рис. 3 представлено распределение произведения R_0A по работающим элементам матрицы. Гистограмма распределения ампер-ваттной чувствительности и температурное разрешение (NEDT) показаны на рис. 4, 5. Заметное уширение гистограммы NEDT связано с $1/f$ -шумом, дающим вклад в компоненту превышения над шумом, связанным с флуктуацией фонового излучения.

На рис. 6 показаны примеры теплового изображения, полученные с оптической системой $F/1,5$ и временем интегрирования 50 мкс.

Заключение. Разработано и изготовлено матричное ФПУ размерностью 128×128 на основе варизонных слоев CdHgTe, выращенных методом МЛЭ на подложке GaAs, с границей чувствительности 13 и 8 мкм. Получены примеры теплового изображения. Достигнуты следующие параметры: произведение R_0A – 0,53 и 149 Ом · см² для $\lambda_c = 13$ и 8 мкм при $T = 80$ К соответственно. Неоднородность чувствительности менее 20%. Температурное разрешение 32 и 17 мК для $\lambda_c = 13$ и 8 мкм.

Авторы выражают благодарность Б. И. Фомину и Л. В. Филипповой за помощь в изготовлении кремниевых мультиплексоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Destefanis G., Audebert P., Mottin E., Rambaud P. High performance LWIR 256×256 HgCdTe focal plane array operating at 88 K. // Proc. SPIE. 1997. 3061. P. 111.
2. Kozlovski L. G., Arias J. M., Williams G. M. et al. Recent advances in starting hybrid focal plane arrays: comparison of HgCdTe, InGaAs and GaAs/AlGaAs detector technologies // Proc. SPIE. 1994. 2274. P. 93.

3. **Wilson J. A., Patten E. A., Chapman G. R. et al.** Integrated two-color detection for advanced FPA application // *Ibid.* P. 117.
4. **Ovsyuk V. N., Studenikin S. A., Suslyakov A. O. et al.** Fabrication and characteristics of long-wavelength infrared planar photodiodes on molecular beam epitaxial *p*-HgCdTe films // *Proc. SPIE.* 1996. 2746. P. 190.
5. **Varavin V. S., Dvoretzky S. A., Liberman V. I. et al.** Molecular beam epitaxy quality HgCdTe films control of the composition distribution // *J. Cryst. Growth.* 1996. 159. P. 1161.
6. **Осадчий В. М., Сусликов А. О., Васильев В. В., Дворецкий С. А.** Эффективное время жизни неосновных носителей заряда в МЛЭ-слоях CdHgTe с переменным профилем состава по глубине // *Автометрия.* 1998. № 4. С. 71.
7. **Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al.** Focal plane arrays on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // *Proc. SPIE.* 1997. 3061. P. 956.
8. **Васильев В. В., Дроздов В. Н., Салеева Г. Ю.** Свойства слоев SiO₂, полученных окислением моносилана кислородом при 100 °С // *Хим. физика.* 1992. 11, № 12. С. 1683.
9. **Emeksuzyan V. M., Romashko L. N., Saleeva G. Yu. et al.** The application of CVD SiO₂ and PECVD Si₃N₄ in fabrication and passivation of long-wavelength HgCdTe photodiode arrays // *Extended Abstracts of the 1995 International Conference on Solid State Devices and Materials.* Osaka, 1995. P. 1061.
10. **Клименко А. Г., Воинов В. Г., Новоселов А. Р. и др.** Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на CdHgTe // *Автометрия.* 1998. № 4. С. 105.
11. **Kim Y.-H., Choi J.-H., Choi K.-S. et al.** New reflow process for indium bump // *Proc. SPIE.* 1997. 3061. P. 60.

Поступила в редакцию 26 мая 1998 г.