

**МАТРИЧНЫЙ ФОТОПРИЕМНИК
НА ОСНОВЕ ВАРИЗОННОГО ИЗОТИПНОГО $P-p$ -ПЕРЕХОДА
В СЛОЯХ КРТ, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ
МОЛЕКУЛЯРНО-ЛУЧЕВОЙ ЭПИТАКСИИ***

**В. В. Васильев, С. А. Дворецкий, В. С. Варавин, Н. Н. Михайлов,
В. Г. Ремесник, Ю. Г. Сидоров, А. О. Сусяков, А. Л. Асеев**

*Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН, г. Новосибирск
E-mail: vas@thermo.isp.nsc.ru*

Представлена технология выращивания варизонных $P-p$ -переходов с потенциальным барьером в слоях теллурида кадмия и ртути (КРТ) и профилем состава, контролируемым *in situ* с помощью эллипсометра (P соответствует широкозонной, а p – узкозонной области полупроводника). На выращенных структурах изготовлены матричные фотоприемники 128×128 элементов для спектрального диапазона 8–12 мкм. Гибридная сборка матричного фотоприемника с кремниевыми мультиплексорами произведена методом групповой холодной сварки на индиевых столбах. Представлены экспериментальные температурные зависимости отношения сигнал/шум для матрицы фокальной плоскости с потенциальным барьером. Эти данные сравниваются с теоретической температурной зависимостью отношения сигнал/шум для идеального диффузионно-ограниченного диода и экспериментальными данными матричных фотоприемников без потенциального барьера в варизонном слое КРТ.

Введение. Фотодиоды на основе твердого раствора $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ) дальнего ($\lambda_m = 8-12$ мкм) инфракрасного (ИК) диапазона характеризуются большими величинами фонового и темнового токов. Снижение этих токов в матрицах n^+p -фотодиодов с высокоомным рабочим p -слоем необходимо для обеспечения постоянства напряжения смещения на диодах и увеличения времени накопления фотосигнала. Кроме того, для современных матричных ИК-фотоприемников требуются фотодиоды с малыми величинами темновых токов при обратном смещении, с уменьшенным $1/f$ -шумом и возможностью работать при более высокой температуре или длине волны отсечки λ_c .

Использование варизонных слоев в конструкции фотодетекторов позволяет улучшать их характеристики. Влияние поверхностной рекомбинации на работу фотодиода можно исключить введением приповерхностных варизонных слоев, в которых ширина запрещенной зоны увеличивается к внешним

* Работа выполнена при частичной поддержке интеграционного проекта СО РАН № 3.20.

границам [1]. Размещение p - n -перехода в центре варизонной области в диоде с двухслойным P - n -переходом может привести к формированию барьера для транспорта неосновных носителей заряда через переход [2, 3], но должным образом сконструированные детекторы с варизонным переходом позволяют достичь наилучших параметров p - n -фотодиодов [4]. Влияние положения p - n -перехода относительно варизонного слоя на характеристики одномерного фотодиода численно исследовано в работе [5]. Показано, что при смещении p - n -перехода в область варизонности рост дифференциального сопротивления при нулевом смещении R_0 на площадь перехода A (R_0A) происходит несколько раньше, чем падение ампер-ваттной чувствительности, и возможно улучшение обнаружительной способности D^* , рассчитываемой с учетом только тепловых шумов.

Фотоприемная одномерная структура для средневолнового ИК-диапазона (3–5 мкм), в которой фотоны поглощаются в узкозонном p -слое, а P - N -переход располагается в широкозонном P -слое, рассмотрена в работе [6]. В ней утверждается, что такая структура позволяет получить улучшенные характеристики при обратном смещении без уменьшения квантовой эффективности вплоть до температуры 295 К. Аналогичные фотодиоды для спектрального диапазона 3–5 мкм представлены в [7]. При температуре 210 К удельная обнаружительная способность составила $7 \cdot 10^{10}$ см \cdot Гц $^{1/2} \cdot$ Вт $^{-1}$.

Цель данной работы заключается в экспериментальном исследовании влияния потенциального барьера изотипного варизонного перехода на фотоэлектрические характеристики длинноволнового (длинноволновой край чувствительности более 10 мкм) матричного фотоприемника на основе N - P -перехода, расположенного в более широкозонной области слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$.

Конструкция приемника. Варизонные P - p -переходы на основе слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ были выращены методом молекулярно-лучевой эпитаксии на подложках диаметром 51 мм из GaAs с ориентацией (013) [7]. Распределение состава по толщине показано на рис. 1. Состав рабочего слоя был постоянным: $x_{\text{погл}} = 0,222 \pm 0,002$, точность определения состава равна 0,0002 мольных долей CdTe по площади поверхности из измерений спектров пропускания при комнатной температуре. Далее выращивался слой состава $x = x_{\text{погл}} + 0,025$ и толщиной 3,5 мкм без остановки процесса роста для формирования варизонного перехода. Широкозонный слой толщиной 0,4 мкм был выращен как капсулирующий слой для пассивации поверхности [8]. Распределение состава $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ контролировалось в процессе его роста сверхскоростным автоматическим эллипсометром *in situ* [9]. Измерение фотоотклика по спектрам фотопроводимости при 77 К показало, что длинноволновая граница чувствительности (λ_c) по площади эпитаксиального слоя $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ составляет $10,3 \pm 0,15$ мкм. Методом Ван-дер-Пау измерены концентрация $6 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$ и подвижность дырок 510 см 2 /В \cdot с. Время жизни фотовозбужденных электронов равно 5–7 нс.

Методом низкотемпературной планарной технологии [7, 8] на выращенных варизонных слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ p -типа были изготовлены матричные фотоприемники 128×128 элементов с шагом fotocувствительных элементов 40 мкм. N^+ - P -переходы сформированы имплантацией V^+ и расположены в широкозонном слое. Их площадь составляла 17×17 мкм. Поперечный разрез и зонная диаграмма N^+ - P -перехода отдельного элемента мат-

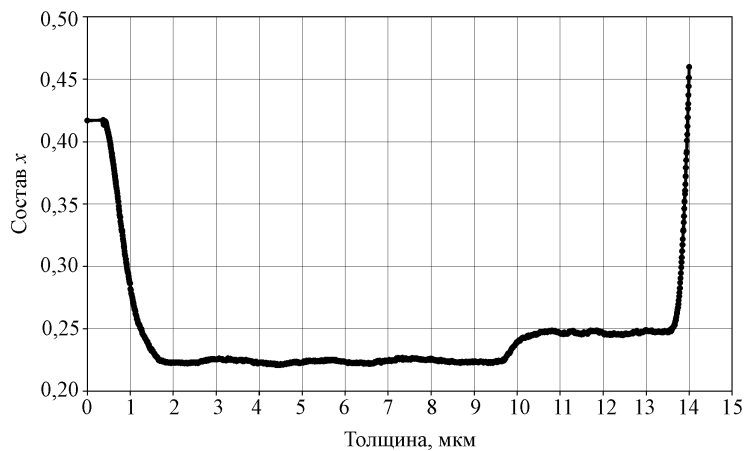


Рис. 1. Профиль состава варизонного слоя $Hg_{1-x}Cd_xTe$ по толщине

ричного фотоприемника приведены на рис. 2. Высота потенциального барьера варизонного изотипного $P-p$ -перехода ~ 14 мэВ, что соответствует разности составов $x - x_{\text{полг}} = 0,025$.

Типичные вольт-амперная характеристика и дифференциальное сопротивление диодов фотоприемной матрицы представлены на рис. 3 и 4. Темновой ток при смещении -200 мВ равен $0,8$ нА, $R_0A = 325$ Ом \cdot см². Длинноволновая граница чувствительности составляет $\lambda_c = 10,3$ мкм и определяется шириной запрещенной зоны в поглощающей узкозонной области слоя $Hg_{1-x}Cd_xTe$. Спектр чувствительности показан на рис. 5.

Сборка матричных фотоприемных модулей (ФПМ) осуществлялась методом холодной сварки под давлением на индиевых микросталбах [10, 11].

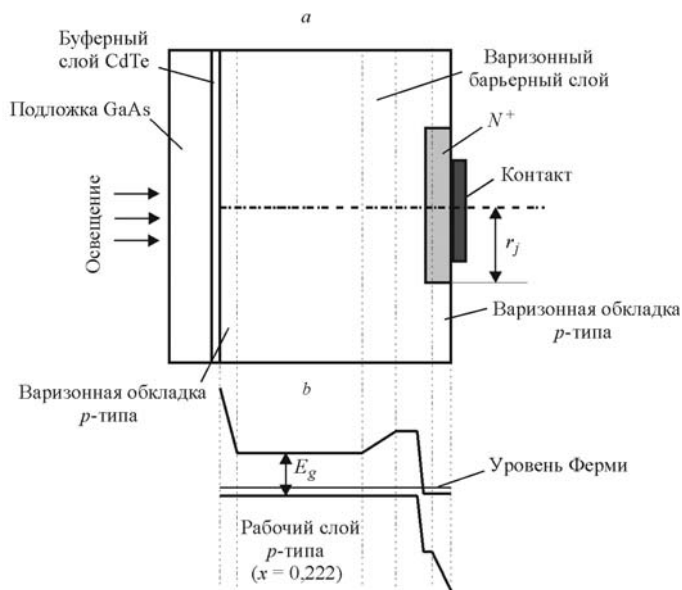


Рис. 2. Моделируемая детекторная N^+P -структура: поперечное сечение (a) и зонная диаграмма (b) фоточувствительной структуры

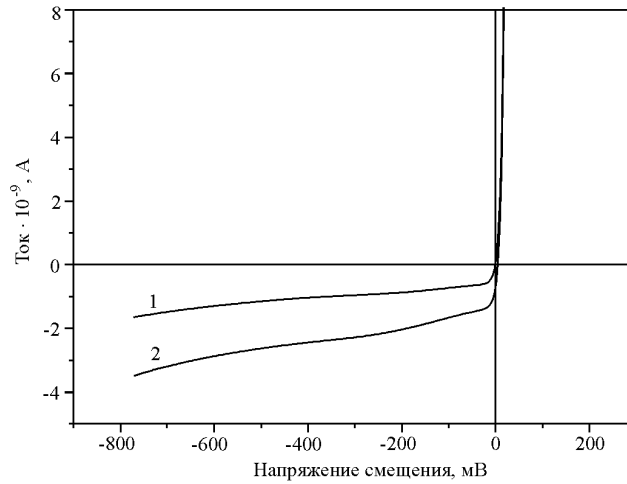


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика фотодиодов матричного приемника размером 128×128 элементов: кривая 1 – темновая, 2 – освещение фоном (температура фона 295 К, апертурный угол 45°). Рабочая температура 78 К

Кристаллы мультиплексора и фотоприемной матрицы ориентированы друг относительно друга по осям соединяемых матриц так, что отклонение от идеального совпадения краевых индиевых микростолбов было не более 2 мкм в плоскости планара (XY), а перекося по оси Z не превосходил ± 1 мкм. К моменту завершения процесса холодной сварки планарные поверхности мультиплексора и фотоприемной матрицы останавливаются на заданном расстоянии друг от друга. Время интегрирования в кремниевом мульти-

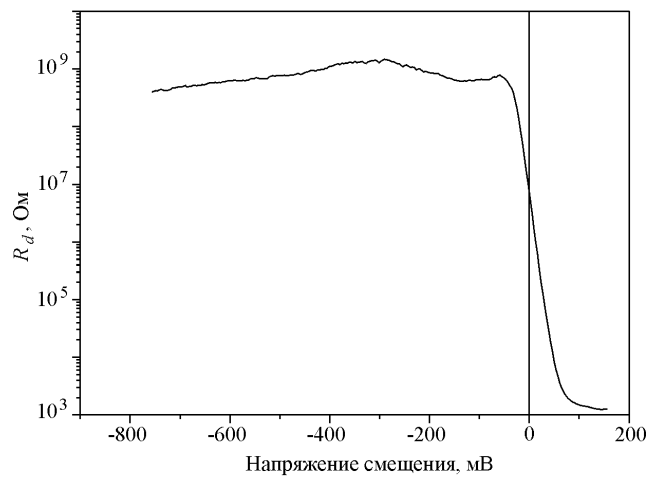


Рис. 4. Зависимость дифференциального сопротивления (R_d) от напряжения смещения фотодиодов матричного приемника размером 128×128 элементов ($R_0 A = 30 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, $R_0 A_0 = 325 \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$, где A – площадь N^+P -перехода, равная $3 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$; A_0 – оптическая площадь N^+P -перехода, учитывающая диффузионную длину электронов ($L_e = 20 \text{ мкм}$) в P -области и равная $32,5 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$). Рабочая температура 78 К

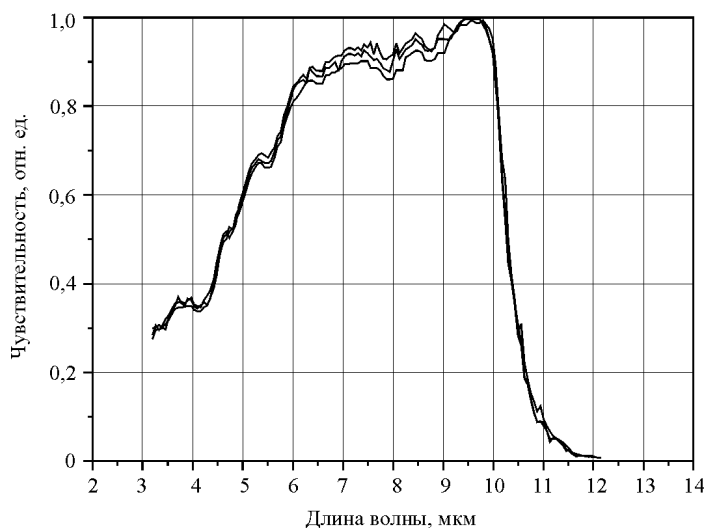


Рис. 5. Относительная спектральная чувствительность фотодиодов матричного приемника размером 128×128 элементов. Приведены спектры диодов, расположенных по диагонали матрицы (в центре и по углам). Разброс по длинноволновой границе чувствительности не превышает $0,05 \text{ мкм}$, что свидетельствует о высокой однородности состава слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ по площади. Рабочая температура 78 К

плексоре меняется от 1 мкс до 20 мс (времени кадра). Зарядовая емкость равна $2,4 \text{ пК}$.

Отношение сигнал/шум для фотоприемной матрицы. При работе матрицы фотодиодов с мультиплексором отношение сигнал/шум (S/N) определяется хорошо известным соотношением

$$S/N = I_s / I_\Sigma (\alpha Q / q)^{1/2}, \quad (1)$$

где I_s — сигнальный фототок; I_Σ — полный ток, равный сумме темнового и фонового токов (сигнальным током пренебрегаем); α — коэффициент заполнения зарядом накопительной емкости; Q — зарядовая емкость; q — заряд электрона.

Поскольку введение потенциального барьера в одинаковой степени снижает фототок и темновой ток (в диффузионном приближении), то величина S/N не должна зависеть от высоты барьера.

Однако реальные диоды, как правило, имеют заметный $1/f$ -шум и избыточный ток, связанный с генерацией и туннелированием в области пространственного заряда (ОПЗ). Протекание большого суммарного тока, приводящего к разбросу рабочих точек диодов матрицы, по высокоомному базовому p -слою увеличивает их взаимное влияние, что проявляется как дополнительное повышение шума фотоприемника. Кроме того, мультиплексор вносит избыточный шум $i_n = e_n / R_d$ (e_n — шум напряжения смещения, R_d — дифференциальное сопротивление диода), который может быть значительным при малом R_d .

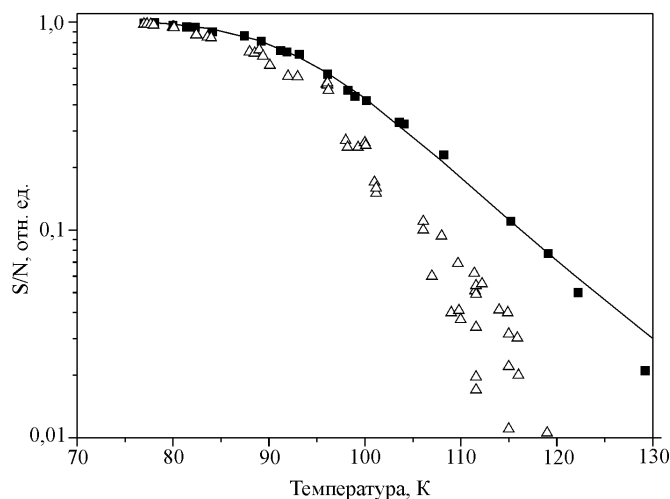


Рис. 6. Зависимости отношения S/N от температуры матричных фотоприемников размером 128×128 элементов, нормированные на единицу: сплошная кривая – расчетная зависимость, квадраты и треугольники – экспериментальные зависимости для ФПМ с фотодиодами с барьером (А) и без барьера (В) соответственно

Таким образом, для реальной фотоприемной матрицы величина S/N ниже, чем в формуле (1), и это различие возрастает с увеличением полного тока диода.

Введение барьера в фотодиоды фотоприемной матрицы уменьшает полный ток диода, что позволяет устранить вышеуказанные негативные явления. Проведенные измерения спектра шумов показали, что частота отсечки $1/f$ -шума, как правило, не превышает 10 Гц. Это значительно меньше, чем для аналогичных диодов без барьера. Исходя из этого можно ожидать, что величина S/N фотоприемной матрицы на основе диодов с барьерами будет приближаться к рассчитанной по формуле (1).

Экспериментальные результаты. Фотоприемный модуль после сборки устанавливался в лабораторный вакуумный криостат с регулировкой температуры в диапазоне 77–300 К (точность поддержания температуры 0,5 К). Входное окно изготовлено из ZnSe, апертурный угол 45°. Температура фона 295 К. В качестве источника излучения использовалось абсолютно черное тело с температурой 300–500 К. Измерялись сигнал от его подсветки и величина шума при изменении рабочей температуры фотоприемной матрицы. При этом время накопления выбиралось из условия $\alpha = 0,8$. Измеренные зависимости S/N от температуры фотодиодов с барьером (А) приведены на рис. 6. На рисунке также показана расчетная зависимость S/N для аналогичной фотоприемной матрицы с фотодиодами без барьера (В) при тех же условиях измерения. Расчет проводился в следующих приближениях:

- темновой ток рассчитывался по диффузионной модели, при этом скорость поверхностной рекомбинации равнялась нулю на обеих границах эпитаксиального слоя КРТ, площадь сбора носителей определялась геометрическим размером n -области и длиной диффузии, но не превосходила размера пикселя;

- при вычислении фототока квантовая эффективность полагалась равной 0,7;

- $1/f$ -шум не учитывался;
- при расчете отношения S/N время накопления выбиралось из вышеуказанного условия заполнения емкости накопления.

Кроме того, на рис. 6 приведены измеренные зависимости S/N семейства фотоприемных матриц с фотодиодами типа *B* и длинноволновой границей чувствительности в диапазоне 10,5–10,7 мкм при 77 К для аналогичных условий измерений.

Видно, что экспериментально измеренные значения S/N для фотоприемников с фотодиодами типа *A* лучше соответствуют расчетной зависимости по сравнению с фотодиодами типа *B*. Это можно объяснить следующим образом.

При температурах, близких к 77 К, более низкое отношение S/N для фотодиодов типа *B* связано с избыточными токами, не учитываемыми в диффузионной модели, а также наличием $1/f$ -шума диодов, которые в диодах типа *A* подавлены. При росте температуры начинает сильно проявляться снижение дифференциального сопротивления диодов. Это приводит к увеличению шумов и снижению чувствительности. Кроме того, протекание больших токов по высокоомной подложке вызывает сильное взаимное влияние фотодиодов, что опять-таки повышает шум и снижает чувствительность.

Таким образом, наличие потенциального барьера, образованного варизонным *P-p*-переходом, позволяет улучшить отношение S/N реальных фотоприемных матриц, что особенно сильно проявляется при повышении рабочей температуры.

Зависимости, аналогичные приведенным на рис. 6, имеют место для матричных фотоприемников с различными длинноволновыми границами чувствительности при одинаковой рабочей температуре, и, следовательно, наличие потенциального барьера позволяет использовать мультиплексор с более длинноволновыми фотодиодами.

Заключение. В данной работе продемонстрированы возможности молекулярно-лучевой эпитаксии для выращивания гетероэпитаксиальных слоев $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ на подложках из GaAs с заданным профилем состава по глубине. Разработана технология создания варизонных *P-p*-переходов в слоях $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ с оптимальным потенциальным барьером, величина которого контролируется с помощью эллипсометра *in situ*. На этих слоях на варизонном *P-p*-переходе изготовлены новые матричные фотоприемники 128×128 элементов для спектрального диапазона 8–12 мкм. Результаты экспериментальных исследований температурной зависимости отношения S/N для фотоприемных матриц на основе фотодиодов с барьером и без барьера сравниваются с теоретическими расчетами для идеального диода. Показано, что использование изотипного варизонного перехода позволяет создавать фотоприемные матрицы с параметрами, близкими к идеальным переходам. Увеличение ширины запрещенной зоны в области $N^+ - P$ -перехода позволяет подавить туннельную и генерационную компоненты токов утечек, а также в 10–100 раз снизить $1/f$ -шум. С увеличением рабочей температуры до 130 К отношение S/N для матричных фотоприемников с барьером ~ 14 мэВ совпадает с температурной зависимостью идеального фотодиода, описываемого фундаментальным диффузионно-дрейфовым механизмом токопереноса.

Из полученных результатов следует также, что зависимость отношения S/N от длинноволновой границы чувствительности фотоприемных матриц на основе диодов с барьером при заданной температуре будет соответствовать идеальному диоду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Осадчий В. М., Васильев В. В., Сусяков А. О., Дворецкий С. А.** Влияние варизонных слоев на эффективное время жизни носителей заряда в фоторезисторах на основе CdHgTe // ФТП. 1999. **33**, вып. 3. С. 293.
2. **Kosai K., Radford W. A.** Influence of barriers on charge transport across HgCdTe heterojunctions // Journ. Vac. Sci. Technol. A. 1990. **8**. P. 1254.
3. **Bratt P. R.** HgCdTe heterojunctions // Journ. Vac. Sci. Technol. A. 1983. **1**. P. 1687.
4. **Wenus J., Rutkowski J., Rogalski A.** Two-dimensional analysis of double-layer heterojunction HgCdTe photodiodes // IEEE Trans. Electron. Dev. 2001. **48**. P. 1326.
5. **Есаев Д. Г., Кравченко А. Ф., Осадчий В. М., Сусяков А. О.** Исследование влияния варизонности эпитаксиальных слоев на эффективность работы фотодиодов на основе твердых растворов $Cd_xHg_{1-x}Te$ // ФТП. 2000. **34**, вып. 7. С. 877.
6. **Ashby M. K., Gordon N. T., Elliott C. T. et al.** Novel $Hg_{x-1}Cd_xTe$ device structure for higher operating temperature detectors // Journ. Electron. Mater. 2003. **32**. P. 667.
7. **Васильев В. В., Дворецкий С. А., Есаев Д. Г. и др.** Фотоприемники на основе слоев CdHgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии // Автометрия. 2001. № 3. С. 4.
8. **Varavin V. S., Vasiliev V. V., Dvoretzky S. A. et al.** HgCdTe epilayers on GaAs: growth and devices // Proc. SPIE. 2003. **5136**. P. 381.
9. **Mikhailov N. N., Rychlitsky S. V., Spesivtsev E. V. et al.** Integrated analytical equipment for control of film growth in MBE technology // Mater. Sci. and Eng. 2001. **B80**. P. 41.
10. **Vasilyev V. V., Esaev D. G., Klimenko A. G. et al.** Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates // Proc. SPIE. 1997. **3061**. P. 956.
11. **Клименко А. Г., Войнов В. Г., Новоселов А. Р. и др.** Особо пластичные индиевые микростолбы для матричных ФПУ на CdHgTe // Автометрия. 1998. № 4. С. 105.

Поступила в редакцию 4 мая 2007 г.