

## МАТРИЧНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ 320×256 СО ВСТРОЕННЫМ КОРОТКОВОЛНОВЫМ ОТРЕЗАЮЩИМ ФИЛЬТРОМ

© 2009 г. В. В. Васильев, канд. физ.-мат. наук; В. С. Варавин, канд. физ.-мат. наук; С. А. Дворецкий, канд. физ.-мат. наук; И. В. Марчишин; Н. Н. Михайлов, канд. физ.-мат. наук; А. В. Предеин; В. Г. Ремесник, канд. физ.-мат. наук; И. В. Сабинина, канд. физ.-мат. наук; Ю. Г. Сидоров, докт. физ.-мат. наук; А. О. Сусяков

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск

E-mail: vas@thermo.isp.nsc.ru

Предложена конструкция фотоприемника на основе варизонной гетероэпитаксиальной структуры CdHgTe с высокопроводящим слоем (ВС), который обеспечивает низкое последовательное сопротивление фотодиодов и одновременно выполняет функцию коротковолнового отрезающего фильтра. На основе анализа влияния параметров ВС на квантовую эффективность и разность температур, эквивалентную шуму матричных фотоприемников (МФ), определены его оптимальные параметры. Изготовлены образцы МФ форматом 320×256 элементов для спектрального диапазона 8–12 мкм на основе гибридной сборки фоточувствительных элементов из гетероэпитаксиальных структур *p*-типа (013) HgCdTe/CdTe/ZnTe/GaAs с ВС и кремниевого мультиплексора. Вольтовая чувствительность, пороговая облученность и разность температур, эквивалентная шуму, в максимуме чувствительности составили  $4,1 \times 10^8$  В/Вт,  $1,02 \times 10^{-7}$  Вт/см<sup>2</sup> и 27 мК, соответственно.

**Ключевые слова:** варизонные слои, гетероэпитаксиальные структуры CdHgTe, высокопроводящий слой, коротковолновый отрезающий фильтр, матричные фотоприемники, разность температур, эквивалентная шуму.

Коды OCIS: 160.1898, 040.3060, 230.5160, 230.4170, 310.6860.

Поступила в редакцию 18.03.2009.

### Введение

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

Для охлаждаемых матричных фотодиодных фотоприемников форматами более 128×128 элементов на основе твердого раствора *p*-типа Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te с чувствительностью в длинноволновом ИК диапазоне (8–12 мкм) значительную роль играет суммарный ток через фотодиод, включающий темновой ток и ток от фонового излучения, и последовательное сопротивление  $R_s$ . Большие суммарные токи фотодиодов, протекающие через большое последовательное сопротивление  $R_s$ , с базовым контактом в виде рамки, обрамляющей матрицу, приводят к значительному различию в падении напряжения, и, соответственно, усло-

вий работы для центральных и периферийных фотодиодов. Такие условия работы приводят к появлению области нечувствительности в центре матрицы – создают эффект “бублика”, который эквивалентен увеличению фотоэлектрической связи между элементами и приводит к дополнительному вкладу в шумы [1]. Для устранения эффекта “бублика” необходимо уменьшать суммарный ток матрицы фотодиодов, создавая низкое последовательное сопротивление каждого фотодиода матрицы к базовому контакту.

Ток, вызванный фоновым излучением, можно уменьшить с помощью применения в ФПУ охлаждаемой диафрагмы и фильтра, отрезающего коротковолновое паразитное излучение. Однако использование диафрагмы с фильтром повышает охлаждаемую массу в ФПУ, что может потребовать применения более производительного микрокриогенного устройства. Коротковолновое паразитное излучение можно устраниить и путем создания отрезающего фильтра в составе многослойной гетероструктуры

CdHgTe (КРТ). Так, в двухспектральном ИК ФП используют гетероструктуру с широкозонным и узкозонным слоями. При регистрации излучения широкозонный слой поглощает коротковолновое и пропускает длинноволновое излучение, выполняя функции коротковолнового отрезающего фильтра.

Темновой ток фотодиода лимитируется фундаментальными механизмами токопереноса и поверхностными токами утечки. Снизить темновой ток можно путем уменьшения или полного подавления поверхностных токов утечек, что позволяют широкозонные варизонные слои у поверхности [2].

Снижение последовательного сопротивления  $R_s$  можно обеспечить созданием условий протекания тока от фотодиода к базовому контакту с высокой проводимостью. Такой слой может быть выполнен из тонкого узкозонного материала [3]. Однако в этом случае часть излучения, которое необходимо зарегистрировать, будет поглощаться в узкозонном слое. Следовательно, узкозонный слой должен быть тонким, а получение его оптимальных характеристик в настоящее время имеет определенные технологические проблемы. Можно создать слой с высокой проводимостью за счет легирования до высоких концентраций. В этом случае высоколегированный слой может быть широкозонным и одновременно будет выполнять функцию коротковолнового отрезающего фильтра.

Ниже приводятся результаты разработки конструкции ИК ФП со встроенным коротковолновым отрезающим фильтром на основе гетероэпитаксиальной структуры (ГЭС)  $p$ -типа КРТ с широкозонным высоколегированным слоем, определения его оптимальных параметров и изготовления матричных фотоприемников форматом 320×256 элементов.

### Конструкция гетероэпитаксиальной структуры для ИК фотоприемника

Зонная диаграмма и распределение состава конструкции ГЭС КРТ с высоколегированным слоем (ВС) для ИК ФП представлены на рис. 1 [4]. На подложке из (013) CdTe/ZnTe/GaAs методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) выраживается варизонная структура КРТ, которая включает следующие слои:

1 – широкозонный ВС  $n$ -типа проводимости,  
2 – слой типа “горбик”,

3 – фоточувствительный слой, в котором формируется  $n-p$ -переход;

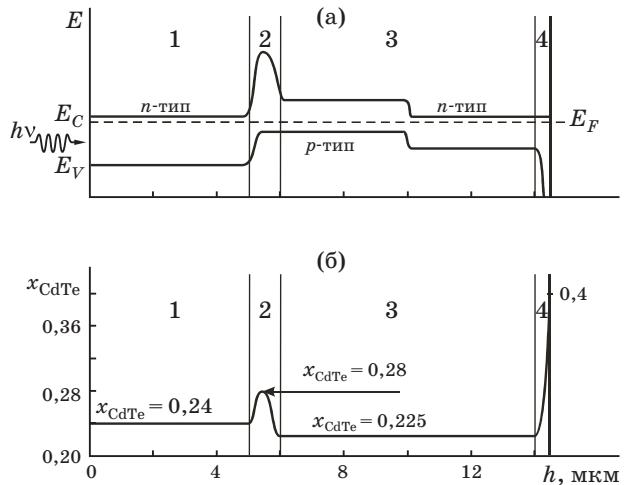


Рис. 1. Схема зонной диаграммы (а) и распределение состава по глубине (б) новой конструкции ГЭС КРТ с высоколегированным слоем.

4 – широкозонный варизонный слой.

Слой 1 должен обеспечить низкое последовательное сопротивление фотодиодов и выполнить функцию отрезающего коротковолнового фильтра. Слои 2 и 4 предотвращают рекомбинацию генерированных излучением носителей заряда в ВС и на поверхности, что увеличивает квантовый выход и повышает ампер-ваттную чувствительность фотодиода [5].

### Оптимизация состава и толщины встроенного коротковолнового фильтра

Для количественной оценки эффективности работы ВС в качестве коротковолнового фильтра были проведены численные расчеты разности температур, эквивалентной шуму (NETD – noise equivalent temperature difference) ИК ФП с размером пикселя 30×30 мкм, для объекта на расстоянии 1800 м. Для численных расчетов использовано уравнение

$$\text{NETD} = 2\sqrt{2}F \left( \frac{hc\Delta f}{A_d} \right)^{1/2} \times \times \frac{\left[ \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \eta \lambda M d\lambda \right]^{1/2}}{\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \eta \lambda t_a t_{op} \frac{dM}{dT} d\lambda} \left( 1 + \frac{2I_s}{I_{ph}} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

где  $t_a(\lambda)$ ,  $t_{op}(\lambda)$  – спектральные коэффициенты пропускания атмосферы и линзы,  $M(\lambda, T)$  –

спектральная излучательная способность абсолютно черного тела,  $\eta(\lambda)$  – спектральная квантовая эффективность фотодиода,  $I_{ph} = \frac{qS_p\Omega}{hc\pi} \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \eta(\lambda)\lambda M(\lambda, T) d\lambda$  – фототок,  $A_d$  – площадь поверхности детектора,  $F = f_1/D$  – параметр оптической системы ( $f_1$  – фокусное расстояние,  $D$  – диаметр линзы),  $\Delta f$  – полоса частот,  $I_s$  – ток насыщения идеального диода,  $h$  – постоянная Планка,  $c$  – скорость света,  $q$  – заряд электрона,  $S_p$  – площадь поверхности линзы,  $\Omega$  – телесный угол поля зрения элемента системы,  $\lambda_a$  и  $\lambda_b$  – пределы интегрирования по длинам волн. При выводе уравнения (1) были использованы результаты, приведенные в [6]. Вместо обнаружительной способности  $D^*$  нами были использованы величины квантовой эффективности  $\eta(\lambda)$ , темнового тока  $I_s$  и фототока  $I_{ph}$ , значения которых для фотодиода определялись численным решением уравнения непрерывности.

Полоса частот  $\Delta f$  выбирается минимально возможной для достижения максимального времени накопления фототока конденсатором единичной ячейки считывания мультиплексора. Предполагая, что зарядовая емкость в каждой ячейке матричного фотоприемника заполняется на 50%, получаем время интегрирования

$$\tau_{int} = \frac{qN_{int}}{2(I_{ph} + I_s)} \text{ и } \Delta f = \frac{1}{2\tau_{int}},$$

где  $N_{int}$  – количество электронов в зарядовой емкости. Для расчетов были приняты следующие значения параметров:  $\lambda_a = 0$ ,  $\lambda_b = 18$  мкм,  $F = 2$ ,  $t_{op} = 1$  и пропускание атмосферы  $t_a$  для расстояния 1800 м из [6].

Результаты расчетов при температуре фона  $T = 300$  К и емкости конденсатора  $5 \times 10^7$  электронов [7] для различной толщины и состава  $x_f$  ВС приведены на рис. 2.

Из рис. 2а видно, что NETD уменьшается с увеличением толщины широкозонного ВС, достигая значения 0,018–0,019 К при толщине более 6 мкм. На рис. 2б приведены зависимости NETD от состава для разной толщины ВС. Наблюдается минимум при  $x_f = 0,24$ . Таким образом, с учетом возможностей технологии МЛЭ, толщина ВС должна быть порядка 5 мкм.

При увеличении концентрации доноров в ВС свыше  $4 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup> уровень Ферми располагается в зоне проводимости. Изменение коэффициента поглощения света, вычисленное с учетом сдвига Мосса–Бурстейна по формулам Андерсона [8],

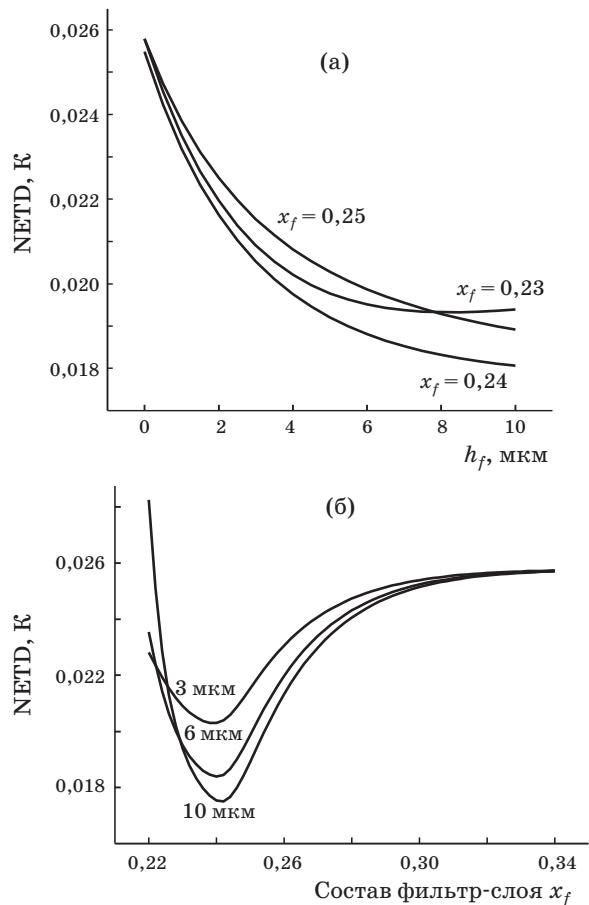


Рис. 2. Зависимости NETD от толщины ВС ( $h_f$ ) с составом  $x_f = 0,24 \pm 0,01$  (а), от состава ВС толщиной 3–10 мкм (б).

таково, что сдвиг  $\Delta\lambda$  по уровню  $\alpha = 2000$  см<sup>-1</sup> составляет 0,4–1 мкм для концентраций  $(1-4) \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup>. С учетом этого сдвига оптимальный состав ВС толщиной около 5 мкм, соответствующий минимальному значению NETD, будет  $x_f = 0,23$  для  $n = 4 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и  $x_f = 0,235$  для  $n = 1 \times 10^{16}$  см<sup>-3</sup> ( $n$  – концентрация электронов).

Также проводилась оптимизация толщины ВС как эффективного отрезающего фильтра для состава  $x = 0,24$  расчетом квантовой эффективности в одномерной геометрии фотодиода. В расчетах использовались типичные параметры фоточувствительного слоя: толщина 7,5 мкм, состав  $x_{CdTe} = 0,22$  ( $\lambda_{0,5} = 10,76$  мкм), концентрация акцепторов  $N_a = 8 \times 10^{15}$  см<sup>-3</sup>, время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_e = 12$  нс. Расчет проводился без учета сдвига Мосса–Бурстейна спектральной чувствительности при полной рекомбинации носителей в ВС.

На рис. 3 приведены результаты численного расчета ампер-ваттной чувствительности в зави-

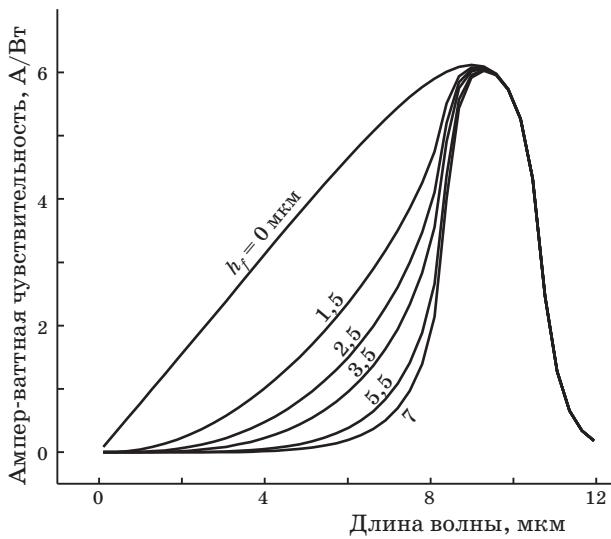


Рис. 3. Зависимости ампер-ваттной чувствительности одномерного фотодиода от длины волны падающего излучения при разных толщинах фильтр-слоя с составом  $x_{\text{CdTe}} = 0,24$  ( $\lambda_c = 8,45$  мкм).

симости от длины волны падающего излучения при разной толщине ВС с составом  $x_{\text{CdTe}} = 0,24$ . Из расчета следует, что с увеличением толщины эффективность ВС как коротковолнового отрезающего фильтра растет, достигая при толщине 7 мкм практически 100% аналога внешнего интерференционного фильтра, используемого для длинноволновых (8–12 мкм) ИК ФП.

### Экспериментальные результаты

Гетероэпитаксиальные структуры на основе КРТ были выращены методом МЛЭ на подложках диаметром 51 мм из GaAs с ориентацией (013) с буферными слоями ZnTe и CdTe. Распределение состава по толщине приведено на рис. 4. На поверхности буферного слоя CdTe последовательно выращивались

1 – широкозонный ВС с составом  $x_f = 0,26$  и толщиной 4,55 мкм, который в процессе роста легировался индием до концентрации порядка  $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ;

2 – слой типа “горбик” с увеличением до  $x_f = 0,275$  и затем с уменьшением состава  $x_f$  на толщине около 1 мкм;

3 – фоточувствительный однородный слой состава  $x_f = 0,22$  толщиной 6–8 мкм;

4 – широкозонный вариозонный слой толщиной 0,4 мкм и конечным составом  $x_f = 0,41$  для пассивации фоточувствительного слоя [2].

Методом низкотемпературной планарной технологии [9] на выращенных вариозонных слоях КРТ *p*-типа были изготовлены матричные фотоприемники форматом  $320 \times 256$  элементов с шагом фоточувствительных элементов 30 мкм. Фотодиоды  $n^+ - p$  сформированы имплантацией  $B^+$  и расположены в слое 3. Площадь *n*-*p*-переходов составляла  $14 \times 14$  мкм<sup>2</sup>.

Типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) и дифференциальное сопротивление диодов матричных фотоприемников формата  $320 \times 256$  элементов с шагом фоточувствительных элементов 30 мкм представлены на рис. 5.

ВАХ диода имеет идеальную “полочку” при обратных смещениях до -200 мВ. Исходя из величины дифференциального сопротивления при нулевом смещении  $R_d(0) = 5$  Мом и площади фоточувствительного элемента  $A = 8 \times 10^{-6}$  см<sup>2</sup>, определяемой диффузионной длиной  $L_n \approx 7$  мкм и размерами области *n*-типа  $14 \times 14$  мкм, получаем оценку параметра  $R_0 A = 40$  Ом см<sup>2</sup>. Такое значение  $R_0 A$  совпадает с предельными расчетными и экспериментальными данными для  $n^+ - p$ -фотодиодов [6].

Холловские измерения показывают электронный тип проводимости структуры с сопротивлением 10 Ом, определяемый проводимостью высокопроводящего слоя, который, в свою очередь, при формировании изображения с помощью ИК ФП форматом  $320 \times 256$  элементов устраняет эффект “бублика”.

На рис. 6 приведены зависимости спектрального фотоотклика фотодиодов, полученные при прямом падении излучения непосредственно на фотодиод и через подложку из GaAs и ВС. Из приведенных данных следует, что фотоотклик фотодиода начинается с 5,7 мкм и составляет 0,1 от максимального значения при падении излучения на фотодиод через ВС. При прямом падении

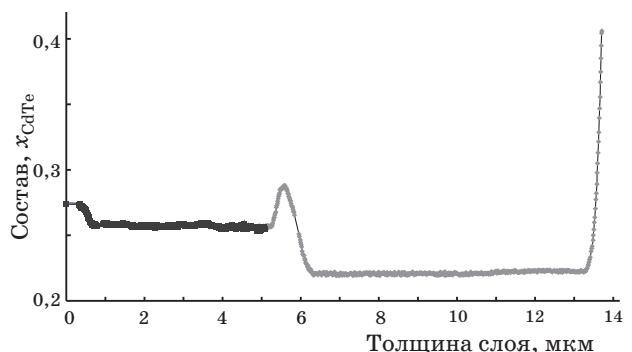


Рис. 4. Распределение состава КРТ по толщине ГЭС КРТ МЛЭ (АГ) (шифр КРТ070313). Пояснения в тексте.

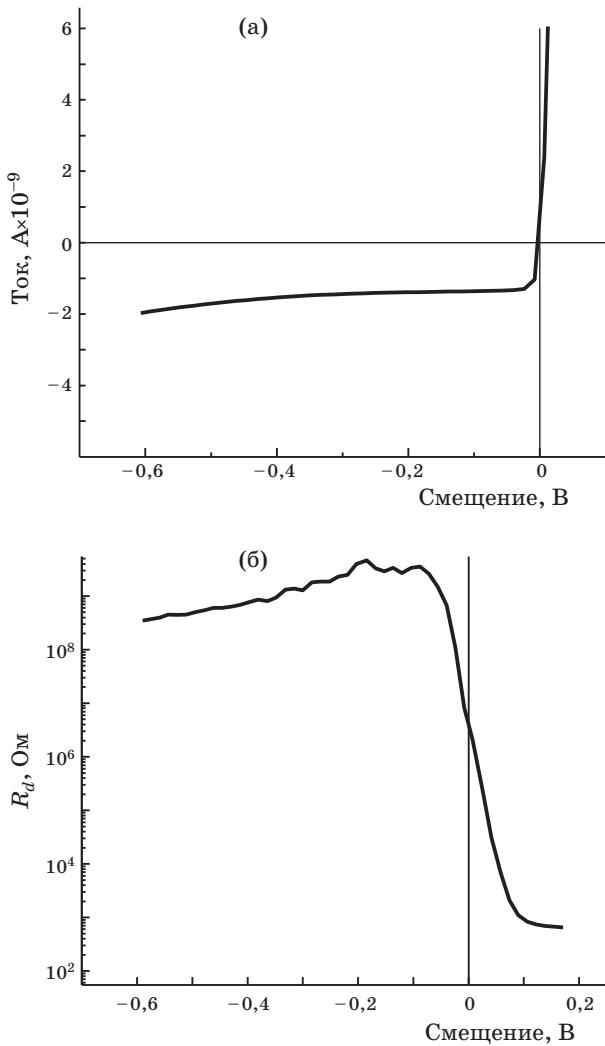


Рис. 5. Типичные ВАХ (а) и дифференциальное сопротивление (б) фотодиода ИК ФП формата 320×256.

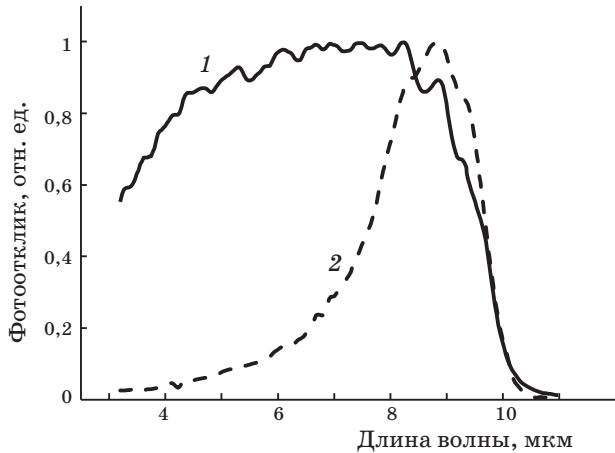


Рис. 6. Относительная спектральная чувствительность фотодиодов ИК ФП формата 320×256 при прямом падении излучения на фотодиод (1) и через подложку из GaAs и ВС (2).

на этой длине волны фотоотклик составляет 0,9 от максимального значения и чувствительность фотодиода начинается с коротких длин волн ( $\lambda < 1 \text{ мкм}$ ). Это свидетельствует о высокой эффективности ВС как отрезающего коротковолнового фильтра.

Гибридная сборка матричных ИК ФП осуществлялась методом холодной сварки индивидуальных микростолбов под давлением [9, 10]. ФЧЭ и мультиплексор ориентировали относительно друг друга по осям соединяемых матриц так, чтобы отклонение от идеального совпадения краевых индивидуальных микростолбов было не более 2 мкм в плоскости сварки ( $XY$ ) и перекос по оси  $Z$  не превосходил  $\pm 1 \text{ мкм}$ . В процессе сжатия предусмотрена процедура автопланаризации их поверхностей. К моменту завершения процесса холодной сварки планарные поверхности останавливаются на заданном расстоянии друг от друга.

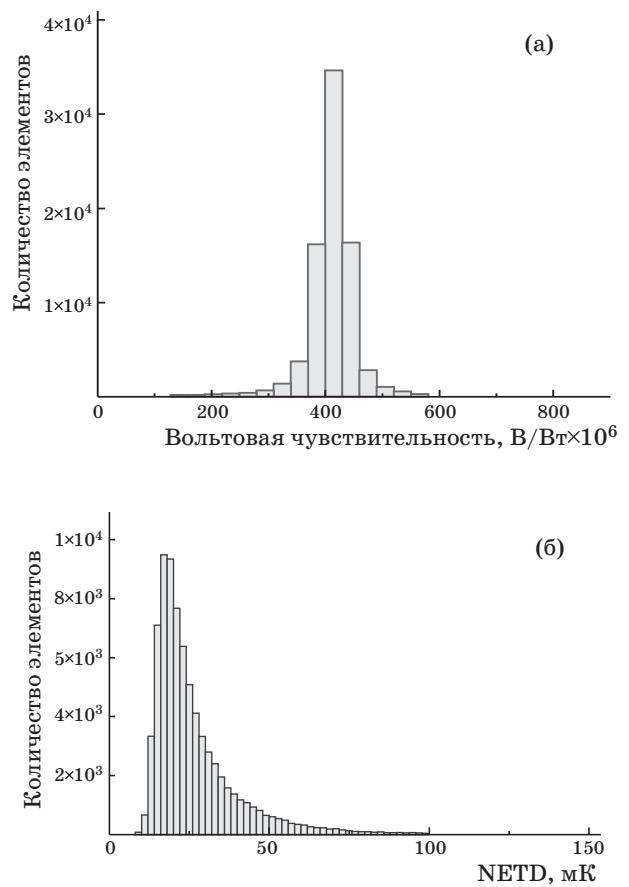


Рис. 7. Гистограммы вольтовой чувствительности (а) и NETD (б) диодов матричного ИК ФП форматом 320×256 элементов. Среднее значение вольтовой чувствительности  $4,14 \times 10^8 \text{ В/Вт}$ , СКО – 7,6%; среднее значение NETD – 27 мК, СКО – 59%.

На рис. 7 приведены гистограммы вольтовой чувствительности и NETD матричного ИК ФП форматом  $320 \times 256$  элементов.

Расчетное значение NETD для ИК ФП на основе ГЭС КРТ МЛЭ с широкозонным ВС (при условиях, соответствующих эксперименту:  $F = 1,75$ ,  $t_{op} = 0,95$  и  $t_a = 1$ ) лежит в интервале  $16\text{--}19,5$  мК, при этом накопительная емкость мультиплексора ( $C_q = 2\text{--}3$  пКл) заполняется на 70%. Из гистограммы (рис. 7б) видно, что примерно 40% общего количества фотодиодов ИК ФП форматом  $320 \times 256$  имеют  $\text{NETD} < 19$  мК. Остальные фотодиоды имеют большие значения NETD вплоть до 100 мК для отдельных фотодиодов. Такие значения NETD, возможно, связаны с шумами, обусловленными повышенным темновым током, шумом  $1/f$ , шумами мультиплексора, контактов и др.

Таким образом, широкозонный высокопроводящий слой обеспечивает низкое последовательное сопротивление и эффективно выполняет функцию отрезающего коротковолнового фильтра, что позволяет уменьшить влияние фонового излучения и улучшить параметры матричных ИК ФП форматом  $320 \times 256$  элементов.

## Заключение

1. Разработана новая конструкция фоточувствительных элементов на основе варизонных гетероэпитаксиальных структур теллурида кадмия и ртути, полученных методом МЛЭ, с широкозонным высокопроводящим слоем  $n$ -типа проводимости, легированного индием, одновременно выполняющим функцию высокопроводящего слоя и коротковолнового отрезающего фильтра.

2. На основе анализа NEDT и ампер-ваттной чувствительности определены оптимальные толщина и состав широкозонного высокопроводящего слоя как коротковолнового отрезающего фильтра, составляющие соответственно менее 5 мкм и 0,24 молярных долей CdTe.

3. Изготовлены фотодиодные матрицы  $320 \times 256$  элементов с помощью ионного легирования бором ГЭС КРТ МЛЭ  $p$ -типа с широкозонным высокопроводящим слоем. Темновые токи высококачественных фотодиодов составляют  $1,5\text{--}2$  нА и лимитированы диффузионным компонентом; при этом параметр  $R_0A = 40$  Ом см $^2$ .

4. Методом гибридной сборки на индивидуальных столбах фоточувствительного фотодиодного элемента и мультиплексора изготовлены образцы матричных ИК ФП форматом  $320 \times 256$  элемен-

тов. Спектральная чувствительность по уровню 0,5 от максимального значения лежит в диапазоне 8–10 мкм. Вольтова чувствительность, пороговая облученность и среднее значение NETD в максимуме чувствительности составляют соответственно  $4,1 \times 10^8$  В/Бт,  $1,02 \times 10^{-7}$  Вт/см $^2$  и 27 мК. Более 40% фотодиодов имеют NETD менее 19 мК.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *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. V. 5834. P. 83–91.
2. *Dvoretsky S.A., Varavin V.S., Mikhailov N.N., Sidorov Yu.G., Vasiliev V.V., Ovsyuk V.N., Nikitin M.S., Lartsev I.Yu., Aseev A.L. MWIR and LWIR detectors based on HgCdTe/CdZnTe/GaAs heterostructures* // Proc. SPIE. 2005. V. 5964. P. 75–87.
3. *Васильев В.В., Варавин В.С., Захарьяш Т.И., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Овсяк В.Н., Осадчий В.М., Сидоров Ю.Г., Суслаков А.О. Фотодиоды с низким последовательным сопротивлением на основе варизонных эпитаксиальных слоев Cd<sub>x</sub>Hg<sub>1-x</sub>Te* // Оптический журнал. 1999. Т. 66. № 12. С. 69–72.
4. *Васильев В.В., Варавин В.С., Дворецкий С.А., Михайлов Н.Н., Суслаков, А.О., Сидоров Ю.Г., Асеев А.Л. Фотодиодный приемник инфракрасного излучения* // Патент РФ. № 2310949. 2007.
5. *Васильев В.В., Осадчий В.М., Суслаков А.О., Дворецкий С.А. Влияние варизонных слоев на эффективное время жизни носителей заряда в фоторезисторах на основе CdHgTe* // ФТП. 1999. Т. 33. В. 3. С. 293–296.
6. *Рогальский А. Инфракрасные детекторы*. Пер. с англ. / Под ред. А.В. Войцеховского. Новосибирск: Наука, 2003. С. 636.
7. *Рогальский А. Третье поколение ИК-приемников на базе HgCdTe* // Прикладная Физика. 2003. № 4. С. 54.
8. *Anderson W.W. Absorbtion constant of Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te and Hg<sub>1-x</sub>Cd<sub>x</sub>Te alloys* // Infrared Physics. 1980. V. 20. P. 363–372.
9. *Васильев В.В., Дворецкий С.А., Есаев Д.Г., Захарьяш Т.И., Клименко А.Г., Козлов А.И., Марчихин И.В., Овсяк В.Н., Талипов Н.Х., Сидоров Ю.Г., Суслаков А.О. Фотоприемники на основе слоев Cd–HgTe, выращенных методом молекулярно-лучевой эпитаксии* // Автометрия. 2001. № 3. С. 4–8.
10. *Vasilyev V.V., Esaev D.G., Klimenko A.G., Kozlov A.I., Krymsky A.I., Marchishin I.V., Ovsyuk V.N., Romashko Z.N., Sulyakov A.O., Talipov N.Kh., Voinov V.G., Zakharyash T.I., Siclorov Yu.G., Varavin V.S., Dvoretsky S.A., Mikhailov N.N. Focal plane arrays based on HgCdTe epitaxial layers MBE-grown on GaAs substrates* // Proc. SPIE. 1997. V. 3061. P. 956–961.