

К. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ, Е. В. АНДРЕЕВА, М. В. АПАТСКАЯ, С. Г. БУНЧУК,
к. ф.-м. н. Н. В. ВУЙЧИК, к. ф.-м. н. А. Г. ГОЛЕНКОВ, Н. В. ДМИТРУК,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСКИЙ, к. ф.-м. н. И. А. ЛЫСЮК, к. ф.-м. н. Е. В. СВЕЖЕНЦОВА,
М. И. СМОЛИЙ, член-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ

Украина, г. Киев, Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины

E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

ДИСКРЕТНЫЕ ФОТОПРИЕМНИКИ СРЕДНЕВОЛНОВОГО ИК-ДИАПАЗОНА СПЕКТРА НА ОСНОВЕ HgCdTe

Разработана топология и технологические режимы изготовления дискретных фотодиодов (диаметр 0,5–1,5 мм) средневолнового инфракрасного диапазона спектра на базе эпитаксиальных слоев кадмий-ртуть-теллур (КРТ). Исследованы оптические, фотоэлектрические и вольт-амперные характеристики дискретных КРТ-фотодиодов для спектрального диапазона 3–5 мкм с целью достижения необходимых эксплуатационных параметров. Установлено, что полученные фотодиоды могут работать в режимах, ограниченных флуктуациями фонового излучения (BLIP-режим).

Ключевые слова: HgCdTe, фотодиод, ИК-диапазон, ВАХ.

Для охлаждаемых приемников инфракрасного (ИК) излучения имеются уже сформированные технологии с хорошо определенной архитектурой, а их применение хорошо известно. Тем не менее, существуют возможности для улучшения спектрального диапазона и разрешения при одновременном понижении цены, размера приборов, их массы и мощности, а также для расширения области использования ИК-визуализации для целей двойного назначения, национальной безопасности и коммерческих приложений. При изготовлении ИК-детектора самым важным фактором, возможно, является используемый материал. На данный момент многие исследователи и производители фотодиодов утверждают, что наилучшим полупроводниковым материалом для ИК-детекторов является кадмий-ртуть-теллур (КРТ) [1–3], что обусловлено возможностью изменения края фоточувствительности изменением химического состава КРТ. Это позволяет, например, уменьшить уровень шумов фотоприемника, поскольку ширина запрещенной зоны для диапазона фоточувствительности может быть выбрана в точном соответствии спектральному диапазону фотоответа.

Энергетическая зонная структура HgCdTe характеризуется такими особенностями, как:

- возможность задавать ширину запрещенной зоны при выращивании пленок с высокой пространственной однородностью и низкой плотностью дислокаций ($< 1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-2}$) несколькими эпитаксиальными методами (жидкофазной, молекулярно-лучевой, металлоорганической газофазной эпитаксией) на согласованных по постоянной решетки и прозрачных в ИК-диапазоне подложках CdZnTe;

- низкая концентрация неосновных носителей заряда ($< 1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$);

- наличие подходящих легирующих примесей для создания *n*- и *p*-типа проводимости;

- универсальные методы для формирования мезоструктур и планарных гомо- и гетеропереходов;

- относительно небольшое значение диэлектрической константы, что является важным для емкости *p–n*-перехода;

- возможность использования CdTe в качестве пассивационного покрытия, что способствует реализации фотодиодов с низким значением $1/f$ -шума и высокой радиационной стойкостью [4].

Такое сочетание зонной структуры и свойств материала позволяет получать качественные ИК-детекторы (в т. ч. фотосопротивления, одно- и мультиспектральные фотодиоды, фотодиодные матрицы) с рабочими характеристиками, близкими к теоретически возможным, и изменять граничную длину волны в диапазоне 1,5–20 мкм.

Крупноформатные фотовольтаические матрицы являются основой для технологии изготовления широко применяемых гибридных фотоприемных устройств (ФПУ) [5]. Наибольшее распространение получили матрицы из $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x = 0,2–0,3$) для спектрального диапазона 8–12 и 3–5 мкм. ФПУ на 8–12 мкм обеспечивают наилучшую температурную чувствительность и помехозащищенность в условиях задымленности и запыленности. В этом спектральном диапазоне находится максимум собственного теплового излучения тел, находящихся при температуре 300 К. Согласно закону смещения Вина, максимум собственного теплового излучения тел при их нагревании смещается в коротковолновую область, поэтому для более нагретых тел оптимальным является спектральный диапазон 1–5 мкм. Для $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$

($x \approx 0,3$) есть возможность изготовления матриц на спектральный диапазон 3–5 мкм. Их рабочая температура может быть повышена до 120–150 К без ухудшения характеристик, обеспечивающих функционирование в режимах, ограниченных фоновым излучением, что является невозможным для матриц на основе InSb. Это обусловлено как разными коэффициентами температурного расширения запрещенной зоны E_g (в HgCdTe $dE_g/dT > 0$, а в InSb $dE_g/dT < 0$), так и изначально более коротковолновой границей fotocувствительности фотоприемников на основе HgCdTe на область спектра 3–5 мкм (красная граница fotocувствительности λ_{co} фотоприемников на основе $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) составляет около 5,0 мкм, а на основе InSb — 5,6 мкм при $T \approx 80$ К). Эквивалентная шуму разность температур для матриц этого спектрального диапазона при 80 К равна 7–20 мК [5, 6].

Для некоторых специальных приложений актуальным является вопрос создания дискретных фотодиодов с большой площадью чувствительных элементов ($\varnothing 1,25$ или $3,2 \times 3,2$ мм, напр., [7]) с возможностью получения больших сигналов, дальности обнаружения и т. д.

Целью данного исследования была разработка ИК-фотодиодов средневолнового диапазона ($\lambda = 3–5$ мкм, $T \approx 80$ К) с диаметром чувствительных элементов $d_{\text{чз}} = 0,5–1,5$ мм на структурах HgCdTe, выращенных методом жидкофазной эпитаксии, и исследование их оптических, электрических и фотоэлектрических характеристик для достижения необходимых эксплуатационных параметров.

Формирование fotocувствительных структур

Твердые растворы кадмий-ртуть-теллур являются нестойкими к механическим напряжениям и повышенной температуре. Физико-химические свойства этого материала накладывают свои требования к температурным режимам проведения технологических процессов и ограничивают возможность использования стандартных операций, принятых в микроэлектронике, что обусловило необходимость разработки некоторых технологических решений.

Для изготовления ИК-фотодиодов на основе узкозонного полупроводника HgCdTe использовались слои, выращенные методом жидкофазной эпитаксии на подложках $Cd_{1-y}Zn_yTe$ ($y \approx 0,03–0,05$), имеющих близкие параметры решеток, что позволяет получать структуры с малым количеством дислокаций ($< 10^5 \text{ см}^{-2}$) на металлургической границе раздела и самих слоев. Эпитаксиальные слои $Hg_{1-x}Cd_xTe$ ($x \approx 0,3$) p -типа проводимости характеризовались высокой однородностью состава по площади образца ($\leq 10^{-3}$ мольных долей CdTe), концентрация дырок составляла $N_p \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, холловская под-

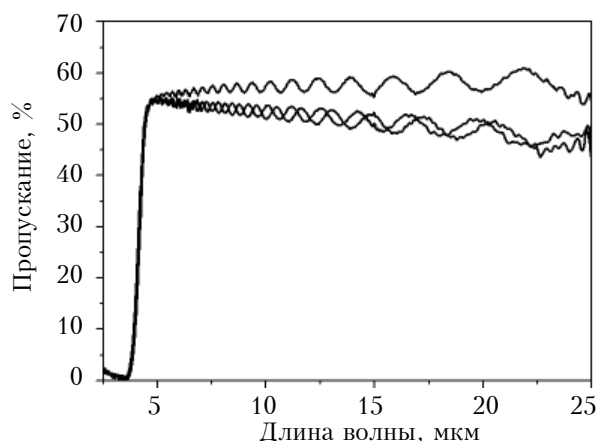


Рис. 1. Спектральные зависимости оптического пропускания эпитаксиальных пленок КРТ, измеренные с помощью ИК-Фурье-спектрометра "Spectrum BX-II" при $T = 300$ К

вижность $\mu_{77} \approx 400–450 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$. Толщина пленок КРТ изменялась в пределах 15–20 мкм.

На рис. 1 приведены спектральные зависимости ИК-пропускания эпитаксиальных слоев $Hg_{1-x}Cd_xTe$ при $T = 300$ К. Эти спектры, полученные при данной температуре, обычно используются для определения длинноволновой границы фотосоответа λ_{co} при температуре функционирования КРТ-приемников $T \approx 80$ К на уровне 50% максимального коэффициента пропускания T_{max} [8].

Из данных по оптическому пропусканию (рис. 1) было найдено, что $\lambda_{co} \approx 4,11$ мкм, что соответствует ширине запрещенной зоны $Hg_{1-x}Cd_xTe$ $E_g = 0,3017 \text{ эВ}$ ($x \approx 0,309$, $\lambda_{co} \approx 4,11$ мкм при $T \approx 80$ К).

Из рис. 1 видно, что кривые оптического пропускания характеризуются четким и резким краем, что свидетельствует об отсутствии толстого переходного слоя с градиентным составом между подложкой и пленкой, а наличие интерференции свидетельствует о хорошем качестве эпитаксиальных пленок КРТ.

Процесс изготовления фотодиодов состоит из многих технологических операций, включая нанесение защитного покрытия, фотолитографические процессы для формирования окон под имплантацию и формирования металлических покрытий, химическую обработку поверхности, разделение пластины на отдельные чипы, монтаж, корпусировку, формирование электрических контактов и др.

Свойства ИК-КРТ-фотодиодов существенно зависят от химической и электронной структуры поверхности, поэтому существует необходимость в создании пассивационного покрытия для уменьшения поверхностных токов и предотвра-

щения деградации структур. В качестве пассивационного покрытия нами использовался теллурид кадмия, который наносился методом молекулярной эпитаксии «горячая стенка» в специально подобранных режимах, предотвращающих длительный нагрев структуры $\text{HgCdTe}/\text{CdZnTe}$, который может привести к изменению химического состава поверхностного слоя КРТ. Пассивационные слои CdTe характеризовались мелкозернистой поликристаллической структурой, а их толщина составляла примерно 60 нм и контролировалась с помощью эллипсометрических измерений.

Для создания $p-n$ -переходов в узкозонном полупроводнике HgCdTe использовался метод ионной имплантации V^+ с дозой $(2-3) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$. При этом основным механизмом формирования легированной области является тот, когда ионы бора выбивают атомы ртути, которые переходят в междоузлия, становясь электрически активными дефектами, ответственными за создание n -области $p-n$ -перехода.

При формировании металлических контактов к фоточувствительным элементам необходимо провести ряд технологических операций, в том числе вскрытие окон в пассивационном слое CdTe для создания омического контакта, нанесение металлического покрытия и формирование топологии фотодиода методом травления нанесенного металла без нарушения защиты остальных участков чипа. Достичь этого удалось благодаря технологическому решению, устанавливающему определенный порядок проведения фотолитографических операций, что позволило использовать фоторезист для защиты пассивации от воздействия агрессивных химических травителей. В качестве металла для контактов использовался индий, который наносился методом термического вакуумного распыления в установке с безмасляной откачкой. Толщина пленки и ее латеральные размеры контролировались с помощью интерференционного 3D-профилометра «Микрон-альфа» (рис. 2). Толщина нанесенного слоя индия составляла 1–2 мкм, что является достаточным для формирования электрических контактов методом ультразвуковой сварки.

В результате проведенного технологического цикла были изготовлены массивы КРТ-фотодиодов с площадью A_d чувствительных элементов, равной $0,785 \cdot 10^{-2}$ и $1,77 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$ (рис. 3). После контроля электрофизических параметров пластину разделяли на дискретные фотодиоды, к которым затем формировали электрические контакты, далее фотодиоды монтировали в корпусе и помещали в криостат для контроля их фотоэлектрических параметров.

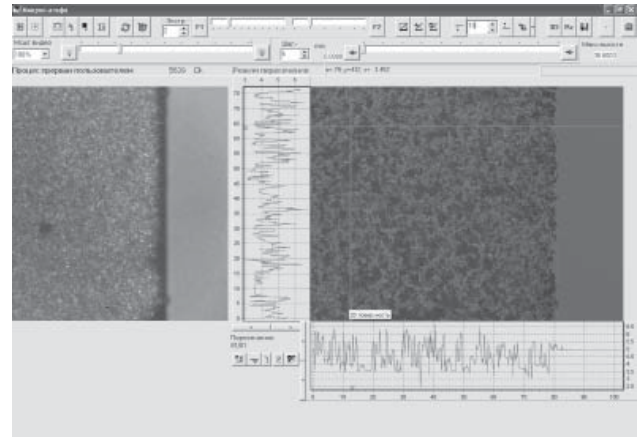


Рис. 2. Фотографии металлической пленки, нанесенной на шину КРТ-чипа:

слева — изображение в оптическом микроскопе; справа — 2D-профиль толщины пленки In , выращенной на поверхности фотодиода

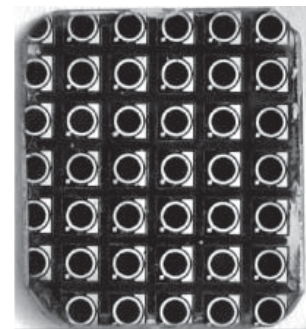
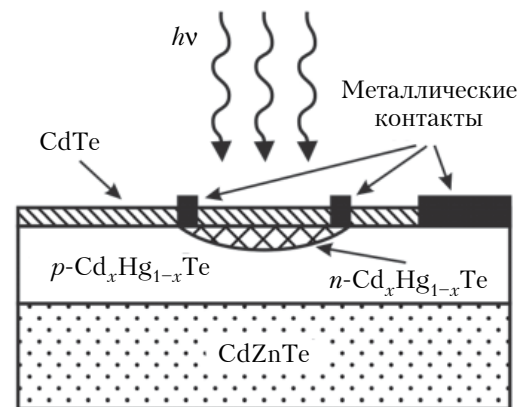


Рис. 3. Конструкция фотодиода и фотография массива КРТ-фотодиодов для средневолнового ИК-диапазона с $d_{\text{чз}} = 1,5 \text{ мм}$

Полученные результаты и их обсуждение

Предельные характеристики фотодиодов определяются величиной тока детектора при обратном смещении и произведением динамического сопротивления при нулевом смещении на площадь фоточувствительного элемента $R_0 A_d$ при температуре 77 К [9]. Темновой ток должен быть минимизирован для увеличения чувствительно-

сти фотодетектора. Доминирующими механизмами, вносящими вклад в темновой ток HgCdTe-фотодиодов, являются диффузионный ток, межзонное туннелирование, Оже-рекомбинация, туннелирование через ловушки и рекомбинационный процесс Шокли—Рида—Холла. Два последних механизма обусловлены процессами токопереноса через уровни ловушек в запрещенной зоне.

Обнаружительная способность D^* является нормализованным параметром, который характеризует качество дискретных фотоприемников и сочетает в себе такие характеристики, как чувствительность и шум фотоприемника, связанный с флуктуациями потока фотонов фонового излучения [6]:

$$D^* = (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / NEP = S_I (A_d \cdot \Delta f)^{1/2} / I_{ш}, \quad (1)$$

где Δf — ширина полосы усилительного тракта;
 NEP — эквивалентная шуму мощность (noise equivalent power), $NEP = I_{ш} / S_I$;

S_I — спектральная чувствительность;

$I_{ш}$ — шумовой ток.

Значение NEP определяется также другими шумами фотоприемника. Если учитывать еще и тепловой шум (шум Джонсона—Найквиста), определяемый динамическим темновым сопротивлением фотодиодов $R_0 = -[dI/dU(I)]_{U=0}^{-1} = \beta k_B T / (qI_0)$, где U — напряжение смещения; β — коэффициент неидеальности диода, то в этом случае шумовой ток будет определяться флуктуациями и потока фотонов фонового излучения и плотностью потока фонового излучения N_{ϕ} .

В [10] приведена формула для оценки плотности потока фонового излучения

$$N_{\phi} = \frac{\Omega_i}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_{co}} \frac{2\pi c}{\lambda^4 \left(\exp \frac{hc}{k_B T \lambda} - 1 \right)} d\lambda; \quad (2)$$

где c — скорость света;

Ω_i — пространственный угол зрения, определяемый холодной диафрагмой приемника излучения, $\Omega_i = \pi \sin^2 \theta_i$;

θ_i — плоский угол зрения;

k_B — постоянная Больцмана.

Пределы интегрирования в формуле (2) $\lambda_{co} = 5$ мкм и $\lambda_1 = 3$ мкм определяют область спектральной чувствительности фотоприемника.

Было найдено, что $N_{\phi} = 6,5 \cdot 10^{15}$ см⁻²·с⁻¹ для $\Omega_i = 1,57$ ср ($\theta_i = 90^\circ$) и $N_{\phi} \approx 8,8 \cdot 10^{14}$ см⁻²·с⁻¹ для $\Omega_i = 0,21$ ср ($\theta_i = 30^\circ$) при температуре фона $T = 300$ К.

Для двух указанных выше видов шумов и идеального фотодиода выражение (1) для нахождения обнаружительной способности может быть записано в виде [10]

$$D_{\lambda_{co}}^* = \frac{\eta q \lambda_{co}}{hc} \left(\frac{4k_B T}{R_0 A_d} + 2q^2 \eta N_{\phi} \right)^{-1/2}, \quad (3)$$

где η — квантовая эффективность фотодиода;

q — заряд электрона.

В режиме ограничения фоном (BLIP-режим), проведенные в [10] расчеты показали, что для указанных углов зрения обнаружительная способность $D_{\lambda_{co}}^*$ при $\lambda_{co} = 5$ мкм составляет $1,5 \cdot 10^{11}$ и $4,2 \cdot 10^{11}$ см·Гц^{1/2}/Вт, а удельная обнаружительная способность для спектрального диапазона $\lambda = 3-5$ мкм — $2,0 \cdot 10^{10}$ и $5,5 \cdot 10^{10}$ см·Гц^{1/2}/Вт соответственно.

При $4k_B T / (R_0 A_d) \ll 2q^2 \eta N_{\phi}$ (т. е. при больших значениях $R_0 A_d$) величина $D_{\lambda_{co}}^*$ определяется вторым слагаемым в скобках выражения (3), и приемник работает в BLIP-режиме, обусловленном флуктуациями потока фотонов в фоновом излучении.

При $4k_B T / (R_0 A_d) \gg 2q^2 \eta N_{\phi}$ (т. е. при низких значениях $R_0 A_d$ или в условиях низких фоновых нагрузок, например в астрономических приложениях) функционирование фотодиода определяется его динамическим сопротивлением и тепловым шумом. Также, при низких значениях $R_0 A_d$ и при наличии значительного шума, связанного с большими потоками фонового излучения, через диод будут течь большие токи, обусловленные его невысоким качеством (функционирование фотодиода определяется его динамическим сопротивлением). При приведенных выше значениях потока фоновых фотонов N_{ϕ} эффективная фоновая нагрузка $W_{эфф}$ составляет $3,3 \cdot 10^{-4}$ и $4,4 \cdot 10^{-5}$ Вт/см² соответственно.

Для обеспечения функционирования фотодиодов средневолнового ИК-диапазона ($\lambda = 3-5$ мкм) в BLIP-режиме при указанных значениях угла зрения из формулы (3) следует требование $R_0 A_d \geq 5 \cdot 10^3$ Ом·см².

Для контроля электрических параметров изготовленных фотодиодов использовали их вольт-амперные характеристики (ВАХ), которые измеряли микронзондовым методом при азотных температурах на специально разработанном оборудовании [11]. На рис. 4 приведена типичная ВАХ одного из изготовленных дискретных фо-

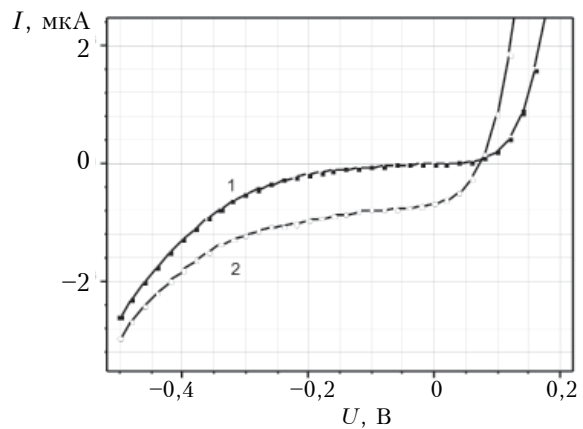


Рис. 4. Темновая (1) и полученная при фоновом освещении (2) ВАХ дискретного КРТ-фотодиода (№ 8) с $d_{\text{чз}} = 1,5$ мм для спектрального диапазона 3—5 мкм, измеренные при $T = 77$ К

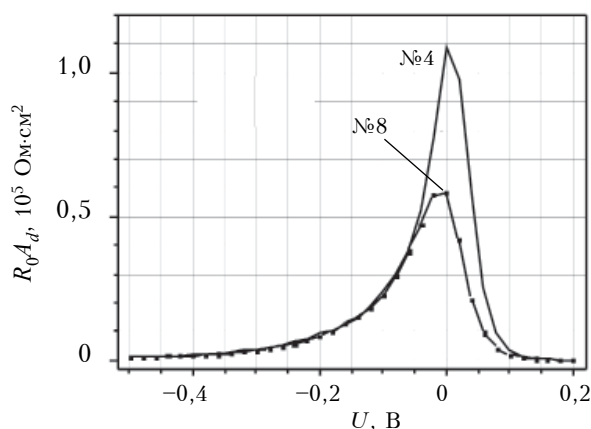


Рис. 5. Зависимости параметра $R_0 A_d$ от напряжения смещения, полученные для двух (№ 4 и № 8) дискретных КРТ-фотодиодов с $d_{\text{чз}} = 1,5$ мм

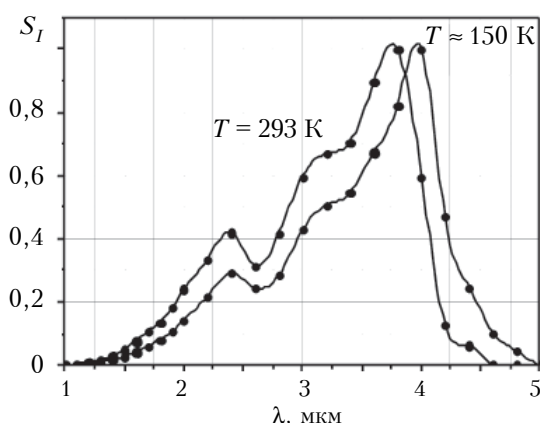


Рис. 6. Спектральные характеристики чувствительности фотодетектора на основе $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0,3$) при комнатной температуре и при охлаждении до 150 K

тодиодов (№ 8) $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ ($x \approx 0,309$). Анализ ВАХ показал, что темновой ток данного фотодиода при рабочем напряжении смещения -100 мВ составляет примерно 44 нА и возрастает при фоновом освещении более чем в 10 раз — до значения 770 нА.

На рис. 5 показаны зависимости параметра $R_0 A_d$ от напряжения смещения для двух (№ 4 и № 8) дискретных фотодиодов. Здесь видно, что при нулевом смещении значение $R_0 A_d$ для них составляет $1,08 \cdot 10^5$ и $0,57 \cdot 10^5$ Ом·см². То есть все диоды, даже с наименьшим значением $R_0 A_d$, удовлетворяют требованию $R_0 A_d \geq 5 \cdot 10^3$ Ом·см² и могут работать в BLIP-режиме.

На рис. 6 приведены спектральные зависимости чувствительности КРТ-фотодетектора ($x \approx 0,3$). Измерения проводились с использованием монохроматора SPM-2 с призмой NaCl UV-56. Полученные значения нормировались на спектр излучения абсолютно черного тела. Из рисун-

ка следует, что изготовленные КРТ-структуры фоточувствительны и при повышенных температурах и соответствуют указанному спектральному диапазону.

Изготовлены фотодиоды на основе слоев $\text{HgCdTe}/\text{CdZnTe}$, выращенных методом жидкофазной эпитаксии для средневолнового ИК диапазона спектра ($3-5$ мкм). Исследования оптических, электрических и фотоэлектрических характеристик разработанных ИК-фотодиодов на основе структур HgCdTe с диаметром чувствительных элементов $0,5-1,5$ мм показали, что в средневолновом диапазоне ($3-5$ мкм) эти устройства могут функционировать в режиме ограничения фоном (BLIP-режиме).

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Michael Kinch. Fundamentals of Infrared Detector Materials. — Bellingham, Washington: SPIE Press, 2007.
2. Сизов Ф.Ф. Фотоэлектроника для систем видения. — Киев: Академперіодика, 2008.
3. MCT's Advantages as an Infrared Imaging Material. http://www.leonardodrs.com/media/4279/201306_advantages_of_mct.pdf
4. Capper P., Garland J. Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications. — Wiley and Sons, 2011.
5. Филачев А.М., Таубкин И.И., Тришенков М.А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. — Москва: Физматкнига, 2010.
6. Сизов Ф.Ф. ИК-фотоэлектроника: фотонные или тепловые детекторы? Перспективы // СЕМСТ. — 2015. — Т. 12, №1. — С. 26—52.
7. Wimmers J.T., Davis R.M., Niblack C.A., Smith D.S. Indium antimonide detector technology at Cincinnati Electronics Corporation // Proc. SPIE. — 1988. — Vol. 930. — P. 125—138.
8. Chu J., Sher A. Physics and properties of narrow-gap semiconductors. — Springer, N.Y., 2008.
9. Saxena R. S., Bhan R. K., Sharma R. K. Sensitivity analysis of MWIR HgCdTe photodiodes physics of semiconductor devices // International Workshop on Physics of Semiconductor Devices, IWPSD 2007. — <https://doi.org/10.1109/IWPSD.2007.4472557>
10. Sizov F., Tsybrii Z., Vuichyk M. et al. HgCdTe photodiodes for infrared mid-wavelength region // Sensor Electronics and Microsystem Technologies. — 2016 — Vol. 13, N 1. — P. 49—55.
11. Сизов Ф.Ф., Забудский В.В., Голенков А.Г. и др. Методика измерения темновых токов полупроводниковых многоэлементных структур при криогенных температурах // Контрольно-измерительные приборы и автоматика. — 2007. — №1. — С. 4—7.

Дата поступления рукописи
в редакцию 09.11 2017 г.

К. ф.-м. н. З. Ф. ЦИБРИЙ, К. В. АНДРЕЄВА, М. В. АПАТСЬКА, С. Г. БУНЧУК,
к. ф.-м. н. М. В. ВУЙЧИК, к. ф.-м. н. О. Г. ГОЛЕНКОВ, Н. В. ДМИТРУК,
к. ф.-м. н. В. В. ЗАБУДСЬКИЙ, к. ф.-м. н. І. О. ЛИСЮК, к. ф.-м. н. К. В. СВЕЖЕНЦОВА,
М. І. СМОЛІЙ, член-кор. НАНУ, д. ф.-м. н. Ф. Ф. СИЗОВ

Україна, м. Київ, Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

ДИСКРЕТНІ ФОТОПРИЙМАЧІ СЕРЕДНЬОГО ІЧ-ДІАПАЗОНУ СПЕКТРА НА ОСНОВІ HgCdTe

Розроблено топологію та технологічні режими виготовлення дискретних фотодіодів (діаметр 0,5–1,5 мм) для середнього інфрачервоного діапазону спектра на основі епітаксійних шарів кадмій-ртуть-телуриду (КРТ). Досліджено оптичні, фотоелектричні та вольт-амперні характеристики дискретних КРТ-фотодіодів для спектрального діапазону 3–5 мкм з метою досягнення необхідних експлуатаційних параметрів. Встановлено, що одержані фотодіоди можуть працювати в режимах, обмежених флуктуаціями фонового випромінювання (BLIP-режим).

Ключові слова: HgCdTe, фотодіод, ІЧ-діапазон, ВАХ.

DOI: 10.15222/TKEA2017.6.08
UDC 621.383.522

Z. F. TSYBRII, K. V. ANDREEVA, M. V. APATSKA,
S. G. BUNCHUK, M. V. VUICHYK, O. G. GOLENKOV,
N. V. DMYTRUK, V. V. ZABUDSKY, I. O. LYSIUK,
K. V. SVEZHENTSOVA, M. I. SMOLII, F. F. SIZOV

Ukraine, Kyiv, V. E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine
E-mail: tsybrii@isp.kiev.ua

MEDIUM WAVELENGTH INFRARED HgCdTe DISCRETE PHOTODETECTORS

The authors have developed the topology and technological fabrication route for discrete photodiodes ($\varnothing = 0,5 - 1,5$ mm) for the mid wavelength infrared (MWIR) range, based on the mercury-cadmium-telluride (MCT) epitaxial layers. The paper describes technological processes of MCT photodiodes fabrication, including CdTe passivation layers growth, photolithographic processes for the formation of windows for B^+ implantation, formation of metallic coatings, chemical surface treatments, cutting of the wafer on the discrete chips, assembling and bonding of the electrical contacts. Optical, photoelectrical and current-voltage characteristics of discrete MCT photodiodes for the spectral range of 3–5 microns are investigated in order to achieve the necessary operational parameters. FTIR transmission spectra were measured to evaluate samples quality and find the composition of x of $Hg_{1-x}Cd_xTe$ epitaxial layers grown by liquid phase epitaxy method. The limiting characteristics of photodiodes, which are determined by the magnitude of the detector current at the reverse bias and the product of the dynamic resistance at zero bias by the area of the photosensitive element R_0A_d at the operating temperature of 77 K were discussed. The requirement for the parameter R_0A_d was estimated for the operation of photodiodes of the mid wavelength infrared range in the BLIP (background limited performance) mode for the angles of view $\theta_i = 90^\circ$ and $\theta_i = 30^\circ$: $R_0A_d \geq 5 \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$. It was found from dynamical resistance characteristics that without bias in these MCT MWIR photodiodes $R_0A_d \approx (0,57 - 1,08) \cdot 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ and these photodiodes can operate in BLIP mode.

Keywords: HgCdTe, photodiode, IR region, I-V characteristic.

REFERENCES

1. Michael Kinch. *Fundamentals of Infrared Detector Materials*. Bellingham, Washington, SPIE Press, 2007, 173 p.
2. Sizov F.F. *Fotoelektronika dlya sistem videniya* [Photoelectronics for imaging systems]. Kyiv, Akademperiodyca, 2008, 455 p. (Rus)
3. *MCT's Advantages as an Infrared Imaging Material*. http://www.leonardodrs.com/media/4279/201306_advantages_of_mct.pdf
4. Peter Capper, James Garland. *Mercury Cadmium Telluride: Growth, Properties and Applications*. Wiley and Sons, 2011.
5. Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. *Sovremennoe sostoyanie i magistral'nye napravleniya razvitiya tverdotel'noi fotoelektroniki*. [Current state and main directions of development of solid-state photoelectronics]. Moscow, Phizmatkniga, 2010, 125 p. (Rus).
6. Sizov F. IR-photoelectronics: photon or thermal detectors? Outlooks. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2015, vol. 12, iss. 1, pp. 26-52.
7. Wimmers J.T., Davis R.M., Niblack C.A., Smith D.S. Indium antimonide detector technology at Cincinnati Electronics Corporation. *Proc. SPIE*, 1988, vol. 930, pp.125-138.
8. Chu J., Sher A. *Physics and properties of narrow-gap semiconductors*. Springer, N.Y., 2008, 606 p.
9. Saxena R. S., Bhan R. K., Sharma R. K. Sensitivity analysis of MWIR HgCdTe photodiodes physics of semiconductor devices. *International Workshop on Physics of Semiconductor Devices*. <https://doi.org/10.1109/IWPSD.2007.4472557>
10. Sizov F., Tsybrii Z., Vuichyk M., Andreyeva K., Apatska M., Bunchuk S., Dmytruk N., Smolii M. HgCdTe photodiodes for infrared mid-wavelength region. *Sensor Electronics and Microsystem Technologies*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 49-55.
11. Sizov F., Zabudsky V., Golenkov O., Andreeva K., Guzenko G.O., Lysiuk I. *KIPiA*, 2007, no. 1, pp. 4-7. (Rus).