

Температурное разрешение тепловизионных систем с использованием фотоприемных устройств на основе CdHgTe

Н. И. Яковлева, К. О. Болтарь, А. В. Никонов

Рассмотрены основные фундаментальные и нефундаментальные механизмы ограничения температурного разрешения тепловизионных систем (ТПС) на основе фотоприемных устройств (ФПУ) из CdHgTe (в русскоязычном варианте – КРТ). Проведены расчеты температурного разрешения ТПС при диффузионном ограничении параметров ФПУ из КРТ. Показано, что для структуры КРТ P^+/n -типа проводимости при температуре $T = 77$ К значение эквивалентной шуму разности температур (ЭШРТ) составляет ~ 18 мК, в то время как для вакансионно-легированного материала N^+/p -типа оно составляет ~ 30 мК. Проанализированы способы увеличения температурного разрешения в ТПС на основе ФПУ из КРТ.

Ключевые слова: HgCdTe, КРТ, инфракрасный спектральный диапазон, ИК, гетероэпитаксиальные структуры, ГЭС, матрица фоточувствительных элементов, МФЧЭ, фотоприемное устройство, ФПУ, темновой ток, температурное разрешение, эквивалентная шуму разность температур, ЭШРТ.

Введение

Фотоприемные устройства (ФПУ), выполняющие тактические задачи в различных спектральных диапазонах, необходимы для систем дистанционного зондирования поверхности Земли с борта космических аппаратов.

Наиболее распространенными рабочими инфракрасными спектральными диапазонами современных ФПУ являются: ближний инфракрасный (ИК) диапазон (NWIR – 0,76...0,9 мкм); коротковолновый ИК-диапазон (SWIR – 0,9...3,0 мкм); средневолновый ИК-диапазон (MWIR – 3...5 мкм); длинноволновый ИК-диапазон (LWIR – 8...14 мкм). Наряду с ФПУ, работающими в нескольких областях ИК-диапазона спектра, создаются системы, способные принимать оптические сигналы в ультрафиолетовом (УФ) с длинами волн 0,18...0,4 мкм и видимом (0,4...0,76 мкм) диапазонах.

Для измерения параметров окружающей среды и целей в автоматическом или полуавтоматическом режимах, для идентификации и распознавания различных объектов на больших расстояниях при наличии помех тепловизионные системы (ТПС) на основе матричных фотоприемных устройств должны иметь высокие энергетическое, пространственное, температурное, спектральное и временное разрешения. Для оценки качества ТПС используется система основных параметров, а именно:

- температурное разрешение или эквивалентная шуму разность температур (ЭШРТ);
- угловой элемент разрешения;
- угол обзора;
- спектральный рабочий диапазон чувствительности;
- диапазон регистрируемых разностей температур;
- быстродействие;
- дальность обнаружения/распознавания объекта;
- вероятность обнаружения и распознавания объекта на заданной дальности и др.

Под температурным разрешением в данной работе подразумевается пороговая разность температур $\Delta T_{\text{пор}}$ или, точнее, разность температур объекта наблюдения и фона (излучение которых приводится к излучению стандартных черных тел), при которой отношение сигнал/шум равно единице [7]. Пороговую разность температур в

Яковлева Наталья Ивановна¹, главный научный сотрудник.
Болтарь Константин Олегович^{1,2}, начальник НТК, профессор.

Никонов Антон Викторович^{1,2}, начальник НИЦ, доцент, к.ф.-м.н.

¹ АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.

Тел. 8 (499) 374-81-30. E-mail: orion@orion-ig.ru

² Московский физико-технический институт.

Россия, 141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9.

Статья поступила в редакцию 30 мая 2017 г.

литературе и называют температурным разрешением или эквивалентной шуму разностью температур, кратко, ЭШРТ.

В данной статье представлена оценка пороговой разности температур ТПС на основе фотоприемных устройств с использованием вакансионно-легированного и легированного примесями материала CdHgTe. Заметим, что в русскоязычном варианте обычно используется соответствующая аббревиатура КРТ, которой и будем придерживаться при дальнейшем изложении. В нем рассмотрены фундаментальные и нефундаментальные механизмы ограничения температурного разрешения в фотодиодах на основе гетероэпитаксиальных структур (ГЭС) КРТ, выращенных эпитаксиальными методами жидкофазной (ЖФЭ) и молекулярно-лучевой (МЛЭ) эпитаксии на кристаллически соответствующих подложках CdZnTe и на альтернативных подложках типа GaAs.

Темновые токи в матрицах фоточувствительных элементов

Для изготовления матриц фоточувствительных элементов (МФЧЭ) на основе КРТ использу-

ются две простые архитектуры: N^+/p - и P^+/n -типа, [1, 2]. Оценка параметров фотодиодов на основе КРТ вытекает из рассмотрения составляющих темнового тока, протекающего в данных структурах при обратном напряжении смещения. В общем случае темновой ток содержит диффузионную составляющую в области поглощения, токи генерации-рекомбинации через центры Шокли-Рида-Холла в квазинейтральных областях и области пространственного заряда (ОПЗ), токи туннелирования «зона-зона» и через уровни ловушек в ОПЗ, ток шунтирующей утечки, поверхностные токи генерации-рекомбинации.

Диффузионный ток, возникающий вследствие генерации-рекомбинации по механизму Оже, с хорошей степенью приближения рассчитывается по времени жизни при известных начальных параметрах ГЭС КРТ [3, 4]. Ток генерации-рекомбинации можно оценить, используя зависимости времени жизни по механизму Шокли-Рида-Холла (ШРХ) [5]. Отдельные составляющие темнового тока в зависимости от концентрации легирующей примеси для двухслойных архитектур КРТ N^+/p -типа и P^+/n -типа с граничной длиной волны $\lambda_{cp} \sim 5,0$ мкм при рабочей температуре $T = 200$ К представлены на рис. 1.

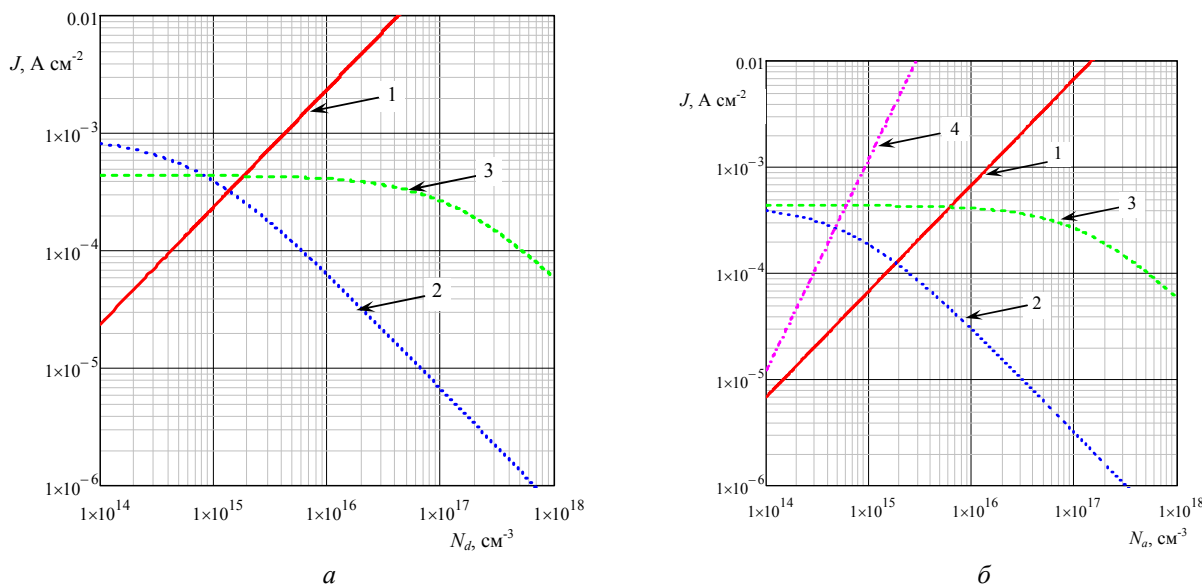


Рис. 1. Отдельные составляющие плотности темнового тока J в зависимости от концентрации N легирующей примеси для МФЧЭ с граничной длиной волны $\lambda_{cp} \sim 5,0$ мкм при рабочей температуре $T = 200$ К: а) - для архитектуры P^+/n -типа: 1 – за счет диффузии; 2 – за счет генерации-рекомбинации ШРХ в области поглощения; 3 – за счет генерации-рекомбинации ШРХ в ОПЗ; б) для архитектуры N^+/p -типа: 1 – за счет диффузии; 2 – за счет генерации-рекомбинации ШРХ в области поглощения; 3 – за счет генерации-рекомбинации ШРХ в ОПЗ; 4 – через вакансии ртути.

Поскольку суммарный темновой ток складывается из отдельных токовых составляющих [5], рис. 1 наглядно демонстрирует причину, по которой архитектура N^+/p -типа на основе КРТ уступает по параметрам архитектуре P^+/n -типа проводимости. Она заключается в использовании вакансионно-

но-легированных поглощающих слоев КРТ, поскольку у таких структур имеется дополнительный темновой ток за счёт металлических вакансий ртути. Вакансии ртути обуславливают дополнительный вклад в темновой ток по сравнению со структурами P^+/n -типа или N^+/p -типа с легирован-

ными внешними примесями поглощающими слоями КРТ, поэтому при изготовлении МФЧЭ с высокими параметрами выбор типа легирования исходного материала играет важную роль.

Отметим, что у структур $N+/p$ -типа с поглощающим слоем, легированным внешней примесью, в отсутствие вакансионного тока имеется преимущество по сравнению со структурами P^+/n -типа, которое заключается в меньшей скорости тепловой генерации по механизму Оже-7 по сравнению с механизмом Оже-1, причем при одном и том же уровне легирования.

Оценка температурного разрешения в ФПУ на основе КРТ

Температурное разрешение $\Delta T_{\text{пор}}$ (или ЭШРТ) является одним из основных функциональных параметров оптико-электронной системы. Параметр ЭШРТ характеризует предельное температурное разрешение системы и связан с основными характеристиками входящих в нее основных узлов, а именно: оптической системы; наблюдаемых объектов; атмосферы; электронного тракта и устройства отображения информации. Теоретические основы расчета $\Delta T_{\text{пор}}$ приведены в основополагающих трудах М. М. Мирошникова [6] и Дж. Ллойда [7]. Оценку температурного разрешения $\Delta T_{\text{пор}}$ проведем в соответствии с эквивалентной схемой формирования изображения, представленной на рис. 2.

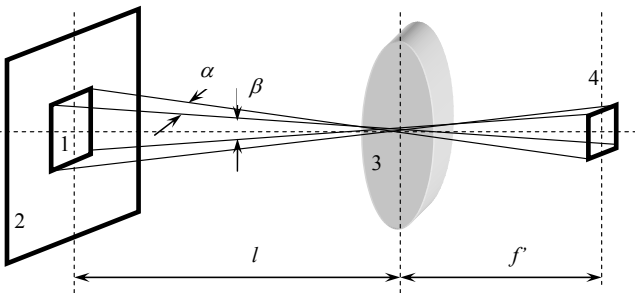


Рис. 2. Эквивалентная схема формирования изображения: 1 – объект наблюдения; 2 – фон; 3 – оптическая система с эффективной площадью входного зрачка A_0 ; 4 – чувствительный элемент ФПУ с угловыми размерами α, β

В соответствии с рис. 2 спектральный поток излучения Φ_λ , проецируемый на фоточувствительный элемент (ФЧЭ) инфракрасного ФПУ, можно описать формулой

$$\Phi_\lambda = \frac{W_\lambda}{\pi} A_0 \alpha \beta \tau_0(\lambda)$$

где W_λ – спектральная плотность потока излучения (спектральная освещенность, формируемая

излучением объекта на входном зрачке объектива изображающей системы); A_0 – площадь входного зрачка оптической системы; α, β – угловые размеры чувствительного элемента; $\tau_0(\lambda)$ – спектральный коэффициент пропускания оптического тракта.

Изменение фотосигнала в зависимости от температуры опишем уравнением из работ [8, 9]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_\lambda}{\partial T} &= S_\lambda \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial T} = \frac{\alpha \beta}{\pi} A_0 \tau_0(\lambda) \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} S_\lambda = \\ &= \frac{\alpha \beta A_0 \tau_0(\lambda)}{\pi} \times \frac{D_\lambda * U_n}{\sqrt{ab} \sqrt{\Delta f}} \times \frac{\partial W_\lambda}{\partial T}, \end{aligned}$$

в которое подставим спектральную чувствительность S_λ .

Интегрируя выражение по длинам волн, найдем изменение сигнала в интегральном виде:

$$\frac{\partial U}{\partial T} = \frac{\alpha \beta A_0 U_n}{\pi \sqrt{ab} \sqrt{\Delta f}} \int_0^\infty \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} D_\lambda * \tau_0(\lambda) d\lambda.$$

Далее записав уравнение в конечных разностях, получим отношение:

$$\frac{\Delta U}{\Delta T} = \frac{\alpha \beta A_0 U_n}{\pi \sqrt{ab} \sqrt{\Delta f}} \int_0^\infty \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} D_\lambda * \tau_0(\lambda) d\lambda.$$

Пороговая разность температур $\Delta T_{\text{пор}}$ определяется при условии, когда отношение изменения сигнала к шуму ФПУ равно единице $\frac{\Delta U}{U_n} = 1$. Отсюда получим пороговую разность температур в виде выражения:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab} \sqrt{\Delta f}}{\alpha \beta A_0 \int_0^\infty \frac{\partial W_\lambda}{\partial T} D_\lambda * \tau_0(\lambda) d\lambda}.$$

Если плотность потока излучения описать законом Планка, то вычислив производную $\frac{\partial W_\lambda}{\partial T} \approx \frac{C_2}{\lambda T^2} W_\lambda$, получим уравнение для пороговой разности температур $\Delta T_{\text{пор}}$ в виде следующего соотношения:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab} \sqrt{\Delta f} T^2}{\alpha \beta A_0 C_2 \int_0^\infty W_\lambda D_\lambda * \tau_0(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}.$$

Расчет $\Delta T_{\text{пор}}$ и оценку значения обнаружительной способности D^* для архитектур P^+/n -типа и N^+/p -типа на основе КРТ проведем в соответствии с допущением, что в равновесных условиях скорости генерации и рекомбинации равны, а обнаружительная способность определяется уравнением из работы [10]:

$$D^* = \frac{\lambda \eta}{2hc(G_A t)^{1/2}} \times \left(\frac{A_0}{A_e} \right)^{1/2},$$

где G_A – скорость Оже-генерации; t – толщина слоя поглощения; λ – длина волны излучения; η – квантовая эффективность; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; $\left(\frac{A_0}{A_e} \right)$ – отношение

площадей фоточувствительного элемента и сфокусированного в область МФЧЭ оптического потока излучения, которое примем равным единице.

Вставив выражение для обнаружительной способности D_λ^* в формулу и введя пределы интегрирования по спектральному диапазону чувствительности ФПУ $\lambda_1 - \lambda_2$, получим выражение:

$$\Delta T_{\text{пор}} = \frac{\pi \sqrt{ab} \sqrt{\Delta f} T^2}{\alpha \beta A_0 C_2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda \frac{\lambda \eta}{2hc(G_A t)^{1/2}} \tau_0(\lambda) \frac{d\lambda}{\lambda}}.$$

Считая, что параметры прибора определяются в основном характеристиками поглощающего слоя, скорость термической генерации в поглощающем слое n -типа представим в виде суммы скоростей генерации по механизму Оже-1 и механизму Шокли-Рида-Холла:

$$G_{th-n} = \frac{n_i^2}{N_D \tau_{A1}} + \frac{n_i^2}{(N_D + n_i) \tau_{SRHn}}$$

где N_D – концентрация доноров в области поглощения, n_i – собственная концентрация носителей заряда; τ_{A1} – время жизни неосновных носителей заряда по механизму Оже-1; τ_{SRHn} – время жизни неосновных носителей заряда по механизму Шокли-Рида-Холла в поглощающем слое n -типа проводимости.

Аналогично для области поглощения p -типа проводимости можно записать выражение:

$$G_{th-p} = \frac{n_i^2}{N_A \tau_{A7}} + \frac{n_i^2}{(N_A + n_i) \tau_{SRHp}},$$

где N_A – концентрация акцепторов в области поглощения, n_i – собственная концентрация носителей заряда; τ_{A7} – время жизни неосновных носителей заряда по механизму Оже-7; τ_{SRHp} – время жизни неосновных носителей заряда по механизму Шокли-Рида-Холла. Для вакансионно-легированного материала p -типа с плотностью вакансий N_{VAC} время жизни τ_{VAC} , можно вычислить по формуле из работы [11]:

$$\tau_{VAC} = 5 \times 10^9 \frac{n_1}{p N_{VAC}},$$

где концентрация центров ШРХ, связанных с вакансиями ртути, $n_1 = N_C \times \exp\left(\frac{qE_r}{kT}\right)$; E_r – уровень, находящийся в запрещенной зоне, причем примерно на 30 мВ ниже зоны проводимости.

Для тепловизионных систем, работающих при температуре окружающей среды $T_{\text{фон}} = 293$ К, можно провести оценку $\Delta T_{\text{пор}}$, учитывая следующие начальные данные: $T_{\text{фон}} = 293$ К; $C_2 = 1,439 \times 10^2$ см К; $C_1 = 3,74 \times 10^4$ Вт см² мкм⁴; $A_0 = (\pi d^2)/4$, где d – диаметр входного зрачка объектива оптической системы; $\alpha = a/f'$; $\beta = b/f'$; где f' – фокусное расстояние объектива; $\Delta f = \frac{1}{2\tau_d}$, где

τ_d – время сканирования одного элемента кадра изображения.

Температурная зависимость $\Delta T_{\text{пор}}$ для ФПУ с размерами отдельных чувствительных элементов 25×25 мкм и граничной длиной волны 10,5 мкм показана на рис. 3. При этом в расчете D^* учтены скорости термической генерации по механизмам Оже и ШРХ, а для материала КРТ p -типа проводимости дополнительно учтена составляющая темнового тока через вакансии ртути.

Из рис. 3 следует, что для структуры КРТ P^+/n -типа проводимости при температуре $T = 77$ К значение ЭШРТ ~ 18 мК, в то время как для вакансионно-легированного материала N^+/p -типа ЭШРТ составляет ~ 30 мК. При этом, если структура не является вакансионно-легированной, значение пороговой разности температур при $T = 77$ К может быть уменьшено до значения ЭШРТ ~ 10 мК.

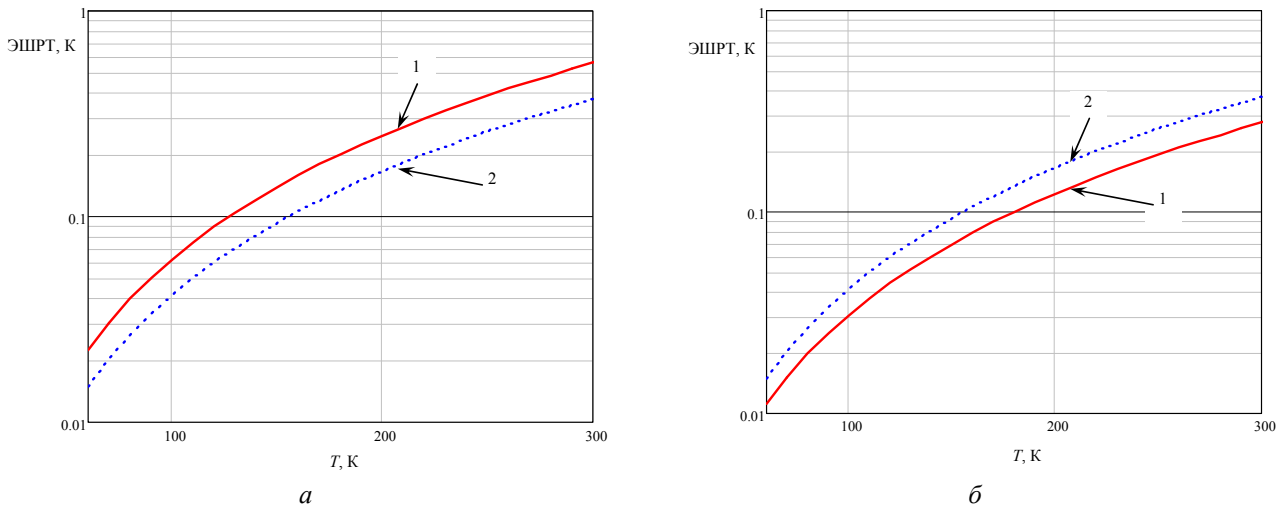


Рис. 3. Температурные зависимости ЭШРТ: а) кривая 1 – для вакансионно-легированной структуры N^+/p -типа; кривая 2 – для структуры P^+/n -типа; б) кривая 1 – для легированной внешней примесью структуры N^+/p -типа; кривая 2 – для структуры P^+/n -типа.

Обсуждение и выводы

Одной из основных целей, решаемых тепловизионной системой, является необходимость увеличения температурного разрешения, т. е. уменьшения ЭШРТ (или $\Delta T_{\text{пор}}$). Как показано в предыдущем параграфе, в состав параметра $\Delta T_{\text{пор}}$ входят различные характеристики тепловизионной системы, в т. ч. обнаружительная способность D^* ФПУ, которая должна быть максимально высокой.

Основная особенность современных ФПУ на основе ГЭС КРТ состоит в том, что значительная часть падающего излучения поглощается в рабочем базовом слое, после чего фотогенерированные носители заряда собираются на длине диффузии область пространственного заряда. Поэтому в темновой ток ФЧЭ диффузионная составляющая тока вносит наибольший вклад. Выразим обнаружительную способность D^* в соответствии с теоретической оценкой для диффузионно ограниченных фотодиодов:

$$D^* = \frac{\eta \lambda q}{2hc} \times \left(\frac{R_0 A}{kT} \right)^{1/2}.$$

Из приведенной формулы для D^* видно, что для достижения высоких характеристик необходимо увеличивать произведение $R_0 A$. Поэтому фундаментальные ограничения для фотодиодов на основе КРТ рассмотрим с точки зрения возможности увеличения данного параметра, который представляет собой произведение дифференциального сопротивления на площадь фоточувствительного

элемента при нулевом напряжении смещения ($V = 0$ В). В общем случае, используя ВАХ идеального диода, можно получить следующее выражение для $R_0 A$:

$$R_0 A = \frac{kT}{q^2 G t},$$

где G – скорость термической генерации, t – толщина слоя поглощения; k – постоянная Больцмана, T – температура, q – заряд электрона.

Допустим, что прибор максимально близок к идеальному, т. е. тепловые процессы генерации-рекомбинации определяются механизмом Оже. При нулевом напряжении смещения ($V = 0$ В) для ограниченного диффузионной составляющей темнового тока фотодиода значение параметра $R_0 A$ рассчитывается по формуле из работы [12]:

$$R_0 A = \frac{\beta k T}{q^2 n_i^2 \left(\frac{D_n}{L_n} \frac{1}{N_A} + \frac{D_p}{L_p} \frac{1}{N_D} \right)},$$

где N_D , N_A – концентрации легирующих примесей; D_n , D_p – коэффициенты диффузии; L_n , L_p – длины диффузии доноров и акцепторов соответственно; n_i – собственная концентрация носителей заряда.

При условии, что толщина слоя поглощения t меньше длины диффузии носителей заряда, а также, если концентрации доноров и акцепторов удовлетворяют соотношению $N_D \gg N_A$ для

n^+ -on- p структуры с поглощающим слоем p -типа проводимости, значение R_0A приводится к виду:

$$R_0A = \frac{\beta kT N_A \tau_{difn}}{q^2 n_i^2 t}.$$

Аналогично, при $N_A \gg N_D$ для p^+ -on- n структуры с поглощающим слоем n -типа проводимости получаем соотношение:

$$R_0A = \frac{\beta kT N_D \tau_{difp}}{q^2 n_i^2 t},$$

где τ_{difn} и τ_{difp} – время жизни неосновных носителей заряда в p - и n -областях соответственно.

Из приведенных уравнений следует, что для увеличения произведения R_0A необходимо уменьшать толщину базового слоя t или увеличить время жизни носителей заряда.

Самый простой путь повышения R_0A – уменьшение толщины базовой области, которая обычно оптимизируется для получения высокой квантовой эффективности. Второе возможное решение, которое состоит в увеличении времени жизни носителей заряда, реализуется с помощью достижения концентрации легирующей примеси, близкой к собственному значению. Минимально достижимый на практике уровень легирования для материала p -типа проводимости составляет $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$, для материала n -типа проводимости составляет $\sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$, вследствие чего параметры в поглощающем слое КРТ определяются фундаментальными Оже-процессами.

В реальных фотодиодах ситуация более сложная, поскольку помимо фундаментальных процессов в функционирование ФПУ вносят существенный вклад нефундаментальные процессы, связанные с генерацией-рекомбинацией ШРХ, туннелированием, шунтированием и др.

Заключение

Проведенные в работе исследования и оценки показывают, что фундаментальные и нефундаментальные механизмы ограничения температурной чувствительности в фотодиодах на основе ГЭС КРТ, выращенных различными эпитаксиальными методами, включают в себя следующие процессы.

1) Фундаментальный механизм ограничения – процессы генерации-рекомбинации по механизму Оже. Исследования темновых вольтамперных характеристик фотодиодов, изготовленных в узко-

зонных полупроводниковых материалах, показали, что в рабочем диапазоне обратных напряжений смещения $U = 0,1-0,3$ В достигнут диффузионный предел, т. е. наибольший вклад дает диффузионная составляющая тока, что подтверждает высокое структурное совершенство слоев поглощения p -типа проводимости с концентрацией носителей заряда $N_A \leq 5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, выращенных эпитаксиальными методами ЖФЭ и МЛЭ на кристаллически соответствующих (CdZnTe) и альтернативных подложках (GaAs).

2) Нефундаментальные механизмы ограничения, т. е. такие как туннелирование зона-зона, туннелирование через уровни ловушек в запрещенной зоне и процессы генерации-рекомбинации ШРХ, могут являться главными факторами, ограничивающими выходные параметры прибора в рабочем диапазоне температур при заданных напряжениях смещения.

3) Дополнительной причиной снижения температурной чувствительности структур КРТ N^+/p -типа может являться темновой ток, обусловленный вакансионным характером легирования области поглощения. Вакансии ртути дают существенный вклад в темновой ток по сравнению со структурами P^+/n -типа или N^+/p -типа с поглощающими слоями КРТ, легированными внешними примесями. Поэтому при изготовлении МФЧЭ с высокими параметрами выбор типа легирования исходного материала играет важную роль.

ЛИТЕРАТУРА

1. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Филачев А. М., Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2012. № 3. С. 61.
2. Boltar K. O., Burlakov I. D., Ponomarenko V. P., Yakovleva N. I., Klimanov E. A., Akimov V. M. // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2008. Vol. 17. No. 1. P. 9.
3. Яковлева Н. И. // Успехи прикладной физики. 2015. Т. 3. № 2. С. 54.
4. Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2015. № 2. С. 51.
5. Яковлева Н. И. // Прикладная физика/ 2015. № 5. С. 59.
6. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. – Л.: Машиностроение, 1983.
7. Ллойд Дж. Системы тепловидения – М.: Мир, 1978.
8. Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Кремис И. И. / ГЕО-Сибирь-2011. VII Междунар. науч. конгр.: сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2011 г.). – Новосибирск: СГГА, 2011. Т. 5, ч. 1. С. 25–27.
9. Тымкул Л. В., Тымкул В. М. Системы инфракрасной техники, Учебное пособие. – Новосибирск: СГГА. 2007.
10. Rogalski A. Infrared Detectors – CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
11. Piotrowski J. and Rogalski A, High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors – Bellingham, Washington 98227-0010 USA, 2007.
12. Rogalski A. // Infrared Phys. 1988. Vol. 28. No. 3. P. 139.

Temperature resolution of thermal imagers systems using photodetector devices based on CdHgTe

N. I. Iakovleva¹, K. O. Boltar^{1,2}, and A. V. Nikonov^{1,2}

¹ Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

² Moscow Institute of Physics and Technology
9 Institutskii al., Dolgoprudny, Moscow Region, 141700, Russia

Received May 12, 2017

The basic fundamental and non-fundamental mechanisms of temperature sensitivity limitations in the photodiodes based on HgCdTe structures have been considered. The predicted NETD as a function of operating temperature for MCT photodetectors imposing diffusion limitation to the HgCdTe photodiode performance has been calculated. It is shown that for the LWIR MCT P⁺/n-structure the value of the noise equivalent temperature difference (NETD) is of ~ 18 mK, while for N⁺/p-type vacancy-doped material is of ~ 30 mK. Some means for the temperature sensitivity increase in MCT photodiodes have been analyzed.

Keywords: HgCdTe, infrared (IR) spectral region, heteroepitaxial structure, photodiode array, Focal Plane Array (FPA), dark current, temperature resolution, noise equivalent temperature difference (NETD).

REFERENCES

1. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, A. M. Filachev, and N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 3, 61 (2012).
2. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, N. I. Yakovleva, E. A. Klimanov, and V. M. Akimov, Optical Memory and Neural Networks (Information Optics) **17**, 9 (2008).
3. N. I. Iakovleva, Usp. Prikl. Fiz. **3**, 54 (2015).
4. N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 2, 51 (2015).
5. N. I. Iakovleva, Prikl. Fiz., No. 5, 59 (2015).
6. M. M. Miroshnikov, *Theoretical Foundations of Optoelectronic Devices* (Mashinost., Leningrad, 1983) [in Russian].
7. J. Lloid, *Thermal Imaging Systems* (Mir, Moscow, 1978) [in Russian].
8. V. M. Tymkul, L. V. Tymkul, and I. I. Kremis, in *Proc. Intern. Conf. GEO-SIBIR-2011* (Novosibirsk, April 19–29, 2011). Vol. 5, Part 1. P. 25–27.
9. L. V. Tymkul and V. M. Tymkul, *Systems of IR Engineering* (Novosibirsk, 2007) [in Russian].
10. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (CRC Press Taylor & Francis Group, 2011).
11. J. Piotrowski and A. Rogalski, *High-Operating-Temperature Infrared Photodetectors* (Bellingham, Washington 98227-0010 USA, 2007).
12. A. Rogalski, Infrared Phys. **28** (3), 139 (1988).