

УДК 621.383.4/5

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz,  
07.57.Kp, 85.60.Dw

## Униполярная $nVn$ -структура на основе CdHgTe средневолнового ИК-диапазона спектра

Н. И. Яковлева

*Рассмотрена концепция построения фоточувствительной униполярной  $nVn$ -структуры для фотоприемного устройства (ФПУ) средневолнового ИК-диапазона спектра на основе CdHgTe. Представлена архитектура и рассчитаны ее характеристические параметры: смещение энергии валентной зоны, напряжение плоских зон, поверхностный потенциал  $\phi_s$  на границе коллектор/барьер; плотность темнового тока, которая при рабочих температурах  $T = 110\text{--}160\text{ K}$  составила  $J_{dark} = 10^{-10}\text{--}10^{-6}\text{ A/cm}^2$ . Показано, что  $nVn$ -архитектура на основе CdHgTe может использоваться для построения ФПУ нового типа с повышенными характеристиками.*

*Ключевые слова:* униполярный прибор,  $nVn$ -структура, MWIR, CdHgTe, матрица фоточувствительных элементов, МФЧЭ, темновой ток.

**Ссылка:** Яковлева Н. И. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 53.

**Reference:** N. I. Yakovleva, Prikl. Fiz., No. 3, 53 (2019).

### Введение

Технология изготовления инфракрасных фотоприемников на основе тройных соединений CdHgTe продолжает развиваться в направлении совершенствования архитектуры фоточувствительных элементов с целью достижения высоких фотоэлектрических параметров [1, 2].

В отличие от биполярного фотодиода, униполярный фотоприемник с барьерным слоем на основе структуры  $nVn$ -типа имеет важное преимущество [3, 4], которое заключается в отсутствии области обеднения при условии высокого дифференциального сопротивления области поглощения. В связи с этим в данном однополярном устройстве  $n$ -типа уменьшены процессы генерации-рекомбинации Шокли-Рида-Холла (ШРХ), а с помощью

широкозонного барьерного слоя в зоне проводимости блокируется перемещение основных носителей заряда (электронов), что приводит к дополнительному уменьшению темнового тока.

Задачей работы являлось построение фоточувствительной униполярной  $nVn$ -структуры фоточувствительного элемента (ФЧЭ) для средневолнового ИК-диапазона спектра на основе CdHgTe и расчет ее характеристических параметров. Показано, что  $nVn$ -архитектура на основе CdHgTe может использоваться для создания фотоприемного устройства (ФПУ) нового типа с повышенными характеристиками.

### Конструирование $nVn$ -архитектуры ФЧЭ средневолнового ИК-диапазона

По определению, униполярная  $nVn$ -структура включает в состав три области  $n$ -типа: две относительно узкозонные, а именно, зоны коллектора и поглощения, между которыми располагается широкозонный барьерный слой В.

На рис. 1 показан разрез ФЧЭ на основе униполярной  $nVn$ -структуры для средневолнового ИК-диапазона спектра.

Яковлева Наталья Ивановна, гл.н.с., к.т.н.

АО «НПО «Орион».

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

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

Статья поступила в редакцию 6 мая 2019 г.

© Яковлева Н. И., 2019

Последовательность и характеристики слоев рассматриваемой структуры приведена в таблице, начиная с верхнего слоя.

На рис. 2 схематично представлена зонная диаграмма *nВп*-структуры, предназначен-

ной для работы в средневолновом ИК-диапазоне спектра: а) при нулевом напряжении смещения; б) при отрицательном напряжении смещения в режиме плоских зон.

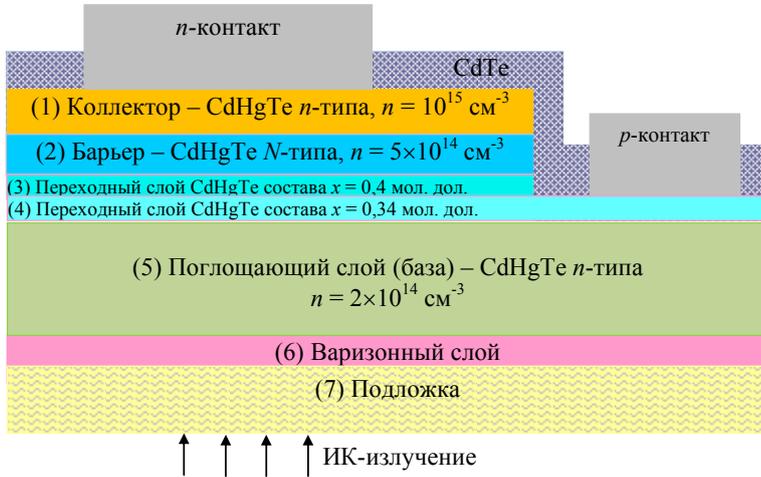


Рис. 1. Разрез ФЧЭ на основе униполярной *nВп*-структуры.

Таблица

Характеристики слоев *nВп*-структуры

Последовательность слоев для <i>nВп</i> -структуры	Состав <i>x</i> , мол. дол.	Концентрация, см <sup>-3</sup>	Толщина, мкм
(1) Коллектор	0,34	10 <sup>15</sup>	1
(2) Барьер	0,45	5×10 <sup>14</sup>	0,05
(3) Промежуточный слой	0,4	5×10 <sup>14</sup>	0,01
(4) Промежуточный слой	0,34	5×10 <sup>14</sup>	0,01
(5) Поглощающий слой (база)	0,3	2×10 <sup>14</sup>	5–10
(6) Варизонный слой	–	–	0,1–1
(7) Подложка (CdZnTe)	–	–	650

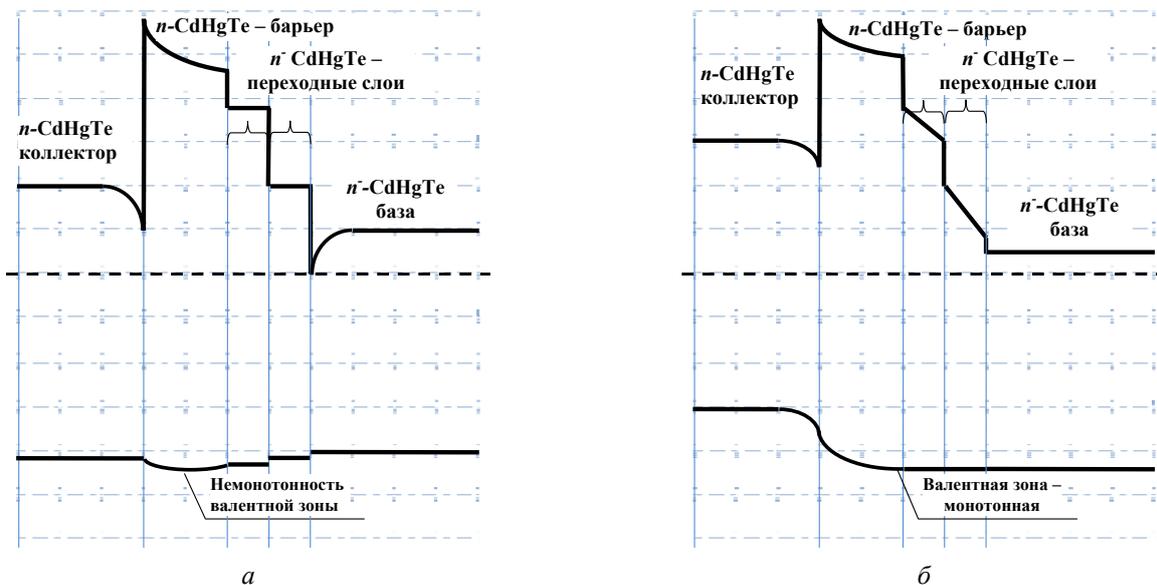


Рис. 2. Зонная диаграмма *nВп*-структуры: а – режим нулевого напряжения смещения, имеет разрыв в валентной зоне  $\Delta E_V$ ; б – режим плоских зон.

Для сглаживания неоднородности валентной зоны барьерный слой на основе CdHgTe состоит из трех слоев: собственно барьерного слоя толщиной 50 нм состава  $x = 0,45$  мол. дол. ( $\lambda = 2,56$  мкм) и двух переходных тонких подслоев состава  $x = 0,4$  мол. дол. и  $x = 0,34$  мол. дол., последний подслои используется для технологической операции стоп-травления при изготовлении матрицы фоточувствительных элементов. Перепад между слоями в валентной зоне составляет 0,01 эВ. Поглощающий слой имеет состав  $x = 0,3$  мол. дол. для работы в средне-волновом ИК-диапазоне спектра с граничной длиной волны  $\lambda_a = 5$  мкм. Для области коллектора выбран более широкозонный, чем поглощающий, слой CdHgTe с составом  $x = 0,34$  мол. дол.

При нулевом напряжении смещения в равновесных условиях (рис. 2, а) из широкозонного барьерного слоя  $N$ -типа проводимости уходят электроны, и на границе раздела барьера с областями поглощения и коллектора накапливается отрицательный заряд. В валентной зоне, вследствие обеднения барьерного слоя электронами, область немоноктонности увеличивается. Начальное значение барьера в валентной зоне можно рассчитать из уравнения, которое представляет собой разницу ширины запрещенной зоны барьерного слоя и ширины запрещенной зоны области поглощения минус разницу сродства к электрону тех же слоев:

$$E_V(\lambda_a, \lambda_b, T) = E_g(\lambda_b, T) - E_g(\lambda_a, T) - [\chi(\lambda_a, T) - \chi(\lambda_b, T)] = [0,484 - 0,248 - (4,096 - 3,904)] = 0,044 \text{ эВ},$$

где  $\lambda_a$  – граничная длина волны области поглощения;  $\lambda_b$  – граничная длина волны барьерного слоя;  $T$  – рабочая температура;  $E_V(\lambda_a, \lambda_b, T)$  – смещение энергии валентной зоны;  $E_g(\lambda_b, T)$  – энергия запрещенной зоны барьерного слоя;  $E_g(\lambda_a, T)$  – энергия запрещенной зоны слоя поглощения;  $\chi(\lambda_a, T)$  – сродство к электрону поглощающего слоя;  $\chi(\lambda_b, T)$  – сродство к электрону барьерного слоя.

Для рис. 2, а величина разрыва, т. е. разница между шириной запрещенной зоны барьера и поглощающего слоя и минус разница сродства к электрону данных слоев, составила для барьерного слоя с граничной длиной волны  $\lambda = 2,56$  мкм ( $x = 0,45$  мол. дол.) и поглощающего слоя состава с граничной длиной волны  $\lambda = 5,0$  мкм ( $x = 0,3$  мол. дол.) величину  $\Delta E_V = 0,044$  эВ.

В общем случае величина разрыва в валентной зоне зависит от толщины барьера и концентрации электронов в барьерном слое  $N_b$ . Поэтому барьер выполняется по возможности тонким, но достаточной ширины, чтобы избежать туннелирования электронов, и слаболегированным, чтобы уменьшить начальную величину разрыва в валентной зоне, а, следовательно, и рабочее напряжение смещения, необходимое для достижения режима плоских зон.

### Принцип работы ФЧЭ на основе $nVn$ -архитектуры

К области поглощения подключается положительное напряжение смещения, а к области коллектора – отрицательное. Темновой ток и фототок  $nVn$ -структуры определяются переносом неосновных носителей заряда, генерируемых в области поглощения. Электроны уходят из области поглощения через положительный контакт, а неосновные носители заряда (дырки) при достижении напряжения плоских зон имеют возможность свободного перемещения к коллектору.

При подаче отрицательного смещения на коллектор (рис. 2, б) накопленный зарядовый слой на границе барьерного и поглощающего слоев и барьер в валентной зоне устраняются, и для области поглощения реализуется режим плоских зон. Дальнейшее увеличение напряжения смещения на коллекторе приводит к образованию области обеднения в слое поглощения на границе с барьерным слоем. Возникшая область обеднения становится источником дополнительного темнового тока вследствие процессов генерации-рекомбинации ШРХ и туннелирования в области пространственного заряда (ОПЗ).

Пороговое напряжение, связанное с переходом от режима плоских зон к режиму

обеднения, зависит от уровня концентрации доноров в барьерном слое и уровня легирования коллектора. Напряжение смещения  $V$ , поданное на структуру, падает частично в области барьера и частично в зарядовом слое на границе коллектор/барьер. Заряд в данном слое при условии плоских зон эквивалентен концентрации доноров барьерного слоя. Пороговое напряжение, необходимое для установления режима плоских зон на интерфейсе барьер/поглощающий слой определяется формулой из работы [5]:

$$V_{fb} = \frac{2kT}{q} \ln(2) + \frac{W_b^2 q N_b}{2\epsilon\epsilon_0},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – рабочая температура;  $q$  – заряд электрона;  $W_b$  – ширина барьера;  $n_b$  – концентрация электронов в барьере;  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость среды,  $\epsilon_0$  – электрическая постоянная (в системе СИ).

Дальнейшее увеличение обратного смещения на коллекторе приводит к обеднению области поглощения. Напряжение смещения, при котором возможно прямое туннелирование через ОПЗ, определяется выражением:

$$V_{th} = \frac{2kT}{q} \left[ \ln \left( 2 + \frac{2W_a N_{Da}}{W_b N_b} \right) \right] + \frac{W_b^2 q N_b}{2\epsilon_b \epsilon_0} + E_{ga},$$

где  $V_{th}$  – напряжение смещения, при котором возможно туннелирование;  $W_a$  – ширина обедненного слоя в области поглощения,

определяемая как  $W_a = \left( \frac{2\epsilon\epsilon_0 E_{ga}}{q N_{Da}} \right)^{1/2}$ ,  $W_b$  – ширина барьерного слоя,  $N_{Da}$ ,  $N_b$  – концентрации легирующей примеси в слое поглощения и барьера соответственно,  $E_{ga}$  – ширина запрещенной зоны области поглощения.

На рис. 3 представлены зависимости напряжения плоских зон  $V_{fb}$  и напряжения прямого туннелирования  $V_{th}$  от уровня легирования барьерного слоя  $N_b$  для ФЧЭ на основе  $n$ Вн-структуры средневолнового ИК-диапазона спектра, содержащей барьерный слой толщиной 100 нм с концентрацией доно-

ров  $N_b = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и слоем поглощения с легирующей концентрацией  $N_{Da} = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при рабочей температуре  $T = 110 \text{ К}$ .

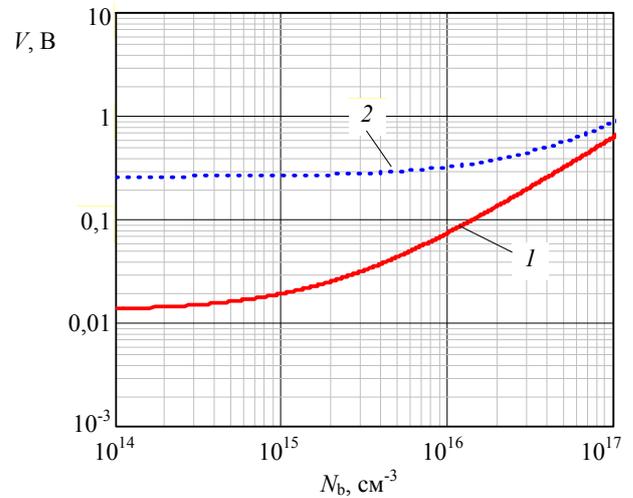


Рис. 3. Зависимости напряжений  $V_{fb}$  и  $V_{th}$  от уровня легирования барьерного слоя для  $n$ Вн-структуры, содержащей барьерный слой толщиной 100 нм с концентрацией доноров  $N_b = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  и слоем поглощения с концентрацией  $N_a = 2 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при рабочей температуре  $T = 110 \text{ К}$  (1 – напряжение плоских зон  $V_{fb}$ ; 2 – напряжение отсечки  $V_{th}$ , при котором возможно прямое туннелирование).

Из рис. 3 видно, что при концентрации доноров в барьерном слое  $N_b = 10^{15} \text{ см}^{-3}$  режим плоских зон наступает при напряжении смещения  $V_{fb} = 0,02 \text{ В}$ , что согласуется с рабочим уровнем смещения, при котором обычно работают фотодиоды на основе КРТ.

Ток электронов  $J_{th}^e$ , обусловленный их тепловой эмиссией над барьером из коллектора с концентрацией легирующей примеси  $N_{col}$ , рассчитывается по стандартному уравнению Шоттки для основных носителей заряда, с дополнительным множителем, который отражает уменьшение высоты барьера, связанное с накоплением заряда на границе коллектор-барьер:

$$J_{th}^e = q v_{th} N_{col} \exp\left(\frac{q\phi_s}{kT}\right) \exp\left(\frac{-q(\phi_b - \phi_s)}{kT}\right) = q \left(\frac{kT}{2\pi m^*}\right)^{1/2} N_{col} \exp\left(\frac{2q\phi_s}{kT}\right) \exp\left(\frac{-q\phi_b}{kT}\right),$$

где  $v_{th}$  – тепловая скорость электронов;  $N_{col}$  – концентрация носителей заряда в коллекторе;

$\varphi_s$  – поверхностный потенциал на границе раздела коллектор-барьер;  $\Phi_b$  – высота барьера в зоне проводимости между барьерным слоем и областью поглощения;  $m^*$  – эффективная масса электрона.

Для корректной работы *nВn*-структуры желательно, чтобы ток термоэлектронной эмиссии был намного меньше тока диффузии в области поглощения. Поверхностный потенциал  $\varphi_s$  на границе коллектор-барьер в случае отсутствия вырождения задается формулой

$$\varphi_s = \frac{2kT}{q} \ln \left( \frac{Q_s}{\sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0 kTN_{col}}} \right),$$

откуда

$$\frac{2q\varphi_s}{kT} = \left( \frac{Q_s}{\sqrt{2\varepsilon\varepsilon_0 kTN_{col}}} \right)^4$$

где  $Q_s$  – заряд, накопленный на границе коллектор-барьер, который для условия плоских зон равен первоначальному заряду барьера.

Данное уравнение позволяет рассчитать температурную зависимость поверхностного потенциала  $\varphi_s$  на границе раздела коллектор-барьер. На рис. 4 представлена температурная зависимость поверхностного потенциала на границе раздела коллектор-барьер ( $N_b = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{col} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ).

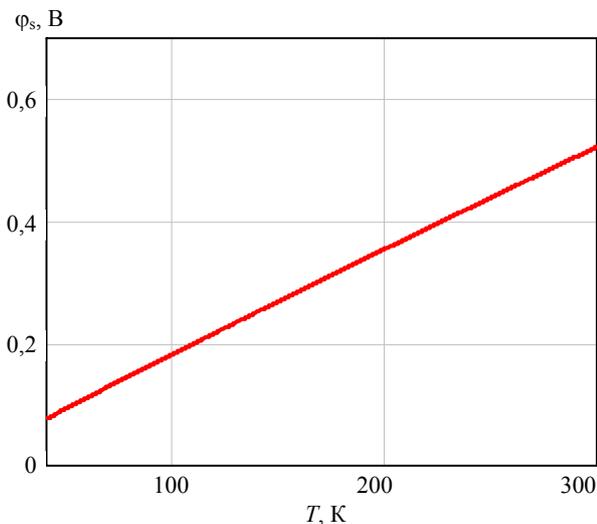


Рис. 4. Температурная зависимость поверхностного потенциала на границе раздела коллектор/барьер ( $N_b = 5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $N_{col} = 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ).

Суммарный темновой ток неосновных носителей заряда бариода может быть представлен в виде суммы диффузионного тока и тока термоэлектронной эмиссии:

$$J_{dif} = qN_{min} \left( \frac{1}{v_b} + \frac{\tau}{t} \right)^{-1}$$

где  $v_b = v_{th} \exp(-q\Delta E_V / kT)$  – тепловая скорость носителей заряда в области разрыва в валентной зоне.

Ток термоэлектронной эмиссии неосновных носителей над барьером в валентной зоне от базы к коллектору определяется уравнением:

$$J_{th} = qN_{min} v_{th} \exp \left( \frac{-q\Delta E_V}{kT} \right) = q \frac{n_i^2}{N_{Da}} \sqrt{\frac{kT}{2\pi m^*}} \exp \left( \frac{-q\Delta E_V}{kT} \right).$$

При выбранных параметрах структуры (см. таблицу) данный ток мал ( $J_{th} < qN_{min}t/\tau$ ), и суммарный темновой ток определяется током диффузии  $J_{dif}$  в области поглощения, который состоит из компонент, характерных для обычного фотодиода [6]:

$$J_{dif} = \frac{qp_{n0}t}{\tau_{eff}} = \frac{qn_i^2 t}{n_{n0} \tau_{eff}}.$$

где  $p_{n0}$  – равновесная концентрация неосновных носителей заряда в области поглощения;  $n_{n0}$  – равновесная концентрация основных носителей заряда в области поглощения;  $\tau_{eff}$  – эффективное время жизни, представляющее собой комбинацию механизмов Оже-1 и ШРХ;  $n_i$  – собственная концентрация. Как и в фотодиоде, ток в области поглощения *nВn*-структуры можно представить в виде суммы тока диффузии по механизму Оже-1 и тока генерации-рекомбинации ШРХ [7]:

$$J_{dif} = \frac{qN_{Da}t}{2\tau_{Ail}} + \frac{qn_i^2 t}{(N_{Da} + 2n_i)\tau_{SRH}},$$

где  $q$  – заряд электрона;  $N_{Da}$  – концентрация доноров в области поглощения ( $N_{Da} = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ );

$t$  – толщина области поглощения;  $\tau_{\text{Ail}}$  – время жизни носителей заряда по механизму Оже-1 в собственном материале CdHgTe;  $\tau_{\text{SRH}}$  – время жизни носителей заряда по механизму Шокли-Рида-Холла.

На рис. 5 показаны температурные зависимости диффузионного (кривая 1) и генерационно-рекомбинационного ШРХ (кривая 2) токов в области поглощения на основе CdHgTe состава  $x = 0,3$  мол. дол. при  $\tau_{\text{SRH}} = 100$  мкс, а также суммарная составляющая темнового тока (кривая 3).

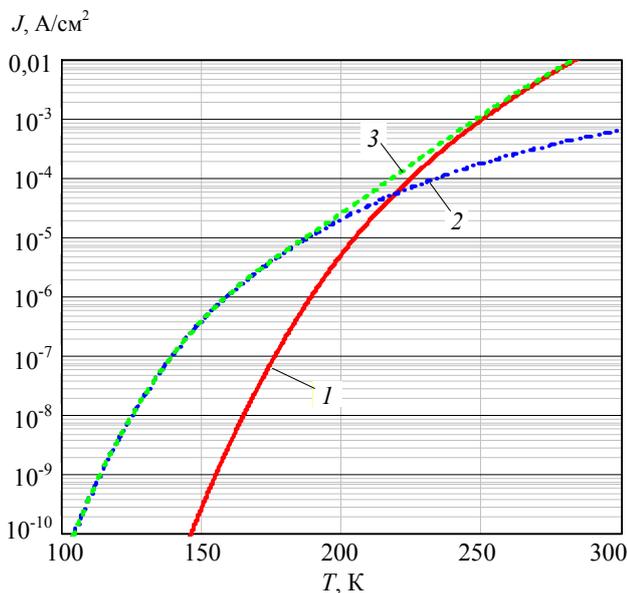


Рис. 5. Температурные зависимости диффузионного (1), генерационно-рекомбинационного ШРХ (2) при  $\tau_{\text{SRH}} = 100$  мкс и суммарного (3) токов в области поглощения  $nVn$ -структуры на основе CdHgTe состава  $x = 0,3$  мол. дол.

Как видно из рис. 5, при рабочих температурах  $T = 110\text{--}160$  К плотность темнового тока составит  $J_{\text{dark}} = 10^{-10}\text{--}10^{-6}$  А/см<sup>2</sup>, что позволит достичь высоких фотоэлектрических параметров.

При  $v_b < t/\tau$  диффузионная составляющая тока  $J_{\text{dif}}$  ограничена термоэлектронной эмиссией над барьером:

$$J_{\text{dif}} = qN_{\text{min}}v_b.$$

Увеличение напряжения смещения на коллекторе приводит к образованию области обеднения в слое поглощения на границе с

барьерным слоем. Область обеднения дополнительно увеличивает поверхностный заряд  $Q_s$ , потенциал  $\phi_s$  и уменьшает высоту электронного барьера.

На рис. 6 показаны температурные зависимости диффузионного (1), генерационно-рекомбинационного ШРХ (2) токов в области поглощения на основе CdHgTe состава  $x = 0,3$  мол. дол. при  $\tau_{\text{SRH}} = 100$  мкс, а также составляющая темнового тока (3) в ОПЗ (при большом напряжении обратного смещения).

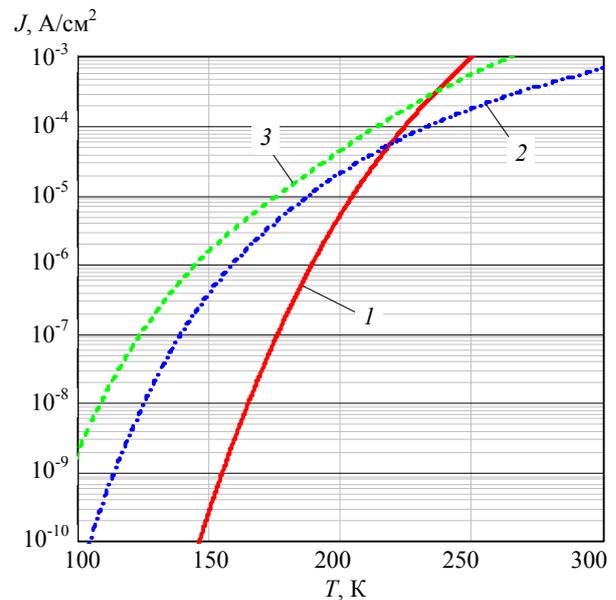


Рис. 6. Температурные зависимости диффузионного (1), генерационно-рекомбинационного ШРХ (2) при  $\tau_{\text{SRH}} = 100$  мкс в области поглощения и генерационно-рекомбинационного ШРХ (3) тока в ОПЗ для  $nVn$ -структуры на основе CdHgTe состава  $x = 0,3$  мол. дол. при наличии большого напряжения смещения на коллекторе.

Как видно из рис. 6, в рабочем диапазоне температур  $T = 110\text{--}160$  К наличие тока генерации-рекомбинации в ОПЗ приведет к увеличению суммарного темнового тока структуры на порядок. Таким образом, возникшая при больших напряжения смещения область обеднения становится источником дополнительного темнового тока вследствие процессов ШРХ в ОПЗ, и  $nVn$ -структура начинает работать подобно стандартному фотодиоду.

Если разрыв в валентной зоне  $\Delta E_V$  между барьерным слоем и областью поглощения превышает 0,1 эВ, то  $nVn$ -структура при высоких напряжения смещения на коллекторе будет вести себя как МДП-структура с соот-

ветствующим изгибом зон, а на границе барьер-поглощающий слой формируется инверсный слой. Суммарный темновой ток такой архитектуры ФЧЭ будет включать все выше перечисленные токовые составляющие: диффузионную, генерационно-рекомбинационную ШРХ в ОПЗ и ток термоэлектронной эмиссии над барьером в валентной зоне.

### Заключение

В работе представлены результаты расчета параметров  $nBn$ -архитектуры ФЧЭ на основе CdHgTe для средневолнового ИК-диапазона спектра. Учитывая быстрое развитие технологии фотоприемных устройств на основе CdHgTe, а также возможности «зонной инженерии» при их проектировании, приведенные оценки представляются весьма актуальными в свете повышения фотоэлектрических параметров ФПУ или увеличения рабочей температуры.

Благодаря наличию барьерного слоя при условии высокого структурного совершенства слоев CdHgTe, реализуются такие преимущества, как уменьшение диффузионной составляющей темнового тока вследствие исключения тока электронов; отсутствие генерационно-рекомбинационного тока ШРХ в ОПЗ вследствие ее отсутствия в  $nBn$ -структуре при небольших напряжениях смещения; существенное уменьшение туннельных и поверхностных составляющих темного тока выбора

за счет близкой к собственной концентрации носителей заряда в области поглощения, и пассивации узкозонного поглощающего слоя широкозонным барьерным слоем.

Все указанные преимущества позволяют уменьшить темновой ток, увеличить обнаружительную способность или работать при более высоких температурах ( $T = 110\text{--}160\text{ K}$ ), но эти преимущества реализуются для  $nBn$ -структуры только в режиме плоских зон. При высоких напряжениях смещения за счет образования на границе раздела барьер-база ОПЗ  $nBn$ -структура работает подобно стандартному фотодиоду с базой  $n$ -типа проводимости.

### ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. Rogalski A. // Rep. Prog. Phys. 2005. Vol. 68. P. 2267.
3. Itsuno A. M., Phillips J. D., Velicu S. // Journal of Electronic Materials. 2011. Vol. 40. No. 8. P. 1624.
4. Kopytko M., Jozwikowski K. // Journal of Electronic Materials. 2013. Vol. 42. No. 11. P. 3211.
5. Kinch M. A. State-of-the-Art Infrared Detector Technology. – SPIE. Bellingham, Washington 98227-0010 USA, 2014. P. 54–58.
6. Kinch M. A. // Journal of Electronic Materials. 2010. Vol. 39. No. 7. P. 1043.
7. Martyniuk P., Rogalski A. // Proc. SPIE. 2014. Vol. 9070. P. 907014.

PACS: 42.79.Pw, 85.60.Gz, 07.57.Kp, 85.60.Dw

## Unipolar MCT-based $nBn$ -structure for a MWIR FPA

*N. I. Iakovleva*

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

*Received May 6, 2019*

***A photosensitive unipolar  $nBn$ -structure for MWIR CdHgTe FPA has been considered. The architecture is presented and its characteristic parameters are calculated: the energy shift of the valence band, the voltage of flat bands, the surface potential at the collector/barrier in-***

*terface; the dark current density, which is  $10^{-10}$ – $10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup> at operating temperatures  $T = 110$ – $160$  K. It is shown that the CdHgTe-based nBn-architecture can be used in a new type of FPA with enhanced performance.*

*Keywords:* unipolar device, nBn-structure, MWIR, CdHgTe, FPA, dark current.

## REFERENCES

1. 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** (1), 9 (2008).
2. A. Rogalski, *Rep. Prog. Phys.* **68**, 2267 (2005).
3. A. M. Itsuno, J. D. Phillips, and S. Velicu, *Journal of Electronic Materials* **40** (8), 1624 (2011).
4. M. Kopytko and K. Jozwikowski, *Journal of Electronic Materials* **42** (11), 3211 (2013).
5. M. A. Kinch, *State-of-the-Art Infrared Detector Technology* (SPIE, Bellingham, Washington 98227-0010 USA, 2014), pp. 54–58.
6. M. A. Kinch, *Journal of Electronic Materials* **39** (7), 1043 (2010).
7. P. Martyniuk and A. Rogalski, *Proc. SPIE* **9070**, 907014 (2014).