

УДК 681.3

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ИК-ИЗЛУЧЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕТЕРОПЕРЕХОДНЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

В.А. СЫЧИК, В.С. ШУМИЛО

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, Минск, 220010, Беларусь

Поступила в редакцию 7 июня 2010

Предложена новая конструкция преобразователя ИК-излучений на основе гетеропереходных функциональных элементов. Приведены механизм работы преобразователя и его электрофизические свойства. Даны рекомендации по использованию преобразователя ИК-излучений в устройствах бесконтактного контроля тепловых полей.

Ключевые слова: преобразователь, p - n -переход, электрические свойства, зонная диаграмма.

Введение

Для разработки высокочувствительных безынерционных преобразователей тепловых полей используемых в системах неразрушающего контроля дефектов в холодильных аппаратах, возникла необходимость создания специальных фоточувствительных элементов-фотоэлектрических преобразователей излучений (ФЭП). Из рассмотренных в электронных устройствах различных типов ФЭП наиболее высокими электрофизическими свойствами обладают преобразователи с p - n -гетеропереходом и варизонным базовым слоем [1].

Структура и электрофизические свойства преобразователя

Для использования в структуре преобразователей оптической информации разработан специальный первичный преобразователь ИК-излучений на основе гетеропереходных функциональных элементов с варизонной i -областью [2].

Типовая структура разработанного ФЭП изображена на рис. 1а, а раскрывающая механизм его работы зонная диаграмма — на рис. 1б. ФЭП состоит из p - n -перехода на основе широкозонного полупроводника, включающего широкозонную обедненную n -область перехода и обедненную p -область перехода, которая контактирует с варизонным и сильнолегированным p^+ -слоем из широкозонного полупроводника. n -Область преобразователя содержит широкозонную обедненную n -область перехода, варизонный n_1 -слой, узкозонную n - n^+ -область, состоящую из n_2 -слоя и сильнолегированного n^+ -слоя. Нижний сплошной омический контакт ФЭП сформирован на n^+ -слое, а верхний решетчатый омический контакт, в проемах решетки которого размещен просветляющий слой, расположен на сильнолегированном p^+ -слое.

Для обоснования выбора материала компонентов, структуры и нахождения размеров областей синтезируемого ФЭП с заданным уровнем основных параметров (токовая, вольтовая фоточувствительность, обнаружительная способность) рассмотрим основные зависимости, описывающие эти параметры и физические процессы в структуре преобразователя. Поскольку интегральная токовая чувствительность, с учетом $J_{\phi} \gg J_t$, равна:

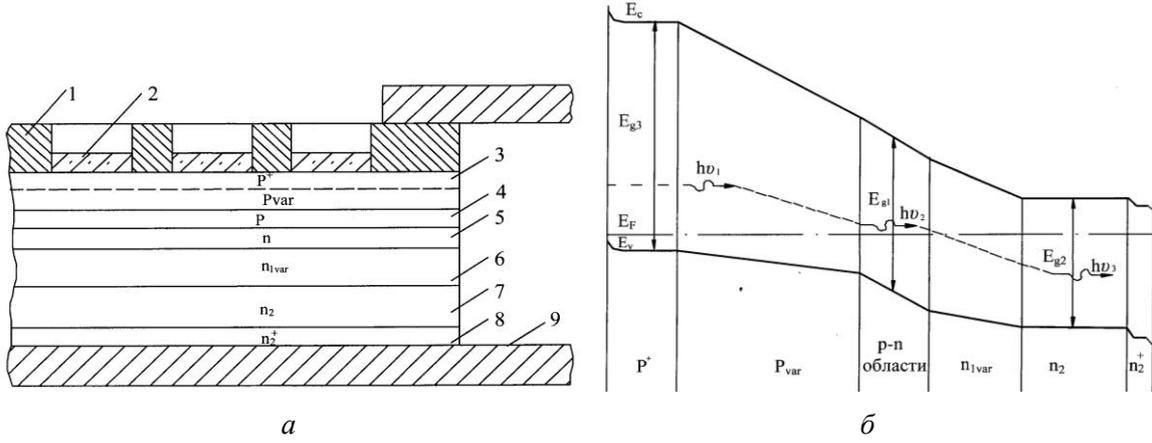


Рис. 1. Структура преобразователя оптических излучений на основе двойной гетероструктуры (а) и его зонная диаграмма (б): 1 — решетчатый омический контакт; 2 — просветляющий слой; 3 — p^+ -слой широкозонного полупроводника с варизонной областью; 4, 5 — p - n -переход; 6 — варизонный n -слой; 7, 8 — узкозонный n -слой и его n^+ -сильнолегированная область; 9 — нижний сплошной омический контакт

$$S_i = \Delta J / \Delta J \nu \approx J - J_T / J_\nu \approx J_\phi$$

а интегральная вольтовая чувствительность

$$S_u = \Delta U / \Delta J \nu \approx U - U_T / J_\nu \approx U_\phi / J_\nu,$$

где $U_\phi = \left(\frac{kT}{e} \right) \ln \left[J_\phi / J_s + 1 \right]$; J_ϕ , U_ϕ — фототок и напряжение; J_T , U_T — темновой ток и напряжение преобразователя, J_ν — интенсивность светового потока,

$$J_\phi = J_s^n + J_{pR}^n + J_\beta^p + J_{DR}^p. \quad (1)$$

то необходимым условием синтеза высококачественного ФЭП является достижение предельно возможной величины фототока. Выражение для полной плотности фототока n - p -гетеродиодного фотопреобразователя имеет следующий вид [1]:

Здесь

$$J_s^n \approx e \left[\frac{J_\nu \alpha_1^2 L_n^2}{\alpha_1^2 L_n^2 - 1} \left(\frac{D_n + S / \alpha_1}{D_n + S L_n} \exp(-d_1 / L_n) - \exp(-\alpha_1 d_1) \right) \right] \quad (2)$$

— плотность фототока, собираемого из обедненного p -слоя благодаря диффузии;

$$J_{DR}^n = e J \nu \exp(-\alpha_1 d_1) - \exp(-\alpha_1 d_0) \quad (3)$$

— плотность фототока, генерируемого в обедненном p -слое; α_1 — коэффициент поглощения в p -слое ФЭП; D_n , L_n — коэффициент диффузии и диффузионная длина фотогенерируемых электронов; d_1 — толщина обедненного p -слоя; d_0 — толщина p -слоя ФЭП; J_ν — интенсивность светового потока с длиной волны $\lambda_1 \geq hc / E_{g1}$; E_{g1} — ширина запрещенной зоны p -области;

$$J_\beta^p = e \left[\frac{\alpha_2 J \nu_2 \exp(\chi_2 d_2)}{\alpha_2 - 1 / L_p} - \frac{2 \alpha_2 J \nu_2 \exp(\chi_2 d_2) \left[\exp\left(-\frac{d_3}{L_p}\right) - \exp(-\alpha_2 d_3) \right]}{L_p (\chi_2^2 - 1 / L_p) \left[\exp(d_3 / L_p) - \exp(-d_3 / L_p) \right]} \right] \quad (4)$$

— плотность фототока за счет поглощения и диффузии в свободном n -слое базы; $J_{DR}^p = eJ_v [1 - \exp(-\alpha_2 d_2)]$ — плотность фототока за счет поглощения в обедненном n -слое базы; J_{v_2} — интенсивность светового потока с длиной волны $\lambda_2 \geq hc/Eg_2 < \lambda_1$.

В (3) и (4) E_{g2} — ширина запрещенной зоны базового n -слоя; d_2 — толщина обедненного слоя базы; α_2, d_3 — коэффициент и толщина базового слоя ФЭП; L_p — диффузионная длина фотогенерируемых дырок.

Анализ выражений (1)–(3) показывает, что для достижения поставленной цели необходимо выбирать материалы компонентов ФЭП с максимально возможными значениями D, L , оптимизировать толщины областей гетероструктуры, а также расширить диапазон энергий активных фотонов падающего оптического излучения ΔE_λ . Последняя задача разрешена путем создания в обедненной области варизонного слоя n_{1var} .

Созданный ФЭП является преобразователем с p - n -переходом на основе арсенида галлия, n -область ФЭП представляет слой n^+ из InAs толщиной 2,8 мкм, легированный Te с концентрацией $N_D \approx 3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$; n_2 -слой выполнен также из InAs с концентрацией примеси Te $N_D \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ толщиной 0,3 мкм; варизонный слой n_{1var} выполнен из соединения $Ga_x In_{1-x} As$, легирован Te с концентрацией $N_D \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и толщиной 0,5...0,6 мкм. Ширина его запрещенной зоны изменяется от 1,43 эВ до 0,36 эВ. p - n -переход из GaAs включает n -область, легированную Te с концентрацией $N_D \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$, и легированную Cd p -область с концентрацией $N_A \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Суммарная толщина p - n -перехода 0,65 мкм, что составляет 0,9 W_0 . p -Область ФЭП содержит варизонный слой P_{var} , выполненный на основе соединения $Ga_x Al_{1-x} As$, причем параметр x изменяется от 0 до 0,3, а ширина запрещенной зоны изменяется от 1,43 эВ до 2,15 эВ. Варизонный p -слой легирован Cd с концентрацией $N_A \approx 10^{16} \text{ см}^{-3}$, обладает толщиной 0,6 мкм; p^+ -сильнолегированный слой выполнен из арсенида алюминия, легированного Cd с концентрацией $N_A \approx 5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, его толщина составляет 2,3 мкм. Нижний сплошной омический контакт реализован Te-Al-Ni общей толщиной 2 мкм, а верхний омический контакт 1,5 мкм сформирован структурой Cd-Al-Ni.

Занимаемая верхним контактом площадь на p^+ -слое составляет 12%, рабочая площадь p^+ -слоя $S = 0,3 \cdot 0,3 \text{ см}$.

При воздействии квантов света, либо фотонов от других источников излучений на рабочую поверхность ФЭП со стороны решетчатого контакта, как следует из зонной диаграммы рис. 1,б, фотоны с энергиями $E_i = hv < E_{g3} [p^+]$, где $E_{g3} [p^+]$ — ширина запрещенной зоны p^+ -слоя, проходят просветляющий слой, p -широкозонный сильнолегированный слой, и достигают P_{var} -слоя и p - n -перехода. Фотоны с $hv = E_{g3} \geq E_i \geq E_{g1}$ поглощаются в p -варизонном слое и в p - n -обедненных областях перехода, а фотоны с $hv = E_{g1} \geq E_i \geq E_{g2}$ поглощаются в слое n_{1var} и в n_2 -слое узкозонного полупроводника, создавая в поглощающих фотонах областях ФЭП избыточную концентрацию электронов и дырок в соответствии с зависимостями $\Delta n = \beta \alpha J_v \tau_n$; $\Delta p = \beta \alpha J_v \tau_p$, причем результирующий активно поглощаемый фотонный поток

$$J_v = \int_{v_{min}}^{v_{max}} J(v) dv,$$

здесь β, α — квантовый выход носителей заряда и коэффициент поглощения света; τ_n, τ_p — время жизни фотовозбуждаемых носителей, $E_{g2} < E_{g3}$; $v_{min} = E_{g2}/h$; $v_{max} = E_{g3}/h$; h — постоянная Планка.

При заданной плотности фотонов J_0 фототок $J_\Phi = e (\Delta n \mu_n + \Delta p \mu_p)$.

В легированных примесями слоях p_{1var}, n_{1var}, n_2 созданы примесные уровни $\Delta E_D, \Delta E_A$ глубиной 0,12 эВ и 0,08 эВ, которые возбуждаются фотонами дальней инфракрасной области.

Поскольку структурой ФЭП активно поглощается широкий спектр фотонов с энергиями от E_{g3}, E_{g1} до $E_{g2}, \Delta E_D$, то результирующий ток ФЭП, а следовательно S_i и S_u , будут значительно выше, чем у известных аналогов. Для сформированного ФЭП указанных размеров экспериментально получены основные характеристики: вольтовая $J_a = f(U_a)/J_0 = \text{const}$, спектральная $J_a = f(\lambda)/\Phi, U_a = \text{const}$ и энергетическая $J_a = f(\Phi)/U_a = \text{const}$.

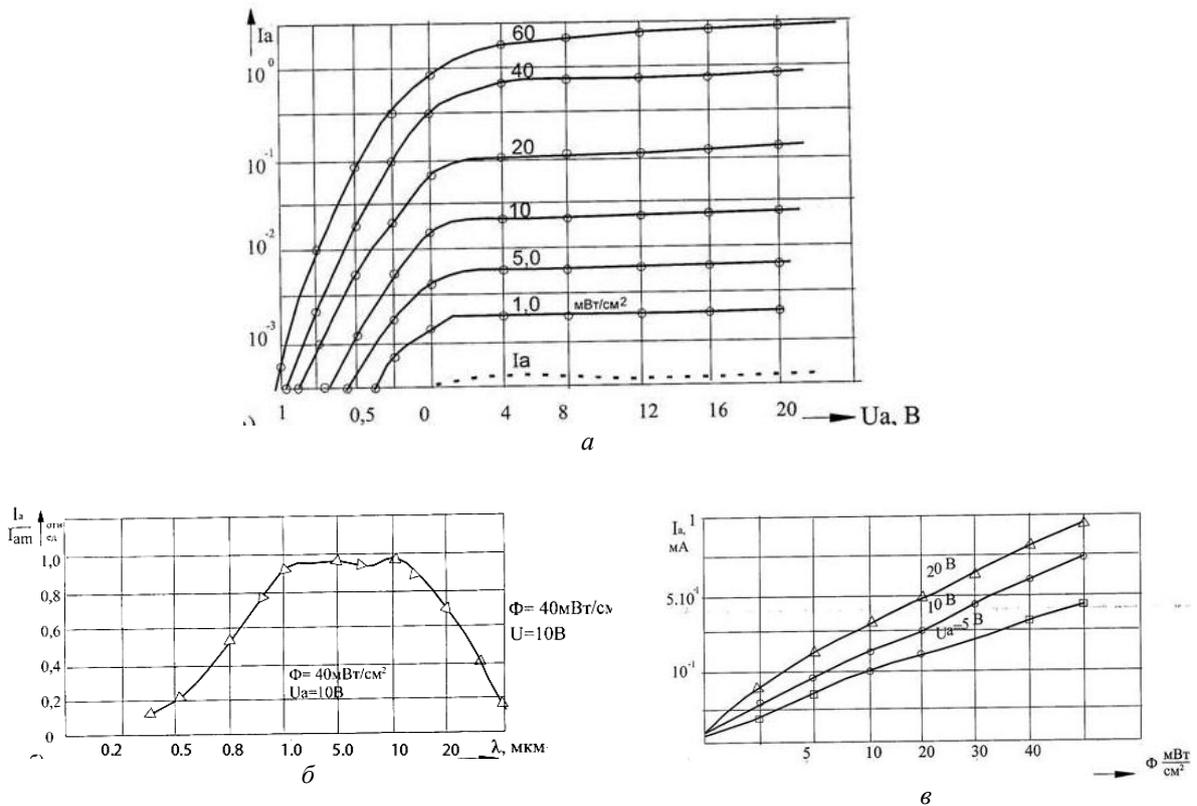


Рис. 2. Характеристики ФЭП: *a* — ВАХ; *б* — спектральная; *в* — энергетическая характеристика

Семейство ВАХ, как следует из графика рис. 2,*a*, аналогично выходной характеристике триодной структуры, однако управляющим сигналом ФЭП в режиме фотопреобразователя является J_v . В режиме фотогенератора выходное напряжение при холостом ходе превышает 1 В, представленная на рис. 1.2б спектральная характеристика показывает, что созданный ФЭП обладает высокой токовой чувствительностью в широком спектральном диапазоне от 0,4 до 12 мкм. Энергетическая характеристика ФЭП (рис. 2,*в*) обладает достаточно высокой линейностью в широком интервале интенсивности оптических излучений, что отражает возможность использования ФЭП в структуре оптрона как преобразователя оптического сигнала в электрический. Сформированный на основе гетеродиодной многослойной структуры типовой образец ФЭП обладает следующими электрофизическими параметрами: токовая чувствительность $S_I \approx 1,5 \dots 5,0$ А/Вт; диапазон спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 0,5 \dots 13$ мкм; порог чувствительности $\Phi_n = 5 \cdot 10^{-8}$ лм Гц $^{-1/2}$; темновое сопротивление $R_t \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7$ Ом; постоянная времени $\tau = 10^{-5}$ с; рабочее напряжение $U_a = 5 \dots 20$ В.

Разработанный преобразователь ИК-излучений по сравнению с аналогами имеет более высокие S_I , $\Delta\lambda$, защищен патентом [3] и используется как важнейший функциональный узел в устройстве контроля тепловых излучений.

Заключение

Разработанный на основе гетеродиодной многослойной структуры преобразователь ИК-излучений обладает высокими электрофизическими свойствами, в частности токовая чувствительность $S_I \approx 1,5 \dots 5,0$ А/Вт, диапазон спектральной чувствительности $\Delta\lambda = 0,5 \dots 13$ мкм, темновое сопротивление $R_t \approx 5 \cdot 10^6 - 10^7$ Ом. Преобразователь ИК-излучений используется как важнейший функциональный узел в устройствах контроля тепловых излучений.

IR-RADIATIONS CONVERTER ON BASIS OF HETEROJUNCTIONAL FUNCTIONAL ELEMENTS

V.A. SYCHIK, V.S. SHUMILO

Abstract

There has been proposed a new construction of semiconductor IR-radiation converter, realized on basis of heterojunctional functional elements. Guidelines on the use of IR-radiation converter in non contact control of thermal field devices have been given.

Литература

1. Гурта Ф., Микула Д. // Каучук и резина, 2005. № 4. С. 29–33.
2. Васильев В.В., Овсяк В.Н., Шашкин В.В. Инфракрасные фотоприемные модули на варизонных слоях КРТ и на структурах с квантовыми ямами GaAs / AlGaAs/ Оптический журнал. 2005, 72. № 6. С. 63–69.
3. Патент RU 2080690, МКИ⁶, H01 L 31/048. Фотовольтаический преобразователь/ Сычик В.А.