

06.2;12

Об увеличении параметров фоточувствительности малоразмерных фотоприемников ИК-излучения

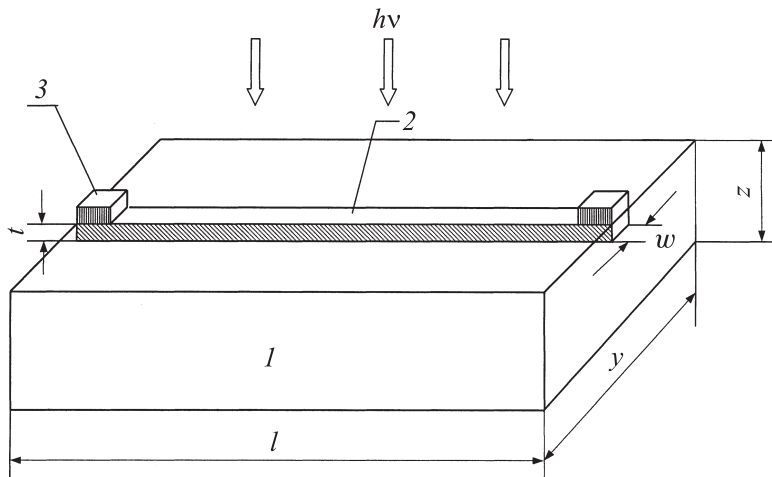
© Н.Д. Исмаилов

Институт физики НАН Азербайджана, Баку
E-mail: ismailovnamik@yahoo.com

Поступило в Редакцию 23 декабря 2010 г.

Рассматриваются конструкция и принцип работы ИК-фотоприемника, имеющего размеры сечения проводящего слоя, намного меньшие длины собирания неосновных носителей, фотогенерированных в периферийных областях с противоположным типом проводимости. Показана потенциальная возможность реализации очень высоких параметров фоточувствительности, ограниченных термической генерацией, и значительного снижения потребляемой мощности.

Основной областью применения малоразмерных охлаждаемых ИК-фотоприемников является регистрация экстремально слабого излучения, а также формирование теплового изображения в среднем и дальнем ИК-диапазоне. В настоящее время наилучшими параметрами фоточувствительности в этом диапазоне обладают фотоприемники на основе узкозонных полупроводников $Cd_xHg_{1-x}Te$, $InSb$. Технология изготовления их хорошо отработана и параметры наилучших образцов очень близки к теоретическим пределам, налагаемым как излучением фона, так и термической генерацией [1]. Для фоторезисторов увеличение параметров фоточувствительности возможно путем уменьшения площади и толщины фоточувствительной области. Однако площадь фоточувствительной области ограничена дифракцией оптической системы, а при уменьшении толщины образца менее $10 \mu m$ сильно уменьшаются интенсивность поглощаемого излучения и время релаксации фотопроводимости τ из-за влияния поверхностной рекомбинации [2]. Таким образом, дальнейшее улучшение параметров фоточувствительности сдерживается как технологическими, так и фундаментальными факторами. Однако указанные теоретические пределы были определены для модели однородных фоторезисторов. В данной работе предложена



Геометрическая модель фотоприемника: 1 — область p -типа проводимости, 2 — слой n -типа проводимости, 3 — омические контакты.

геометрическая модель и рассматривается принцип работы малоразмерного слоистого ИК-фотоприемника, который может иметь параметры фоточувствительности, ограниченные термической генерацией, значительно превышающие экспериментально достигнутые на данное время.

Геометрическая модель рассматриваемого фотоприемника показана на рисунке. В подложке p -типа проводимости с размерами освещаемой площадки $A = l \times y$ и толщиной z создана тонкая полоска n -типа проводимости толщиной t и шириной w , причем $y, z \leq L_e$, а $t, w \ll L_e$ и $t > a$, где L_e — диффузионная длина неосновных носителей заряда в p -области, a — толщина области пространственного заряда (ОПЗ). На концах полоски n -типа проводимости созданы омические контакты, посредством которых фотоприемник включается в измерительную цепь.

При низких температурах, когда сопротивление p – n -перехода намного больше сопротивления n -области, проводимость тока осуществляется только по слою n -типа проводимости, который можно рассматривать как изолированный от области p -типа проводимости. При освещении структуры фотоэлектроны, генерируемые в том числе и в

p -области, скапливаются у внешней границы n -слоя, а фотодырки — на границе ОПЗ и квазинейтральной p -области. Таким образом, модуляция проводимости n -слоя осуществляется только фотоэлектронами. Наличие рекомбинационного барьера обуславливает большие времена релаксации τ и значительно уменьшает влияние поверхностной рекомбинации S_0 . Критическое значение S_0 , ниже которого влиянием поверхностной рекомбинации на τ и спектральную характеристику фоточувствительности можно пренебречь, определяется по формуле: $S_0 = (D_h/L_h)\text{cth}(t/L_h) \cong D_h/t$, L_h , D_h — длина диффузии и коэффициент диффузии дырок соответственно. Оценочные ее значения на 2–3 порядка больше значений S_0 для однородных фоторезисторов.

Время релаксации фотопроводимости можно определить по формуле [3]:

$$\tau = \frac{kT}{2qk} \frac{N_d N_a}{N_a + N_d} \frac{a}{q + L_e} \frac{1}{g_b + v}, \quad (1)$$

$$L = L_e \text{th} \frac{y}{L_e} + L_h \text{th} \frac{t}{L_h} \approx y + t, \quad v = \frac{L_e v^* + a v_{DR}}{a + L_e},$$

$$v^* = L^{-1} \left(\frac{L_e n_p^0}{\tau_n} \text{th} \frac{y}{L_e} + \frac{L_h p_n^0}{\tau_p} \text{th} \frac{t}{L_h} \right) \approx \frac{n_p^0}{\tau_n},$$

где N_a , N_d — концентрация акцепторов и доноров в p - и n -слоях соответственно, $g_b = \eta \alpha \Phi_b$ — скорость генерации носителей фоновым излучением, Φ_b — плотность потока фотонов фонового излучения, η — квантовая эффективность, α — коэффициент поглощения, φ_b — высота потенциального барьера между p - и n -слоями при наличии фона, L играет роль длины, с которой фотоносители собираются в ОПЗ, v имеет смысл эффективной скорости термической генерации в квазинейтральных областях, а v_{DR} — эффективная скорость термической генерации в ОПЗ.

Допустим, что плотность потока фотонов сигнала $\Phi_s(\lambda)$ падает на детектор площадью A и что сопротивление нагрузки намного больше сопротивления детектора. Допустим далее, что $g_b < v$, освещение и электрическое поле малы и что в p -слое фотогенерация носителей заряда однородная, а времена жизни основных и неосновных носителей заряда в p - и n -слоях равны.

Полагая, для простоты, однородное распределение примесей в проводящем n -слое, можно записать выражение для фототока:

$$I_{ph} = \frac{qwt(\Delta n\mu_n + \Delta p\mu_h)U_b}{l}, \quad (2)$$

где Δn , Δp — концентрация избыточных электронов и дырок в n -слое. Учитывая, что $y, z < L_e$ и практически все электроны, фотогенерированные в объеме p -слоя, достигают ОПЗ, для концентрации избыточных электронов в n -слое можно записать:

$$\Delta n = \frac{\eta\Phi_s\tau}{z} \left(\frac{lyz}{lwt} \right) = \frac{\eta\Phi_s\tau y}{wt}. \quad (3)$$

Тогда для фотонапряжения из (2) и (3) будем иметь:

$$V_s = I_{ph}R_d = I_{ph} \frac{l}{qwt\eta\mu_n} = \frac{\eta\Phi_s\tau U_b y}{wt n}.$$

Соответственно величина вольтовой чувствительности будет иметь вид:

$$R_v = \frac{V_s}{P_\lambda} = \frac{\eta\Phi_s\lambda}{hc} \frac{\tau U_b y}{yl\Phi_s wtn} = \frac{\eta\lambda U_b \tau}{hclwtn}, \quad (4)$$

где поглощаемая монохроматическая мощность $P_\lambda = \Phi_s A \lambda / hc$. Это стандартное выражение для вольтовой чувствительности, которая, однако, в $yz\tau/wt\tau'$ раз превышает значение для однородного фоторезистора с размерами фоточувствительной области $l \times y \times z$ и временем фоторелаксации τ' , вследствие того, что область оптической генерации носителей заряда значительно превышает область проводимости тока, а $\tau > \tau'$.

При вычислении шумов надо учесть, что из-за малого сечения n -слоя его сопротивление может достигать больших значений и тепловые шумы V_j могут преобладать над генерационно-рекомбинационными V_{g-r} .

Величина генерационно-рекомбинационных шумов обусловлена флуктуацией концентрации термогенерированных носителей заряда в объеме n -слоя, и так как $n \gg \Delta n$, p_n , то она определяется по формуле [4]:

$$V_{g-r} = \frac{2U_b(+b)}{(lwt)^{1/2}(nb+p)} \left(\frac{np_n\tau\Delta f}{n+p_n} \right)^{1/2} = \frac{2U_b}{(lwt)^{1/2}} \frac{(p_n\tau\Delta f)^{1/2}}{n}, \quad (5)$$

где $b = \mu_e/\mu_h$, Δf = полоса частот.

Если $V_{g-r} > V_j$, то для удельной обнаружительной способности из (4) и (5) имеем:

$$D_{\lambda}^* = \frac{R_{\lambda}}{\sqrt{V_j^2 + V_{g-r}^2}} \sqrt{A\Delta f} = \frac{\eta\lambda}{2hc} \left(\frac{\tau\Delta f}{p_n f} \right)^{1/2} \left(\frac{y}{w} \right)^{1/2}, \quad (6)$$

Если доминирует тепловой шум $V_j = 2\sqrt{kTR}$, то из (6) можно получить:

$$D_{\lambda}^* = \frac{\eta\lambda}{2hc} \frac{U_b \tau}{l} \left(\frac{q\mu\Delta f}{tkT} \right)^{1/2} \left(\frac{y}{w} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Рассмотрим, какие конкретно параметры фоточувствительности потенциально возможно реализовать для фотоприемника с рассмотренной конфигурацией на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ — лидера среди других материалов. При рабочей температуре $T = 77\text{ K}$ длине волны отсечки $11\ \mu\text{m}$ соответствует $x = 0.21$ с $n_i \approx 10^{13}\ \text{cm}^{-3}$. Для получения n -слоя может быть использована ионная имплантация, которая обычно используется для создания p – n -переходов на основе $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ [5]. В качестве подложки обычно используется p -тип с $N_a = 10^{16}\ \text{cm}^{-3}$, $\mu_h = 500\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\tau_e = 10^{-7}\ \text{s}$, $L_e = 8 \cdot 10^{-3}\ \text{cm}$, $l = 10^{-2}\ \text{cm}$, $y = 5 \cdot 10^{-3}\ \text{cm}$, $z = 2 \cdot 10^{-3}\ \text{cm}$. Примем для n -слоя в среднем параметры: $N_d = 10^{15}\ \text{cm}^{-3}$, $\mu_e = 10^5\ \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $\tau_e = 10^{-6}\ \text{s}$, $L_h = 3 \cdot 10^{-3}\ \text{cm}$ и $t = w = 1 \cdot 10^{-4}\ \text{cm}$, а p – n -переход имеет $\varphi_k = 10\ \text{kT}/q$, $a = 3 \cdot 10^{-5}\ \text{cm}$. При низком уровне фонового излучения $\Phi_b < 10^{14}\ \text{cm}^{-2}$, $g_b < v \approx n_p/\tau_e = 10^{17}\ \text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ из формулы (1) имеем $\tau = 10^{-5}\ \text{s}$. Расчеты показывают, что $V_j > V_{g-r}$, поэтому из формул (4) и (7) при $U_b = 2 \cdot 10^{-2}\ \text{V}$ соответственно имеем $R_v = 10^8\ \text{V}/\text{W}$ и $D_{\lambda}^* = 3 \cdot 10^{13}\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{-1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. Для сравнения приведем максимальные экспериментально достигнутые значения [2]: $R_v = 10^6\ \text{V}/\text{W}$ и $D_{\lambda}^* = 1 \cdot 10^{12}\ \text{cm} \cdot \text{Hz}^{-1/2} \cdot \text{W}^{-1}$. Эти значения почти равны теоретически предельным для однородного фоторезистора.

Таким образом, рассматриваемый тип малоразмерного фотоприемника характеризуется высокими параметрами фоточувствительности и значительно малой потребляемой мощностью. Указанные преимущества, а также существенно малые размеры сечения проводящего слоя по сравнению не только с диффузионной длиной неосновных носителей, но и с длиной волны излучения, могут значительно расширить область применения рассмотренного фотоприемника.

Список литературы

- [1] *Antoni Rogalski* // *Infrared Physics & Technology*. 2002. V. 43. P. 187–210.
- [2] *Risal Singh, Vardan Mittal* // *Defence Science J.* 2003. V. 53. N 31. P. 281–324.
- [3] *Неустроев Л.Н., Осипов В.В.* // *ФТП*. 1981. Т. 15. В. 6. С. 1062–1077.
- [4] *Фотоприемники* видимого и ИК-диапазонов. / Под ред. Р. Дж. Кнесса. М.: Радио и связь, 1985. 328 с.
- [5] *Voitsehovski A.V., Grigoriyev D.V., Talipov M.Kh.* // *Russian Physical J.* 2008. V. 51. N 10. P. 1001–1015.