

УДК 621.383.45:346.48'49'24

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛА $Cd_xHg_{1-x}Te$ ДЛЯ РАБОТЫ В ГЕТЕРОДИННОМ РЕЖИМЕ

Л. И. Горелик, К. М. Куликов, Ю. С. Трошкин, Ю. П. Шаронов

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»»,
Москва, Россия

Рассмотрена возможность построения оптического гетеродинного приемника на базе фоторезистора из $Cd_xHg_{1-x}Te$ n-типа. Рассчитаны зависимости пороговой мощности от оптической мощности гетеродина, напряжения постоянного смещения на фоторезисторе, частоты и шумов предварительного усилителя. Показано, что малоразмерные фоторезисторы могут успешно конкурировать с фотодиодами в полосе до 40 МГц.

Среди всех известных фотоприемников, предназначенных для приема когерентных лазерных сигналов в инфракрасной области спектра, наибольшей чув-

ствительностью обладают гетеродинные приемники. Суть гетеродинного способа приема заключается в том, что принимаемый лазерный сигнал смешивается (интерферирует) на чувствительной площадке фотоприемника с когерентным (опорным) полем оптического гетеродина. На этом составляющая фототока, обусловленная интерференцией сигнального и опорного полей, представляет собой сигнал промежуточной частоты, равной разности частот сигнального и опорного полей. Таким образом, имеет место эффект усиления сигнального поля. При этом появляется возможность увеличить фототок от слабого сигнала до уровня, при котором влияние собственных шумов фотоприемника становится пренебрежимо малым.

Гетеродинный способ фотодетектирования дает максимальный эффект при регистрации лазерного излучения в средней инфракрасной области спектра, где отсутствуют фотодетекторы с внутренним усилением, но существуют высокочувствительные широкополосные фотодиоды на основе InSb , $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, $\text{Pb}_x\text{Sn}_{1-x}\text{Te}$.

Известно, что фоторезисторы могут обладать достаточно высоким внутренним усилением, пропорциональным отношению собственной постоянной времени к времени пролета носителей через образец. Кроме того, как правило, частотная зависимость сигнала фототока и напряжения собственных шумов (исключая тепловой шум) описываются одинаковой зависимостью. Следовательно, частотная зависимость пороговой чувствительности фоторезистора определяется не собственной постоянной времени прибора, а соотношением между шумом прибора и тепловыми шумами прибора, нагрузки и шумами предварительного усилителя, на вход которого включен фоторезистор.

В связи с этим целесообразно рассмотреть гетеродинный приемник, состоящий из фоторезистора и предварительного усилителя. В качестве примера рассмотрим фоторезистор на основе материала $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ (КРТ) n -типа с $x \sim 0,2$ со следующими параметрами: равновесная концентрация основных носителей $n_0 \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; равновесная концентрация неосновных носителей $p_0 \sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; подвижность основных носителей $\mu_n \sim 1 \cdot 10^5 \text{ см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; подвижность неосновных носителей $\mu_p \sim 5 \cdot 10^2 \text{ В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$; τ_0 — объемное время жизни неосновных носителей $\sim 10^{-6} \text{ с}$; размеры приемной площадки $A \sim 50 \times 50 \text{ мкм}^2$; темновое сопротивление $R_T \leq 50 \text{ Ом}$; толщина фоточувствительного элемента $d \sim 10 \text{ мкм}$; рабочая температура фоторезистора $T_p \sim 80 \text{ К}$.

Будем считать, что полоса пропускания входной цепи предварительного усилителя, определяемая постоянной времени $\tau_{\text{вх}} = C_{\Sigma} \frac{R_T R_H}{(R_T + R_H)^2}$, где C_{Σ} — суммарная емкость фотоприемника и входа ПУ; R_H — нагрузочное сопротивление фоторезистора, значительно шире полосы пропускания самого фоторезистора, определяемой временем τ_0 .

Согласно [1], квадрат напряжения фототока выражается соотношением:

$$U_c^2(W) = 2S_u^2 P_c P_r, \quad (1)$$

где W — круговая частота из диапазона $I W_c - W_r$ (W_c — оптическая частота сигнала; W_r — оптическая частота гетеродина);

P_c — мощность сигнала;

P_r — мощность гетеродина;

S_u — вольтовая чувствительность фоторезистора.

$$S_u = q \frac{\eta}{h\nu} R_r G F(W), \quad (2)$$

где q — заряд электрона; η — квантовая эффективность фоторезистора, $\eta \sim 0,6$; $h\nu$ — энергия кванта излучения; $F(W)$ — частотная зависимость вольтовой чувствительности; G — коэффициент фотоэлектрического усиления [2].

$$G = (\mu_n + \mu_p) \frac{\tau_o U}{l^2} f(U), \quad (3)$$

где U — напряжение постоянного смещения фоторезистора; функция $f(U)$ характеризует явление вытягивания носителей.

$$f(U) = 1 + \frac{\mu_p \tau_o U}{l^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{l^2}{\mu_p \tau_o U}\right) \right]. \quad (4)$$

В малоразмерных фоточувствительных элементах заметную роль играет поверхностная рекомбинация. При этом объемное время жизни необходимо заметить на эффективное время, определяемое из соотношения:

$$\frac{1}{\tau_{эф}} = \frac{1}{\tau_o} + \frac{2S}{d}, \quad (5)$$

где S — скорость поверхностной рекомбинации, $S \sim 10^3$ см·с⁻¹.

Функция $f(U)$ приведена на рис. 1 для двух фоточувствительных элементов с размерами 50x50 мкм² и 35x35 мкм²; $\tau_{эф} = 5 \cdot 10^{-7}$ с.

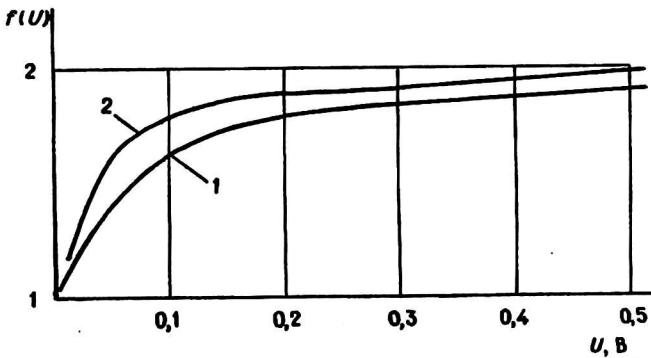


Рис. 1. Зависимость $f(U)$ [см. (4)]: 1 — $l=50$ мкм; 2 — $l=35$ мкм

Частотная зависимость $F(W)$ имеет вид [3]

$$F(W) = \frac{1}{[1 + W^2 \tau_{эф}^2]^{1/2}} \quad (6)$$

для случая $\tau_{эф} < T_{пр} = \frac{l}{\mu_p U}$.

Для обратного соотношения

$$F(W) = \frac{\sin WT_{пр} / 2}{WT_{пр} / 2}. \quad (7)$$

Спектральная плотность шумов на входе предварительного усилителя при условии, что температура нагрузочного сопротивления $T_o > T_p$ и $R_n > R_r$ определяется генерационно-рекомбинационным (Γ - P) шумом фоторезистора и спектральной плотностью ЭДС ПУ ($\epsilon_{шпу}^2$):

$$U_{ш}^2 = U_{\Gamma-P}^2 + \epsilon_{шпу}^2 \quad (8)$$

Согласно [3], напряжение Γ - P шума можно представить в виде:

$$U_{\Gamma-P} = \frac{2U}{n_o} \left[\frac{R_o \tau}{V} \right]^{1/2}, \quad (9)$$

где V — объем фоточувствительного элемента.

Поскольку фотоприемник работает в условии засветки, в выражение (9) надо добавить концентрации носителей, рожденных окружающим фоном и засветкой оптическим гетеродином. Учитывая, что излучение одинаково увеличивает как концентрацию основных, так и неосновных носителей ($\Delta n = \Delta p$), уравнение (9) будет иметь вид:

$$U_{\Gamma-P} = \frac{2U}{(n + \Delta n_\phi + \Delta n_r)} \left[\frac{(P_o + \Delta n \Phi + \Delta n_r)}{V} \right]^{1/2} \quad (10)$$

Поскольку $n_o \gg n_\phi$, $P_o \ll n_\phi$, $\Delta n_\phi \ll \Delta n_r$ и

$$\Delta n_r = \frac{\eta P_r \tau_{\text{эф}} f(U)}{h \nu V} \quad (11)$$

соотношение (8) будет иметь вид:

$$U_{ш}^2(W) = \frac{4U^2 \eta P_r \tau_{\text{эф}}^2 f(U)}{h \nu V^2 (n_o + \Delta n_r)} F(W) + \epsilon_{шпу}^2 \quad (12)$$

Определим пороговую мощность гетеродиного приемника как мощность оптического сигнала, при котором $U_c^2 / U_{ш}^2 = 1$.

Учитывая, что темновое сопротивление квадратного фоточувствительного элемента можно представить в виде

$$R_r = \frac{1}{q \mu_n d (n_o + \Delta n_r)} \quad (13)$$

из (1), (2) и (12) окончательно получаем:

$$P_{\text{пор}} = 2 \frac{h \nu}{\eta} \frac{1}{f(U)} + \frac{P_r}{2U^2} \left[1 + \frac{n_o V}{\tau_{\text{эф}} P_r} \frac{h \nu}{\eta f(U)} \right]^2 \epsilon_{шпу}^2 F(\omega)^{-2} \quad (14)$$

Первое слагаемое характеризует чувствительность в гетеродином режиме самого фотоприемника. При этом при малых напряжениях смещения ($f(U) \sim 1$)

получаем $P_{\text{пор}} = 2 \frac{h \nu}{\eta}$, при больших напряжениях смещения ($f(U) \sim 2$) роль процессов рекомбинации в объеме полупроводника ослабевает по сравнению с пролетом носителей через объем фоточувствительного элемента и $P_{\text{пор}} = \frac{h \nu}{\eta}$. Это

соотношение совпадает с известным соотношением для фотодиода.

Определим оптическую мощность гетеродина P_r , при которой пороговая мощность имеет минимальное значение из условия $\frac{dP_{\text{пор}}}{dP_r} = 0$.

$$P_{r.\text{опт}} = \frac{n_0 V}{\tau_{\text{эф}}} \frac{h \nu}{\eta f(U)}. \quad (15)$$

Оптимальная мощность гетеродина зависит только от параметров самого фоточувствительного элемента и не зависит от шумов предварительного усилителя и частоты. При засветке фоторезистора оптической мощностью, равной $P_{r.\text{опт}}$, его вольтовая чувствительность уменьшается в два раза (см. (2) и (13)).

На рис. 2 приведены зависимости пороговой мощности гетеродиного приемника от мощности гетеродина для различных значений собственных шумов предварительного усилителя.

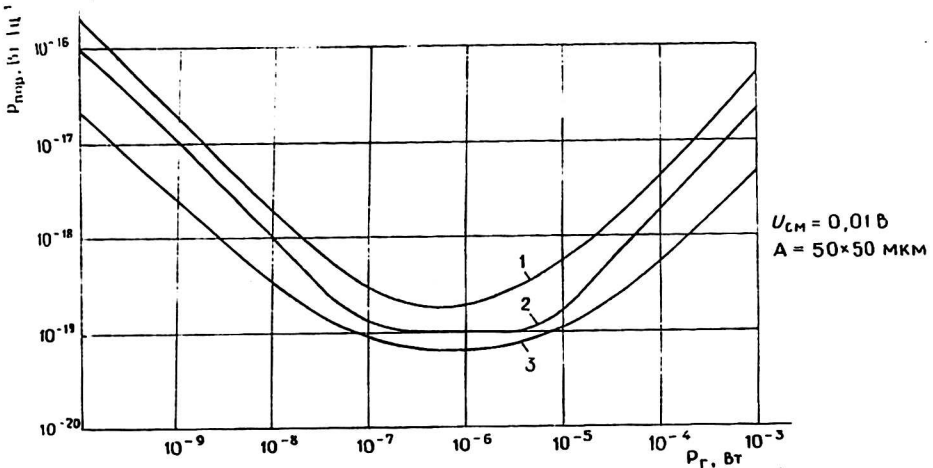


Рис. 2. Зависимость пороговой мощности от мощности оптического гетеродина при малых напряжениях постоянного смещения:
 1 — $e_w = 3$ нВ; 2 — $e_w = 2$ нВ; 3 — $e_w = 1$ нВ

При увеличении постоянного смещения начинает проявляться явление пролета и зависимость $P_{\text{пор}}(P_r)$ ослабевает (рис. 3).

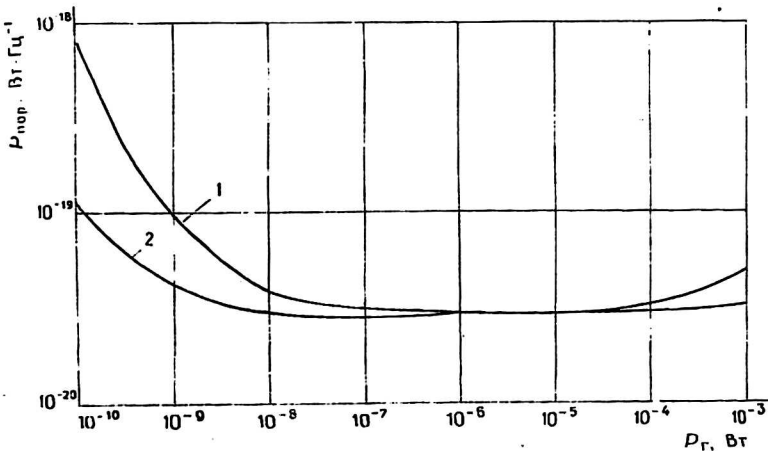


Рис. 3. Зависимость пороговой мощности от мощности оптического гетеродина при больших напряжениях смещения:
 1 — 3 нВ; 2 — 1 нВ

На рис. 4 представлены зависимости $P_{\text{пор}}$ от напряжения постоянного смещения при $P_r \sim P_{r, \text{опт}}$.

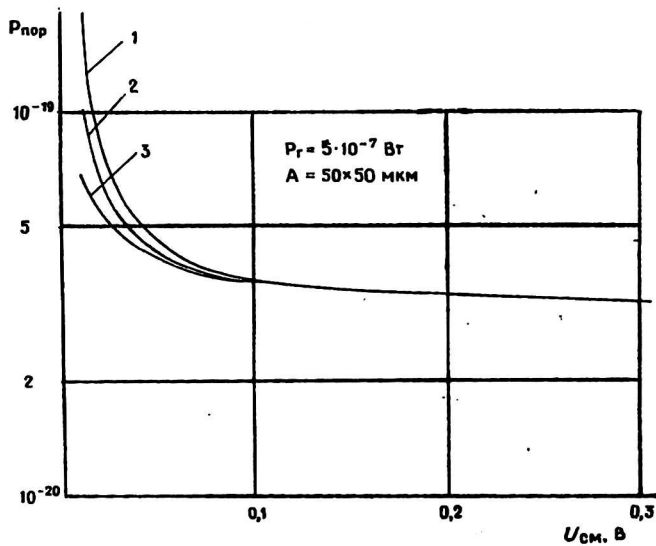


Рис. 4. Зависимость пороговой мощности от напряжения постоянного смещения:
1 — $e_{\text{ш}} = 3$ нВ; 2 — $e_{\text{ш}} = 2$ нВ; 3 — $e_{\text{ш}} = 1$ нВ

На рис. 5 представлены частотные зависимости пороговой чувствительности при разных напряжениях смещения и при $P_r \sim P_{r, \text{опт}}$.

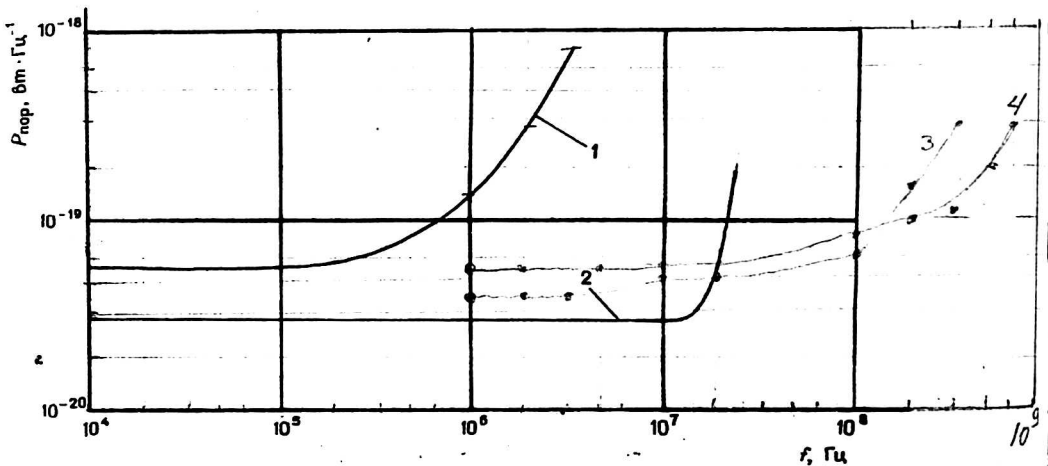


Рис. 5. Частотная зависимость пороговой мощности:
1 — $U_{\text{см}} = 0,01$; 2 — $U_{\text{см}} = 0,5$

Определим граничную частоту гетеродинного приемника как частоту, на которой пороговая мощность увеличивается в два раза. На рис. 6 и 7 представлены зависимости граничной частоты от мощности гетеродина для двух фоторезисторов различных размеров при различных напряжениях смещения и шумах

предварительного усилителя. Для фоточувствительного элемента размером 35×35 мкм при постоянном смещении возможно достичь граничную частоту ~ 40 МГц.

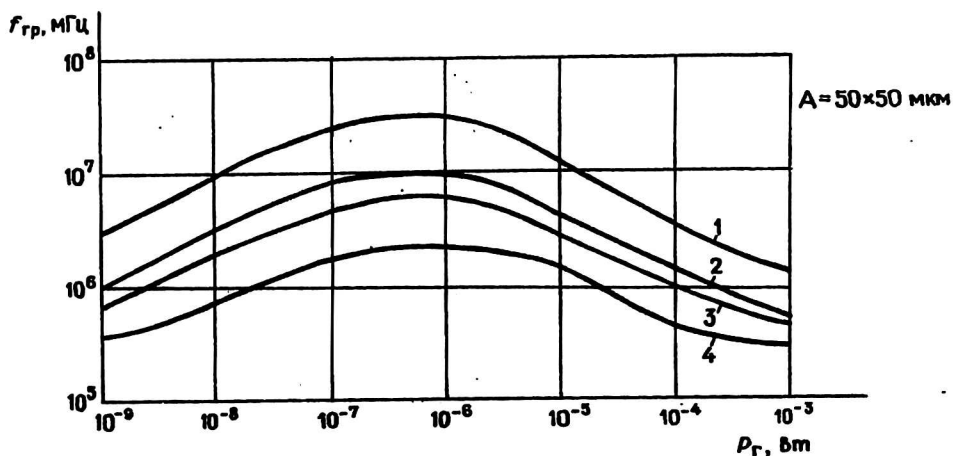


Рис. 6. Зависимость граничной частоты гетеродинного приемника от мощности оптического гетеродина (размер ФЧЭ 50×50 мкм):

1 — $1 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,5 В); 2 — $3 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,5 В); 3 — $1 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,1 В); 4 — $3 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,1 В)

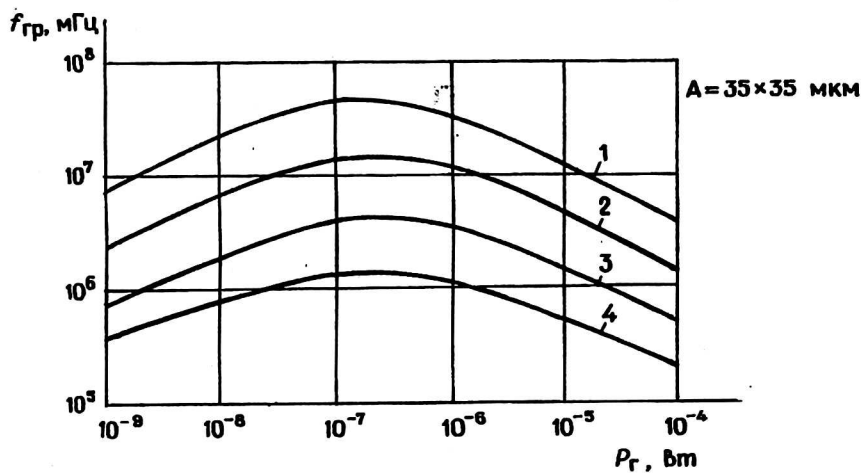


Рис. 7. Зависимость граничной частоты гетеродинного приемника от мощности оптического гетеродина (размер 35×35 мкм):

1 — $1 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,5 В); 2 — $3 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,5 В); 3 — $1 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,05 В); 4 — $3 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ (0,05 В)

Из рисунков видно, что максимальная граничная частота достигается при $P_r \sim P_{r,\text{опт}}$. Это можно объяснить тем, что при $P_r > P_{r,\text{опт}}$ вольтовая чувствительность уменьшается и, следовательно, возрастает роль шумов предварительного усилителя.

Приведенные расчеты показывают, что гетеродинный приемник на основе фоторезистора из КРТ n -типа может успешно конкурировать с приемниками с фотодиодами в полосе до 40 МГц. Надо иметь в виду, что $P_{r,\text{опт}}$ для фоторезистора меньше, чем для фотодиода, т. к. равновесные концентрации носителей в базе диода выше, кроме того, стоимость фоторезистора значительно ниже стоимости фотодиодов из аналогичного материала.

Л и т е р а т у р а

1. В и л ь я м К. П р а т т. Лазерные системы связи. — М.: Связь, 1972.
2. Фотоприемники видимого и ИК-диапазонов. — М.: Радио и связь, 1985.
3. А. В а н - д е р - з и л. Флуктуационные явления в полупроводниках. — М.: Иностранная литература, 1961.

 **$Cd_xHg_{1-x}Te$ PHOTORESISTORS APPLICATIONS FOR OPERATION
IN HETERODYNE MODE**

L. I. Gorelik, K. M. Kulikov, Yu. S. Troshkin, Y. P. Sharonov
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

Possibility of designing an optical heterodyne detector based on n-type $Cd_xHg_{1-x}Te$ photoresistor is discussed. Dependences of a threshold power on a heterodyne optical power, fixed voltage bias on a photoresistor, preamplifier frequency and noises are calculated. It is shown that small-size photoresistors can compete successfully with photodiodes in a frequency band of up to 40 MHz.