

УДК 621.383.45:621.373.826

ПРИМЕНЕНИЕ ФОТОРЕЗИСТОРОВ НА ОСНОВЕ $Cd_xHg_{1-x}Te$ ДЛЯ ПРИЕМА ИМПУЛЬСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ CO_2 -ЛАЗЕРА

Л. И. Горелик, Н. В. Кравченко, К. М. Куликов, Ю. С. Трошкин

Государственное унитарное предприятие "Научно-производственное объединение "Орион",
Москва, Россия

Рассмотрена возможность применения относительно низкочастотных фоторезисторов на основе КРТ p -типа для регистрации импульсов излучения CO_2 -лазера длительностью до 10 нс. Рассчитаны амплитудно-частотные характеристики квазиоптимального фильтра.

В настоящее время как в отечественной, так и в зарубежной оптико-электронной промышленности для приема импульсов CO_2 -лазера применяются фотодиоды на основе твердого раствора $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ).

При разработке ряда комплексированных приборов (тепловизор—дальномер, тепlopеленгатор—дальномер и т. д.) представляет практический интерес возможность использования одного и того же базового фоточувствительного элемента для приема достаточно коротких (до 10 нс) импульсов излучения. В связи с этим была рассмотрена возможность применения относительно низкочастотного фоторезистора для приема импульсного излучения CO_2 -лазера.

Основой для предложений о возможности применения таких ФЭПП являются следующие априорные данные: высокая вольт-ваттная чувствительность, низкое темновое сопротивление, а также техническая возможность реализации шумов самого фотозлектрического полупроводникового приемника излучения (ФЭПП).

Целью статьи является рассмотрение возможности регистрации импульсов излучения на длине волны 10,6 мкм длительностью 20—200 нс с пороговой чувствительностью ФПУ на основе относительно низкочастотного КРТ фоторе-

зистора $\sim 10^{-8}$ Вт, а также определения основных требований к предусилителю, обеспечивающему оптимальную (квазиоптимальную) обработку сигнала и шума.

Типовая эквивалентная схема включения фоторезистора для малого переменного сигнала представлена на рис. 1 [1]. В соответствии с эквивалентной схемой напряжение сигнала и спектральная плотность шума на входе предусилителя (ПУ) может быть записана в следующем виде:

$$U_c(\omega) = \frac{P_{\lambda\omega} S_u(\omega) R}{\left(1 + j\omega C_{\Sigma} \frac{rR}{r+R}\right) (r+R)}; \quad (1)$$

$$S(\omega) = \frac{S_{\text{ФР}}(\omega) \left(\frac{R}{r+R}\right)^2 + 4kTR + i_{\text{шп}}^2 \left(\frac{rR}{R+r}\right)^2}{\left[1 + \omega^2 C_{\Sigma}^2 \left(\frac{2R}{2+R}\right)^2\right]} + e_{\text{шп}}^2, \quad (2)$$

где C_{Σ} — суммарная емкость ФЭПП и ПУ;

r — темновое сопротивление ФР;

ω — круговая частота;

$P_{\lambda\omega}$ — падающая на ФР мощность излучения;

R — входное сопротивление;

$i_{\text{шп}}^2, e_{\text{шп}}^2$ — приведенные спектральные плотности шумовых токов и ЭДС ПУ;

$S_u(\omega)$ — вольтовая чувствительность на частоте ω ;

$S_{\text{ФР}}(\omega)$ — спектральная плотность генерационно-рекомбинационного (γ -р) и теплового шума ФР;

k — постоянная Больцмана;

T — абсолютная температура.

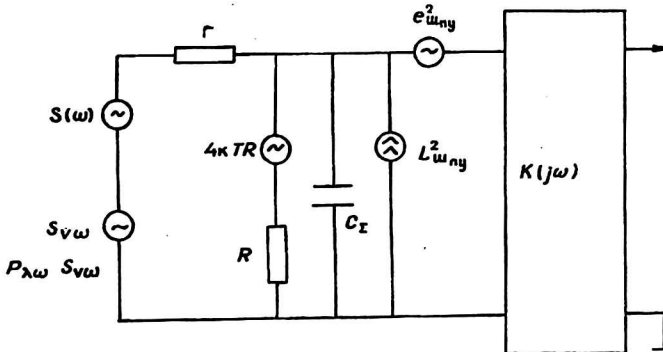


Рис. 1 Эквивалентная схема включения фоторезистора:

r — тепловое сопротивление ФР; R — входное сопротивление; C_{Σ} — суммарная емкость ФР и ПУ;

$i_{\text{шп}}^2, e_{\text{шп}}^2$ — приведенные спектральные плотности шумовых тока и ЭДС ПУ; $S(w)$ — спектральная плотность шума ФР; P_{λ} и $S(w)$ — источник напряжения сигнала ФР; S_{uv} — вольтовая чувствительность ФР; $P_{\lambda\omega}$ — мощность входного сигнала

Частотная зависимость вольтовой чувствительности и спектральной плотности шума фоторезистора, без учета шумов $1/f$, имеет вид

$$S_u(\omega) = \frac{S_{u0}}{1 + j\omega\tau}; \quad (3)$$

$$S_{\text{ФП}}(\omega) = \frac{U_{\text{г-р}}^2}{1 + \omega^2 \tau^2} + 4kT_{\text{р}}r, \quad (4)$$

где τ — постоянная времени фоторезистора;

$T_{\text{р}}$ — рабочая температура ФЭПП;

$S_{\text{уо}}$ и $U_{\text{г-р}}$ — вольтовая чувствительность и напряжение г-р-шума в области "плато".

В случае, когда темновое сопротивление ФЭПП достаточно низкое (< 50 Ом), для приема импульсов с $T_{0,5} < 1$ мкс формулы (1) и (2) легко приводятся к виду, обычному для импульсных ФПУ на основе фотодиодов [1]:

$$U_{\text{с}}(\omega) = \frac{P_{\lambda\omega} S_{\text{уо}}}{1 + j\omega\tau}; \quad (5)$$

$$S(\omega) = \frac{(U_{\text{г-р}}^2 + e_{\text{ш}\Sigma}^2)(1 + \omega^2 \tau_{\text{ш}}^2)}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (6)$$

где

$$e_{\text{ш}\Sigma}^2 = 4kT_{\text{р}}r + e_{\text{шпу}}^2 + j_{\text{шпу}}^2 r^2;$$

$$\tau_{\text{ш}} = \tau \sqrt{\frac{e_{\text{шпу}}^2}{e_{\text{шпу}}^2 + U_{\text{г-р}}^2}} = \tau k.$$

Как известно, величина $\tau_{\text{ш}}/2T_{0,5}$ в значительной степени определяет пороговую чувствительность ФПУ, оптимальную полосу пропускания, а также возможную степень реализации параметров самого фотоприемника, в рассматриваемом случае: $S_{\text{уо}}$, $U_{\text{г-р}}$.

Общее выражение для порогового потока при регистрации фотоприемным устройством импульсного излучения мощностью

$$P_{\lambda}(t) = \begin{cases} P_0 \sin^2 \frac{t}{2T_{0,5}} & t \in [0, 2T_{0,5}] \\ 0 & t \leq 0; t \geq 2T_{0,5}, \end{cases}$$

где P_0 — амплитуда импульса излучения;

$T_{0,5}$ — длительность импульса излучения по полувысоте имеет вид:

$$P_{\lambda} = \frac{\sqrt{U_{\text{г-р}}^2 + e_{\text{ш}\Sigma}^2}}{S_{\text{уо}}} \frac{1}{\sqrt{T_{0,5}}} \left[1 - \frac{\tau_{\text{ш}}}{2T_{0,5}} + \frac{\tau_{\text{ш}}}{2T_{0,5}} e^{-\frac{2T_{0,5}}{\tau_{\text{ш}}}} + \left(\frac{2T_{0,5}}{\tau_{\text{ш}}} \right)^2 \frac{5}{8\pi^2} + \left(\frac{2T_{0,5}}{\tau_{\text{ш}}} \right)^4 \frac{3}{32\pi^4} \right]^{-1} \left[1 + \frac{(2T_{0,5})^2}{\tau_{\text{ш}}^2 4\pi^2} \right]^2. \quad (7)$$

При $\tau_{\text{ш}}/2T_{0,5} < 0,5$ выражение для порогового потока упрощается

$$P_{\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{U_{\text{г-р}}^2 + e_{\text{ш}\Sigma}^2}}{S_{\text{уо}}} \frac{1}{\sqrt{T_{0,5}}}. \quad (8)$$

При $\tau_{ш}/2T_{0,5} > 3$

$$P_{\lambda} = \sqrt{\frac{\tau_{ш}}{T_{0,5}}} \frac{\sqrt{U_{г-р}^2 + e_{шпу}^2}}{S_{uo}} \frac{1}{\sqrt{T_{0,5}}} \quad (9)$$

Для проведения оценочных расчетов по приведенным соотношениям воспользуемся типичными значениями параметров:

$\tau \sim 200-700$ нс, $U_{г-р} \sim 3-7$ нВ/Гц^{1/2}, $S_{uo} \sim 10^{-5}$ В/Вт. ЭДС шума современных усилителей $e_{шпу} = 1-2$ нВ/Гц^{1/2}; в этом случае $i_{шпу} r \ll e_{шпу}$. Величина $\tau_{ш}/2T_{0,5}$ может меняться от 0,19 до 14,5.

На рис. 2 приведена расчетная зависимость P_{λ} от длительности входного сигнала для типовых параметров фоторезистора, показывающая предельные возможности его реализации.

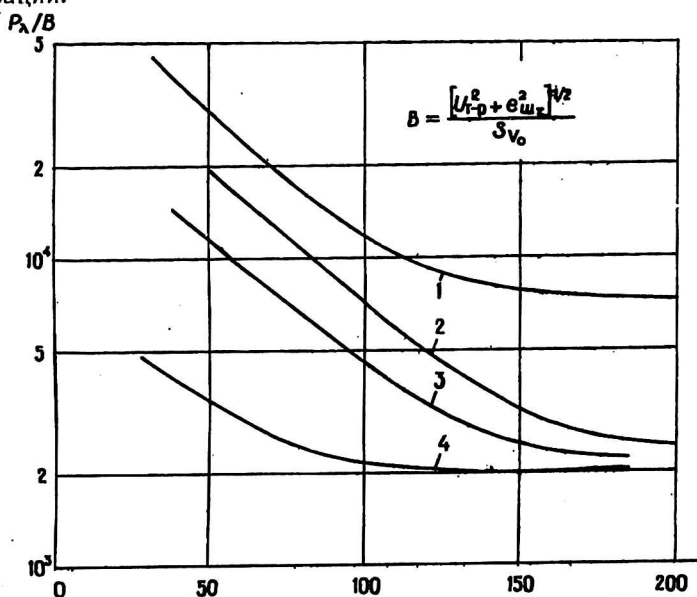


Рис. 2. Расчетная зависимость импульсной пороговой чувствительности ПУ от длительности входного сигнала [см. (7)]:

1 — $\tau_{ш} = 300$ нс; 2 — $\tau_{ш} = 200$ нс; 3 — $\tau_{ш} = 100$ нс; 4 — $\tau_{ш} = 10$ нс

Как следует из расчетов, значения пороговой импульсной чувствительности ФПУ с указанными выше параметрами составляет $10^{-8}-10^{-9}$ Вт. По аналогии с [1] легко найти квазиоптимальную реализацию фильтра в ФПУ с фоторезистором

$$K(j\omega) = \frac{1 + j\omega\tau}{(1 + j\omega\tau_{ш})^2} \quad (10)$$

Расчетные зависимости $|K(j\omega)|$ приведены на рис. 3. Очевидно, что вместо корректирующей цепи (10) можно использовать обычную дифференцирующую и интегрирующую цепи с постоянными времени $\tau_{ш}$. Поскольку длительность выходного сигнала для описываемого фильтра будет превышать $\tau_{ш}$, что не всегда приемлемо в практической дальнометрии для случая $\tau_{ш}/T_{0,5} > 1$, возможно рассмотрение второго RC-фильтра, обеспечивающего двойное расширение передне-

го фронта выходного сигнала ($\tau_{\max} = 2 T_{0,5}$) и имеющего коэффициент передачи с постоянной времени $\alpha = 0,42 \cdot 2 T_{0,5}$ вместо $\tau_{\text{ш}}$ [1].

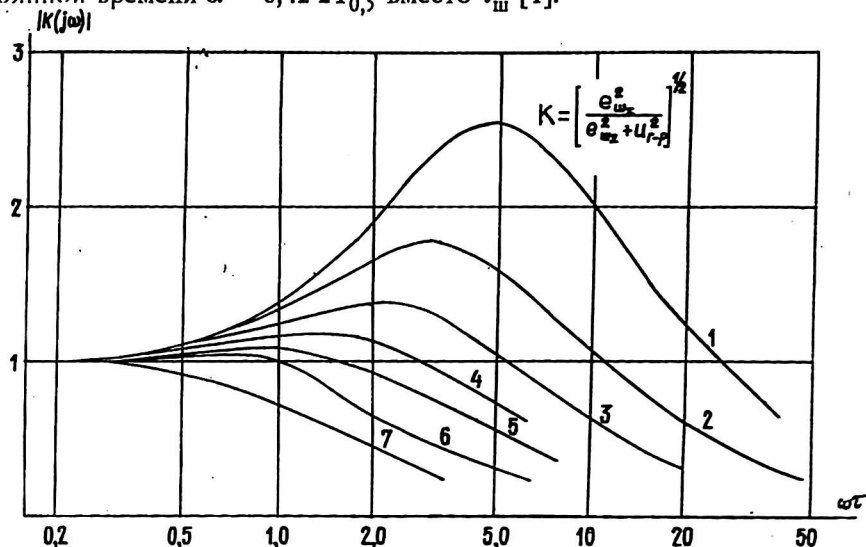


Рис. 3. Расчетные амплитудно-частотные характеристики квазиоптимальных фильтров: 1 — $K=0,2$; 2 — $K=0,3$; 3 — $K=0,4$; 4 — $K=0,5$; 5 — $K=0,6$; 6 — $K=0,8$; 7 — $K=1,0$

В этом случае пороговая чувствительность ФПУ с таким фильтром описывается следующим выражением:

$$P_{\lambda} = \frac{\sqrt{U_{г-р}^2 + \epsilon_{ш\Sigma}^2}}{S_{\text{во}}} \frac{\sqrt{1 + \tau_{\text{ш}}^2 / \alpha^2} (1 + T_{0,5}^2 / \alpha^2 \pi^2)}{\sqrt{2\alpha} \exp(-t / \alpha) [\exp(2T_{0,5} / \alpha) - 1]} \quad (11)$$

Расчетная зависимость P_{λ} по (11) приведена на рис. 4. Пороговая чувствительность ФПУ для импульсов 20—200 нс составляет $10^{-8} \div 10^{-10}$ Вт.

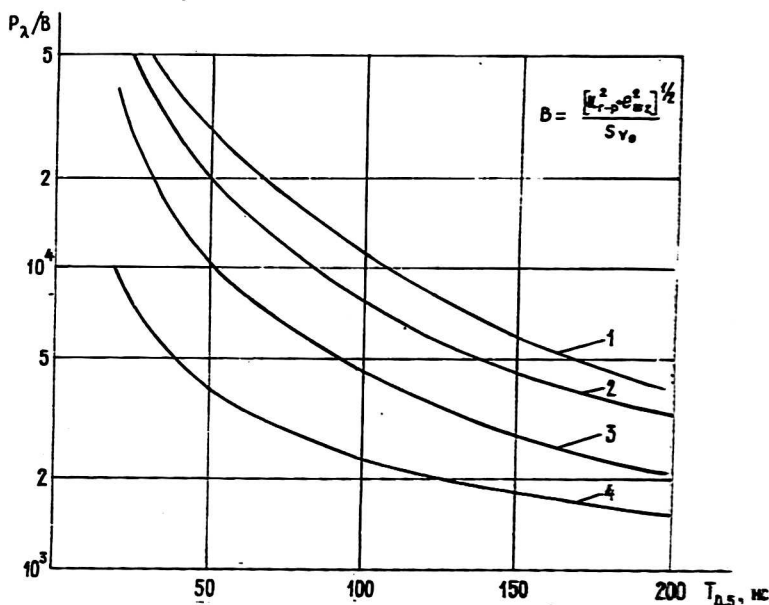


Рис. 4. Расчетная зависимость импульсной пороговой чувствительности ФПУ от длительности входного сигнала [см. (11)]: 1 — $\tau_{\text{ш}} = 300$ нс; 2 — $\tau_{\text{ш}} = 200$ нс; 3 — $\tau_{\text{ш}} = 100$ нс; 4 — $\tau_{\text{ш}} = 20$ нс

Приведенные расчеты справедливы для случая, когда величины и частотные зависимости вольтовой чувствительности и г-р-шума фоторезистора определяются одним эффективным временем. Это справедливо в случае, если в объеме полупроводника отсутствуют уровни прилипания и неоднородное распределение фотоносителей между контактами [2].

В последние годы разработана и широко применяется для фоторезисторов на основе КРТ технология с "теневыми" контактами. В таких приборах расстояние между контактами L много больше линейных размеров фоточувствительной площадки (Δ). В работе [3] было показано, что в этом случае эффект "вытягивания", характерный для малоразмерных фоторезисторов, ослабевает, эффективная постоянная времени фотоприемника увеличивается и, следовательно, увеличиваются значения S_{uo} , $U_{г-р}$ и g . Применение таких фоторезисторов в составе ФПУ упрощает задачу регистрации импульсов излучения благодаря уменьшению $\tau_{ш}$. Кроме того, применение ФЭПП с "теневыми" контактами позволяет уменьшить напряжение постоянного смещения, что особенно важно для многоэлементных ФЭПП [4].

В качестве примера рассчитаем пороговый поток и амплитудно-частотную характеристику оптимального фильтра по полученным соотношениям (7, 10, 11) для ФЭПП со следующими типичными параметрами: $U_{г-р} = 5$ нВ/Гц^{1/2}, $S_{uo} = 10^5$ В/Вт, $\tau = 400$ нс. Приведенная ЭДС шума на входе предварительного усилителя $e_{шпу} = 3$ нВ/Гц^{1/2}. Определим пороговый поток для $T_{0,5} = 50$ нс:

Определяем $\tau_{ш}$ по отношению

$$\tau_{ш} = \tau \sqrt{\frac{e_{шпу}^2}{e_{шпу}^2 + U_{г-р}^2}} \sim 200 \text{ нс};$$

Определяем коэффициент B из выражения

$$B = \frac{\sqrt{e_{шпу}^2 + U_{г-р}^2}}{S_{uo}} \sim 6 \cdot 10^{-14} \text{ Вт}.$$

По графикам (см. рис 2 или 4) определяем P_{λ}/B для $\tau_{ш} = 200$ нс и $T_{0,5} = 50$ нс.

$$P_{\lambda}/B \cong 2 \cdot 10^4.$$

Определяем P_{λ} :

$$P_{\lambda} = 1,2 \cdot 10^{-9} \text{ Вт};$$

Из рис. 3 для $k = 0,5$ определяем амплитудно-частотную характеристику оптимального фильтра.

В заключение следует отметить, что приведенные выше расчетные соотношения справедливы и для других типов фоторезисторов при соблюдении указанных условий.

Выводы

1. Показана возможность эффективной регистрации коротких импульсов излучения относительно низкочастотных фоторезисторов. При этом ФПУ на основе ФР из КРТ с типовыми характеристиками может обеспечивать $P_{пор} \sim 10^{-8} - 10^{-10}$ Вт для $T_{имп} = 20 - 50$ нс на длине волны 10,6 мкм.

2. Определены основные требования к коэффициенту передачи и шумовым параметрам ФПУ, обеспечивающего оптимальное выделение сигнала для рассматриваемой задачи.

3. Показано, что наиболее предпочтительными для регистрации импульсных сигналов являются фоторезисторы на основе КРТ, изготовленные по технологии с "теневыми" контактами.

Л и т е р а т у р а

1. Тришенков М. А. Фотоприемные устройства и ПЭС. Обнаружение слабых оптических сигналов. — М.: Радио и связь, 1992.
2. Лукьянчикова Н. Б. Флуктуационные явления в полупроводниках и полупроводниковых приборах. — М.: Радио и связь, 1990.
3. Smith D. L. // J. Appl. Phys. 1983. V. 54. № 9. P. 5441—5448.
4. Другова А. А., Холоднов В. А., Филатов А. В. Оптимизация геометрической структуры фоторезисторов на основе КРТ при неоднородном освещении в температурном диапазоне 20—100 К/VOT. Сер. 11. 1998. Вып. 2 (133)—3(134). С. 33—37.

USING OF $Cd_xHg_{1-x}Te$ BASED PHOTOCONDUCTORS FOR PULSE CO_2 -LASER RADIATION DETECTION

L. I. Gorelik, N. V. Kravchenko, K. M. Kulikov, Yu. S. Troshkin
The State Unitary Enterprise "RD&P-Centre "Orion", Moscow, Russia

Possibility of relatively low frequency MCT based n-type photoconductor using for detection of CO_2 -laser pulses with duration up to 10 ns is considered. Amplitude-frequency characteristics of quasy-optimal filter are calculated.