

УДК 621.383

Регистрация коротких световых импульсов фотоприемными устройствами на основе фоторезисторов с большой инерционностью

С. В. Бушман, Л. И. Горелик, Н. В. Кравченко, К. М. Куликов, А. К. Петров
ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Рассмотрена возможность применения фотоприемников на основе фоторезисторов из PbS и PbSe для регистрации импульсного излучения длительностью до 10 нс. Получены выражения для порогового потока таких фотоприемников. Проведены оценки порогового потока для типичных значений фотоэлектрических характеристик и различной длительности световых импульсов. Рассчитаны частотные характеристики квазиоптимальных фильтров, максимизирующие отношение сигнал—шум.

В работе [1] рассматривалась возможность использования низкочастотных и низкоомных фоторезисторов на основе КРТ для регистрации импульсов излучения CO₂-лазера длительностью до 10 нс. Цель настоящей работы — возможность применения низкочастотных и высокоомных фоторезисторов (ФР) на основе халькогенидов свинца в оптико-электронных активных системах. Как и в работе [1], критерием оптимального приема излучения является максимизация отношения сигнал—шум.

Рассмотрим эквивалентную схему включения фоторезистора (рис. 1).

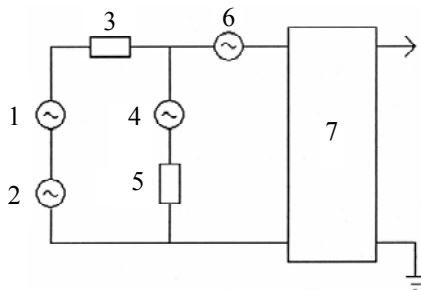


Рис. 1. Эквивалентная схема включения фоторезистора:

1 — источник шума ФР $N(\omega)$; 2 — источник сигнала;
3 — темновое сопротивление R_{dark} ; 4 — тепловая ЭДС $4kTR_{load}$; 5 — сопротивление нагрузки R_{load} ; 6 — приведенная спектральная плотность шумовой ЭДС предварительного усилителя (ПУ) $e^2_{noise am}$; 7 — ПУ

Будем считать, что оптимальное согласование фоторезистора с усилителем происходит на средних частотах, когда влияние суммарной емкости фотоприемника и предварительного усилителя можно не учитывать. Для высокоомных фоторезисторов темновое сопротивление R_{dark} больше сопротивления нагрузки R_{load} и входного сопротивления усилителя R_{in} . В данном случае коэффициент преобразования входной цепи предварительного усилителя не зависит от частоты и равен $K_{in} = \frac{R_{load} R_{in}}{R_{load} + R_{in}}$. Как правило, паспортное значе-

ние вольтовой чувствительности S_{pass} и собственного шума фоторезистора дается для случая $R_{dark} = R_{load}$, поэтому для расчета принимаем

$$S_{io} = 2S_{pass} \frac{R_{load}}{R_{load} + R_{dark}}$$

Здесь с учетом изложенного в [1] частотная зависимость сигнала на входе предварительного усилителя принимает вид

$$U_{sig}(\omega) = \frac{P_{\lambda}(\omega) S_{io}(\omega) R_{load}}{R_{dark} + R_{load}} = \frac{P_{\lambda}(\omega) S_{io} R_{load}}{(R_{dark} + R_{load})(1 + j\omega\tau)}$$

где $P_{\lambda}(\omega)$ — монохроматический поток входного излучения;

τ — постоянная времени фоторезистора.

Спектральную плотность собственных шумов фоторезисторов можно представить в виде

$$N(\omega) = \frac{\overline{U_0^2}(\omega_0)\omega_0}{|\omega|} + \frac{\overline{U_{gen}^2}}{1 + \omega^2\tau^2} + 4kTR_{dark}$$

Рассмотрим два крайних случая:

$$N(\omega) = \frac{\overline{U_0^2}(\omega_0)\omega_0}{|\omega|} + 4kTR_{dark} \quad (\text{где } \omega = 2\pi/f) —$$

для фоторезистора с преобладающим шумом типа $1/f$;

$$N(\omega) = \frac{\overline{U_{gen}^2}}{1 + \omega^2\tau^2} + 4kTR_{dark} —$$

для фоторезистора с преобладающим генерационно-рекомбинационным (Г-Р) шумом.

Для косинус-квадратного импульса длительностью T_{im}

$$P_{\lambda}(t) = \begin{cases} P_0 \cos^2\left(\frac{\pi t}{T_{im}}\right) & \text{при } |t| < \frac{T_{im}}{2}, \\ 0 & \text{при } |t| > \frac{T_{im}}{2} \end{cases}$$

общее выражение для порогового потока при регистрации фотоприемным устройством (ФПУ) в первом случае равно

$$P_{\lambda} = B \times \frac{\sqrt{\beta^2 + \delta^2}}{\sqrt{\left\{ \ln(1 + \delta^2/16) + \frac{2\beta}{\delta} \arctan(\delta/4) - 2 \ln(1 + \beta/4) \right\}}}, \quad (1)$$

где $B = \frac{\sqrt{U_0^2(f_0)} \sqrt{f_0}}{S_{im0}}$, $\beta = \frac{2e_{noise}^2}{T_{im} U_0^2(f_0) f_0}$, $\delta = \frac{2\tau}{T_{im}}$,

$\sqrt{U_0^2(f_0)}$ — среднее значение шума на частоте f_0 , взятое из экспериментальных данных.

При выводе этой формулы учтено, что при рассматриваемых длительностях сигналов и частотном интервале выполняется соотношение

$$\frac{\omega T_{im}}{2} \ll 1.$$

Рассчитанная по формуле (1) зависимость порогового потока ФПУ с шумами типа $1/f$ от длительности принимаемого светового импульса приведена на рис. 2.

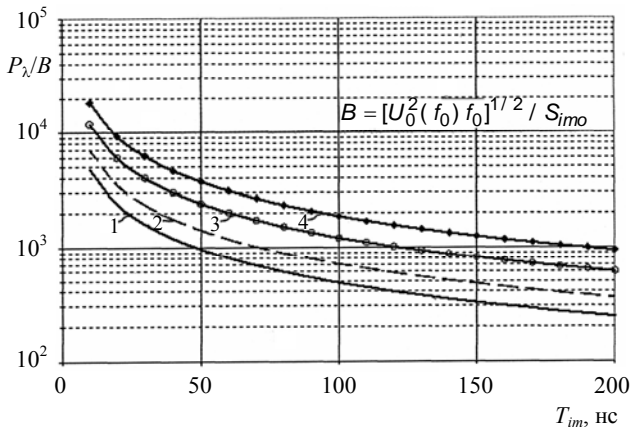


Рис. 2. Расчетная зависимость импульсной пороговой чувствительности ФПУ от длительности входного сигнала с учетом шумов типа $1/f$:

1 — $\tau = 10^{-5}$ с; 2 — $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$ с; 3 — $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$ с; 4 — $\tau = 10^{-4}$ с

Для порогового потока ФПУ с фоторезистором, у которого преобладает генерационно-рекомбинационный шум, можно получить следующее выражение:

$$P_{\lambda} = \frac{C}{\sqrt{\frac{T_{im}^2}{2\tau_{noise}} \arctan\left(\frac{\tau_{noise}}{2T_{im}}\right)}}, \quad (2)$$

где $C = \frac{\sqrt{U_{gen}^2 + e_{noise\Sigma}^2}}{S_{im0}}$ и введено обозначение

$$\tau_{noise} = \tau \sqrt{\frac{e_{noise\Sigma}^2}{U_{gen}^2 + e_{noise\Sigma}^2}}.$$

Значение $\sqrt{U_{gen}^2}$ также бралось из результатов измерения спектра шума.

В этом случае при выводе формулы для порогового потока также учтено, что $\frac{\omega T_{im}}{2} \ll 1$.

Рассчитанная по формуле (2) зависимость порогового потока приведена на рис. 3.

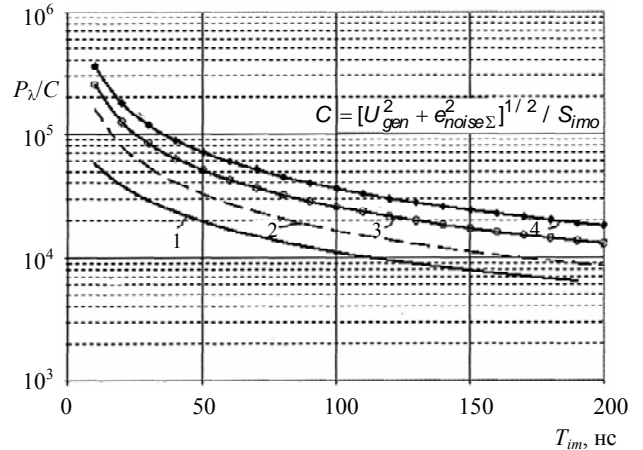


Рис. 3. Расчетная зависимость импульсной пороговой чувствительности ФПУ с преобладанием Г-Р-шума от длительности входного сигнала:

1 — $\tau = 10^{-5}$ с; 2 — $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$ с;
3 — $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$ с; 4 — $\tau_{noise} = 10^{-4}$ с

При выводе выражения для квазиоптимального фильтра ФПУ учитывались положения, изложенные в [2].

Передаточная характеристика оптимального фильтра представлена следующим соотношением:

$$K_{opt}(\omega) = \frac{\overline{P_{\lambda}^*}(\omega) S_{im0} e^{-j\omega t_0}}{N(\omega)} K^*(\omega)_{tr},$$

где $\overline{P_{\lambda}^*}(\omega)$ — сопряженное значение спектра сигнала на входе фотоприемника;

$N(\omega)$ — спектр шума на выходе фотоприемника;

$K^*(\omega)_{tr}$ — сопряженная передаточная функция приемника излучения;

t_0 — запаздывание сигнала в фильтре.

Спектральную плотность суммарного шума на входе предварительного усилителя можно представить в виде

$$N(\omega) = \frac{\overline{U_0^2}(\omega_0) \omega_0}{|\omega|} + 4kTR_{dark} + 4kTR_{noise} + \overline{e_{noise.am}^2} = \frac{\overline{U_0^2}(\omega_0) \omega_0 + e_{noise\Sigma}^2 \omega}{|\omega|} =$$

$$= \frac{\left(\overline{U_0^2}(\omega_0) \omega_0 \right) \left(1 + \frac{\overline{e_{noise}^2 \Sigma}}{\overline{U_0^2}(\omega_0) \omega_0} \right)}{\omega}$$

для случая преобладания шумов типа 1/f;

$$N(\omega)_{gen} = \frac{\overline{U_{gen}^2} + \overline{e_{noise}^2 \Sigma} (1 + \omega^2 \tau^2)}{1 + \omega^2 \tau^2} =$$

$$= \frac{\left(\overline{U_{gen}^2} + \overline{e_{noise}^2 \Sigma} \right) \left(1 + \frac{\overline{e_{noise}^2 \Sigma}}{\overline{U_{gen}^2} + \overline{e_{noise}^2 \Sigma}} \omega^2 \tau^2 \right)}{1 + \omega^2 \tau^2} =$$

$$= \frac{\left(\overline{U_{gen}^2} + \overline{e_{noise}^2 \Sigma} \right) (1 + \omega^2 \tau_{noise}^2)}{1 + \omega^2 \tau^2}$$

для случая преобладания Г-Р-шумов.

С учетом вида спектра косинус квадратного импульса принимаемого излучения

$$P_\lambda(\omega) = \frac{P_0 T_{im}}{2} \frac{\sin\left(\frac{\omega T_{im}}{2}\right)}{\left(\frac{\omega T_{im}}{2}\right)} \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{\omega T_{im}}{2\pi}\right)^2\right]}$$

можно получить следующие выражения для квазиоптимальных фильтров:

$$|K_{opt}(\omega)| = \frac{x}{(1 + Ax)\sqrt{1 + x^2}},$$

где $x = \omega\tau$, $A = \frac{\overline{e_{noise}^2 \Sigma}}{2\pi\tau\overline{U_0^2}(f_0)f_0}$ — для ФПУ, ограниченного шумами 1/f;

$$|K_{opt}(\omega)| = \frac{\sqrt{1 + x^2}}{1 + x^2 k^2},$$

где $x = \omega\tau$, $k = \sqrt{\frac{\overline{e_{noise}^2 \Sigma}}{\overline{U_{gen}^2} + \overline{e_{noise}^2 \Sigma}}}$ — для ФПУ, ограниченного Г-Р-шумами.

При выводе этих формул считалось, что $\frac{\omega T_{im}}{2} \ll 1$.

Расчетные зависимости амплитудно-частотных характеристик данных фильтров приведены, соответственно, на рис. 4, а и б.

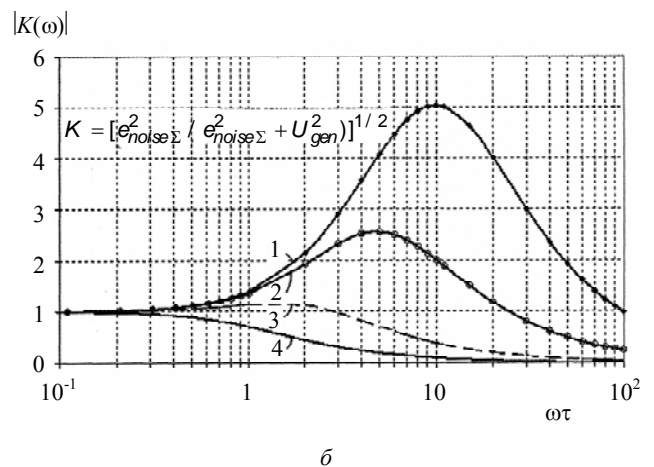
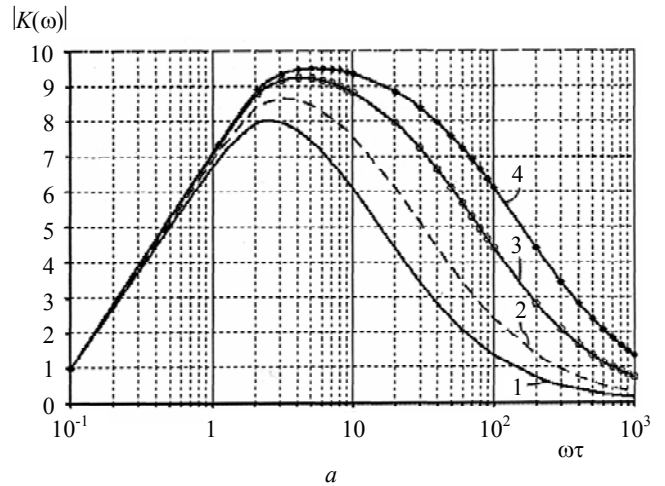


Рис. 4. Расчетная амплитудно-частотная характеристика квазиоптимального фильтра для шумов типа 1/f (а):
1 — $\tau = 10^{-5}$; 2 — $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$; 3 — $\tau = 5 \cdot 10^{-5}$; 4 — $\tau = 10^{-4}$;
для Г-Р-шумов (б):
1 — $K = 0,1$; 2 — $K = 0,2$; 3 — $K = 0,5$; 4 — $K = 1$

Практическая реализация таких оптимальных фильтров может быть осуществлена с помощью использования традиционных, достаточно подробно описанных в литературе RC-цепей. Зависимости, приведенные на рис. 4, а, б), могут представлять практический интерес для выбора конкретных значений номиналов R и C в таких цепях.

Л и т е р а т у р а

1. Горелик Л. И., Кравченко Н. В., Куликов К. М., Трошкин Ю. С. Применение фоторезисторов на основе Cd₃Hg_{1-x}Te//Прикладная физика, 1999. № 3.
2. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. — М.: Сов. радио, 1967.

Статья поступила в редакцию 15 марта 2007 г.

Detection of short light pulses by long inertance PbS and PbSe photodetectors

S. V. Bushman, L. I. Gorelik, N. V. Kravchenko, K. M. Kulikov, A. K. Petrov
Orion Research-and-Production Association, Moscow, Russia

Opportunities of application PbS and PbSe p-s for pulse radiation detection with pulses duration to 10 ns are considered. Expression for threshold stream of such detectors are obtained. Threshold stream estimation for typical values photo electrical characteristics and different light pulses duration are carried out. Frequency characteristics of the quasioptimal filters providing a maximum signal-to-noise ratio are calculated.

УДК 621.383

Методы переноса отдельных блоков монокристаллов $Cd_xHg_{1-x}Te$ и $InSb$ использованием клеев

Л. М. Хитрова

ФГУП «НПО "Орион"» — Государственный научный центр РФ, Москва, Россия

Для повышения процента выхода годных фоточувствительных элементов из исходных монокристаллических пластин KPT и $InSb$ предложено производить переклейку монокристалла с промежуточной технологической подложки на стационарную несущую подложку. Был создан специальный термопластичный анаэробный клей типа "Циакрин", поглощающий короткоимпульсное CO_2 -лазерное излучение.

Традиционная технология изготовления фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на основе монокристаллических пластин $Cd_xHg_{1-x}Te$ и $InSb$ состоит из приклейки пластины на несущую подложку стационарным криостойким терморезистивным клеем (марки ХСКД), химико-механического утоньшения пластины до рабочей толщины (10 мкм), разделения полупроводникового материала с помощью фотолитографии на отдельные блоки, на каждом из которых формируют топологию ФЧЭ, после чего, разрезая общую подложку по границам выделенных из полупроводникового материала блоков, получают самостоятельные ФЧЭ.

Основной недостаток данной технологии — большой расход дорогостоящего полупроводникового материала, это связано с тем, что изначально полупроводниковая пластина не является плоскопараллельной (имеет "чечевицеобразную" форму). При приклейке такой пластины на несущую подложку стационарным клеем между подложкой и полупроводниковой пластиной оказывается слой клея разной толщины: от самого тонкого в центре до относительно толстого на периферии пластины. Это приводит впоследствии к неодинаковому тепловому обмену (сопротивлению) между подложкой и полупроводниковой пластиной, а также к

получению блоков с разной толщиной полупроводникового материала. В результате ФЧЭ, сформированные на периферийных блоках, зачастую подлежат отбраковке из-за невозможности обеспечить на них заданные параметры.

Для увеличения процента выхода годных ФЧЭ за счет повышения коэффициента использования монокристалла было предложено производить его переклейку с промежуточной технологической подложки на стационарную несущую.

Из неофициальных источников удалось получить информацию, что за рубежом проводятся такие работы с применением лазерной или плазменной технологии.

Следуя этому пути, в 90-е годы нами была проведена работа по переносу ("отстрелу") промежуточных структур с использованием лазера. Вначале была сформирована структура "монокристалл—лак—фольга—поглощающий лазерное излучение клей—прозрачная для лазерного излучения подложка". Затем проведены химико-механическое утоньшение монокристалла и выделение отдельных блоков путем разделения структуры (резки). Непосредственно перед монокристаллом устанавливают предварительно покрытую стационарным полимерным клеем (марки ФХ-5) несущую подложку, а со стороны технологической подложки

