

УДК 621.384.3

Исследования характеристик фоторезисторов из $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ при сильных засветках

Л. И. Горелик, К. М. Куликов, А. А. Уткин

В работе исследованы характеристики КРТ-фоторезисторов при сильных фоновых засветках.

PACS: 85.60.-q

Ключевые слова: фоторезистор, фотоприемник, фоновая засветка, фоточувствительность.

Введение

Вопрос устойчивости модулей фотоприемников на основе КРТ к фоновой засветке тесно связан с динамическим диапазоном фоточувствительного элемента (ФЧЭ). При исследовании динамического диапазона фоторезистора или его энергетической характеристики необходимо учитывать не только влияние оптической засветки на свойства полупроводникового материала, но и зависимость линейности энергетической характеристики от размеров ФЧЭ и способа его питания [1].

Под энергетической характеристикой фотоприемника понимают зависимость сигнала фотоответа (в виде напряжения или тока) от мощности оптического излучения, т. е. $U_C = f(P_C)$ или $I_C = f(P_C)$. Если величина сигнала фотоответа измеряется в вольтах, то коэффициент пропорциональности между U_C и P_C называется вольтовой чувствительностью (S_U), если в амперах — токовой чувствительностью (S_I). Для фоторезисторов обычно применяется вольтовая чувствительность, поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать только ее. Очевидно, что линейность энергетической характеристики и динамический диапазон фоторезистора определяются постоянством его вольтовой чувствительности.

В данной работе теоретически и экспериментально исследованы характеристики КРТ-фоторезисторов при сильных фоновых засветках.

Теоретический анализ

Монохроматическую вольтовую чувствительность фоторезистора можно записать в виде:

Горелик Леонид Иосифович, главный специалист.
Куликов Константин Михайлович, ведущий научный сотрудник.

Уткин Александр Александрович, инженер.
ФГУП «НПО "Орион"».
Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/2.
Тел. (499) 373-55-70. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 16 июля 2010 г.

© Горелик Л. И., Куликов К. М., Уткин А. А., 2011

$$S_U = \frac{U_{bs}(b+1)\eta}{hv(p_0 + bn_0)V} |Q(\omega)|, \quad (1)$$

где U_{bs} — постоянное напряжение смещения на фоторезисторе;

η — квантовая эффективность,
 $\eta = \frac{(1-R)[1 - \exp(-\alpha d)]}{1 - R \cdot \exp(-\alpha d)}$, [2];

R — коэффициент отражения;

α — коэффициент поглощения оптического излучения;

$b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$ — отношение подвижностей основных и неосновных носителей;

V — объем ФЧЭ;

n_0 и p_0 — равновесная концентрация основных и неосновных носителей;

l — длина образца;

d — толщина образца.

При работе на частотах модуляции оптического излучения $\omega \ll 1/\tau$, где τ — постоянная времени фоторезистора, $Q(\omega)$ имеет вид [3]:

$$Q(\omega) = \tau \left[1 + \frac{(\alpha_2 - \alpha_1) \text{sh} \left(\alpha_1 \frac{l}{2} \right) \text{sh} \left(\alpha_2 \frac{l}{2} \right)}{\alpha_1 \alpha_2 \frac{l}{2} \text{sh} \left[(l_1 - l_2) \frac{l}{2} \right]} \right],$$

причем здесь использованы обозначения:

$$\alpha_{1,2} = \frac{\mu E}{2D} \pm \left[\left(\frac{\mu E}{2D} \right)^2 - \frac{1}{D\tau} \right]^{1/2};$$

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{2S}{d};$$

τ_0 — объемное время жизни носителей;

S — скорость поверхностной рекомбинации;

E — напряженность электрического поля в ФЧЭ;

$$\mu = \frac{(n_0 - p_0)\mu_n\mu_p}{(n_0 + \Delta n)\mu_n + (p_0 + \Delta p_0)\mu_p} \quad \text{— биполярная}$$

дрейфовая подвижность;

D — биполярный коэффициент диффузии, равный для материала n -типа ($n_0 \gg p_0$)

$$D = \frac{n_0 + 2\Delta n}{n_0 + \Delta n} D_p;$$

$\Delta n, \Delta p$ — неравновесные концентрации основных и неосновных носителей, генерированных фоном или сигналом ($\Delta n = \Delta p$).

При малом уровне фоновой засветки и при малом уровне оптического сигнала (т. е. при $n_0 \gg \gg \Delta n_0$) можно считать $\mu = \mu_p$ и $D = D_p$.

Для фоторезисторов на основе КРТ n -типа имеем: $n_0 \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; $p_0 \approx 5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$; $\mu_n \approx 2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\mu_p \approx 5 \cdot 10^5 \text{ см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; $\tau_0 \approx 1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$; $S_0 \approx 10^3 \text{ см/с}$; $d \approx 10 \text{ мкм}$.

С учетом влияния фоновой засветки выражение (1) можно представить в виде:

$$S_U = \frac{U_{bs}\eta}{h\nu V} \frac{1}{n_0 + N_{ph}} |Q(\omega)|,$$

где N_{ph} — концентрация носителей, генерированных фоном мощностью P_{ph} .

$$N_{ph} = \frac{\eta P_{ph}}{h\nu V} |Q(\omega)|,$$

$$S_U = \frac{U_{bs}\eta |Q(\omega)|}{h\nu n_0 V + \eta P_{ph} |Q(\omega)|}.$$

При $N_{ph} \gg n_0 V$ $S_U \rightarrow \frac{U_{bs}}{P_{ph}}$.

При электрических полях в ФЧЭ $E \leq 20 \text{ В/см}$ имеем $|Q(\omega)| \sim \tau$, и тогда величина сигнала выражается в виде:

$$U_c = \frac{U_{bs}\eta\tau P_c}{h\nu n_0 + \eta P_{ph}\tau}.$$

Видно, что два физических параметра (время жизни и квантовая эффективность) определяют значение фотоэлектрического ответа.

Известно, что поглощение фотонов является статистическим процессом. Пусть $\langle \Phi \rangle$ — среднее значение потока излучения через поверхность A фоточувствительного элемента. Тогда средний темп генерации неравновесных носителей можно представить в виде

$$\langle g_0 \rangle = \eta p \langle \Phi \rangle A = \eta \langle \Phi \rangle \alpha V,$$

где $p = \frac{\langle N \rangle}{N_0}$ — вероятность поглощения N фотонов из N_0 , падающих на кристалл;

V — объем кристалла.

Если монохроматическое излучение с постоянной средней мощностью $\langle P \rangle$ падает на кристалл, то средний темп генерации будет

$$\langle g_0 \rangle = \eta \langle P \rangle \frac{1}{h\nu}.$$

Здесь квантовая эффективность η определяет долю падающей мощности, которая затрачивается на процесс генерации свободных носителей.

Фотовозбужденные свободные носители в течение времени $\tau_{rel} \ll \tau$ приобретают термодинамически равновесные характеристики (энергию и импульс) и становятся, в среднем, неотличимы от тепловых носителей заряда.

Созданные в результате поглощения фотонов неравновесные носители заряда пребывают в свободном состоянии некоторое время, которое является их средним временем жизни:

$$\langle \tau \rangle = \int_0^{\infty} t p(\tau, t) dt,$$

где $p(\tau, t) = \tau^{-1} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$ — вероятность того, что неравновесный носитель рекомбинирует за время t после рождения.

Экспериментально этот параметр неравновесных носителей может быть найден как интегральная характеристика неравновесного состояния

$$\tau = \frac{\int n(V) dV}{\int \alpha \Phi(V) dV} = \frac{\langle N \rangle}{\langle g_0 \rangle},$$

т. е. как отношение полного числа неравновесных носителей в кристалле к полному темпу их возбуждения.

В случае освещения кристалла монохроматическим излучением с мощностью P значение τ можно оценить следующим образом.

Пусть в некотором равновесном состоянии сопротивление кристалла R_0 . При освещении образца равномерным монохроматическим излучением мощности P его сопротивление стало R_1 . Тогда

$$\frac{R_0}{R_1} = \frac{n_0 + \Delta n}{n_0} = 1 + \frac{\Delta n}{n_0};$$

$$\Delta n = n_0 \left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right).$$

С другой стороны, имеем

$$\Delta n = \frac{\eta P \tau}{h\nu V}.$$

Считая известным значение равновесной концентрации свободных носителей и слабую зависимость подвижности от уровня засветки, получаем

$$\tau = \frac{h\nu V n_0}{\eta P} \left(\frac{R_0}{R_1} - 1 \right). \quad (2)$$

На рис. 1 кривая 1 представляет экспериментальную зависимость постоянной времени τ фоторезистора с размером приемной площадки 1×1 мм от величины падающей мощности P , а кривая 2 — расчетную зависимость $\tau(P)$, полученную по формуле (2).

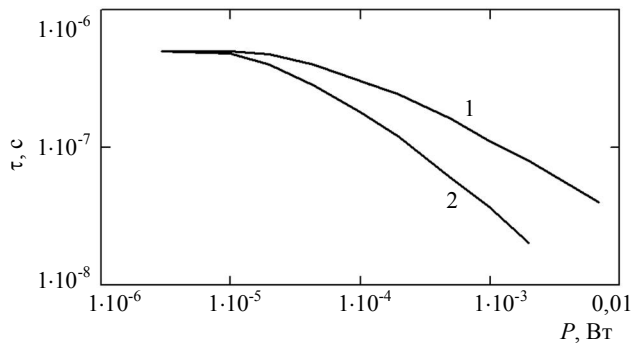


Рис. 1. Экспериментальная (кривая 1) и расчетная (кривая 2) зависимости постоянной времени фоторезистора τ от величины мощности засветки P

Экспериментальные исследования

Измерение постоянной времени проводилось по частотной зависимости генерационно-рекомбинационного шума (низкие уровни засветки) или по частотной зависимости сигнала (при сильных засветках). Источником фоновой засветки и оптического сигнала служил CO_2 -лазер, мощность которого измерялась прибором ИМО-2Н и ступенчато ослаблялась пластинами из CaF_2 . Модуляция лазерного излучения осуществлялась модулятором МЛ-8, который питался от звукового генератора типа ГЗ-112.

Экспериментально полученная зависимость $\tau(P)$ в широком диапазоне изменения оптической мощности хорошо аппроксимируется зависимо-

стью $\tau = \tau_0 \left[1 + \frac{P}{P_0} \right]^{-0,5}$, где τ_0 — постоянная времени для случая освещения ФЧЭ фоном с $T_{ph} \approx 300$ К,

P — мощность фоновой засветки на входе фотоприемника, P_0 — мощность фона, при которой τ_0 уменьшится на 3 дБ. Необходимо отметить, что мощность P_0 зависит от размеров ФЧЭ. Для ФЧЭ с $V = 10^{-5}$ см³ имеем $P_0 \approx 4 \cdot 10^{-5}$ Вт.

Сильное различие двух кривых на рис. 1 можно попытаться объяснить зависимостью коэффициента поглощения от мощности оптического излучения. При увеличении концентрации электронов нижняя часть зоны проводимости оказывается заполненной, поэтому электроны из валентной зоны могут переходить только на уровни, достаточно удаленные от дна зоны проводимости, и край полосы собственного поглощения смещается в коротковолновую сторону (эффект Бурштейна—Мосса).

Известно, что материал КРТ с n -типом проводимости при концентрации электронов $\approx 5 \cdot 10^{14}$ см⁻³ весьма близок к вырождению. Уже при концентрации свободных носителей $\approx 10^{15}$ см⁻³ квазиуровень Ферми попадает в зону проводимости. При этом только часть оптической мощности, падающей на ФЧЭ, идет на образование неравновесных носителей. Из проведенных экспериментальных результатов удается получить зависимость $\alpha = \frac{P_{abs}}{P_{inc}}$

от величин оптической мощности (рис. 2).

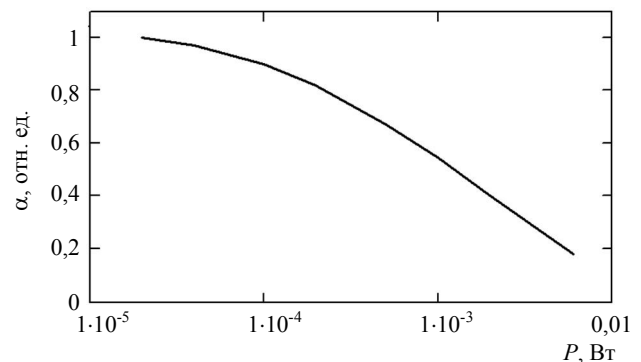


Рис. 2. Экспериментальная зависимость коэффициента

поглощения $\alpha = \frac{P_{abs}}{P_{inc}}$ от мощности оптического сигнала P

Полученные результаты позволяют рассчитать энергетическую характеристику фоторезистора с учетом зависимостей $\alpha(P)$ и $\tau(P)$ и сравнить ее с экспериментальной.

На рис. 3 приведены расчетные и экспериментальные энергетические характеристики для двух ФЧЭ разных размеров при разных уровнях фоновой засветки. Видно, что увеличение засветки уменьшает вольтовую чувствительность и одно-

временно увеличивает зону линейности, т. е. увеличивает динамический диапазон.

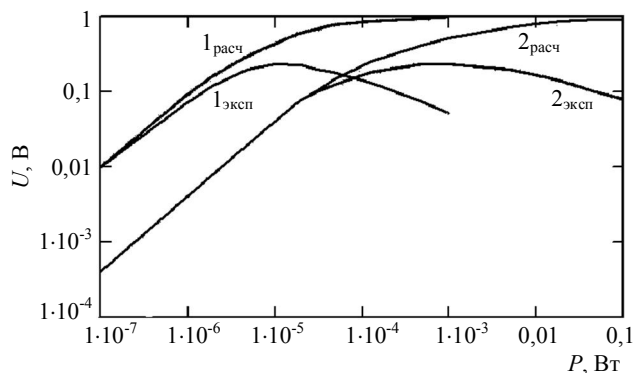


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости величины фотоответа U от падающей оптической мощности P для двух фоторезисторов:
 1 — площадь 150×150 мкм; 2 — площадь 1×1 мм

Заключение

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показывают, что для КРТ-фоторезисторов увеличение засветки уменьшает вольтовую чувствительность и одновременно увеличивает зону линейности, т. е. увеличивает динамический диапазон.

Литература

1. Горелик Л. И., Куликов К. М., Уткин А. А. Влияние фоновой засветки на динамический диапазон фотоприемников на основе фоторезисторов из $Cd_xHg_{1-x}Te$ // Тр. 51-й науч. конф. — Долгопрудный, 2008.
2. Сальков Е. А. Основы полупроводниковой фотоэлектроники. — Киев: Наукова думка, 1988.
3. Borrello S., Kinch M., D. la Mont. Photoconductive HgCdTe detector performance with background variations// Infrared Phys., 1977.

Investigation of the $Cd_xHg_{1-x}Te$ photoresistors at a strong background light

L. I. Gorelik, K. M. Kulikov, A. A. Utkin

Orion Research-and-Production Association, 46/2 Enthusiasts road, Moscow, 111123, Russia
 E-mail: orion@orion-ir.ru

Results of investigation of the $Cd_xHg_{1-x}Te$ photoresistors at a strong background light are represented in this report.

PACS: 85.60.-q

Keywords: photoresistor, photodetector, background light, photosensitivity.

Bibliography — 3 references.

Received July 16, 2010