

05; 06

© 1991 г.

О ПРЕОБРАЗОВАНИИ ТЕПЛОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОТЕРМОКАТОДОМ

В. П. Бегучев, А. М. Мечетин, Л. Н. Неустров, А. Н. Суханов

Рассмотрен вопрос об эффективности преобразования изображений слабонагретых объектов фототермокатодом. Выведены формулы для частотно-контрастной характеристики фототермокатада и минимального разрешаемого фототермокатодом температурного контраста. Выполнены численные оценки пространственного и температурного разрешения фототермокатада на основе GaAs. Сделан вывод, что фототермокатоды являются перспективными элементами для создания электронно-оптических преобразователей тепловых изображений.

Введение

Для регистрации собственного теплового излучения слабонагретых объектов в настоящее время используются пироэлектрические тепловизоры и тепловизоры на основе фотодиодных или фоторезисторных линеек и матриц. Альтернативным подходом к решению этой задачи являются разработка фотокатодов, чувствительных к тепловому излучению, и создание на основе таких фотокатодов электронно-оптических преобразователей. В настоящей работе рассматривается один из вариантов фотокатода для регистрации теплового излучения — фототермокатод. Фототермокатод представляет собой (рис. 1) тонкую пленку (основу) толщиной d_2 , на одну сторону которой нанесен катодный слой толщиной d_1 , эмиттирующий электроны в вакуум, а на другую — слой, поглощающий тепловое излучение (например, золотая чернь). Фототермокатод работает следующим образом. Эмиттируемый катодным слоем ток I зависит от его температуры T . Обычно эта зависимость имеет вид $I(T) \sim \exp(-E_A/kT)$, где E_A — некоторая энергия активации эмиссионного тока. Если на такой фототермокатод направить тепловое излучение, температура которого несколько превышает температуру катода, то из-за поглощения этого излучения в слое 3 температура катодного слоя увеличится на некоторую малую величину ΔT . Это вызовет увеличение эмиссионного тока на величину

$$\Delta I = I \frac{E_A \Delta T}{kT^2}. \quad (1)$$

Таким образом, фототермокатод функционирует по следующей схеме: вариация мощности ИК излучения → вариация температуры катодного слоя → вариация эмиссионного тока. Из формулы (1) видно, что чувствительность фототермокатада тем выше, чем больше темновой эмиссионный ток I и круче зависимость I от T .

Большая величина тока I может быть достигнута, если в качестве катодного слоя использовать холодный катод с отрицательным электронным сродством на основе прямосмещенного p - n -перехода. Зонная диаграмма холодного катода такого типа представлена на рис. 2. Величина тока, эмиттируемого холодным катодом, зависит от температуры катода по закону $I(T) \sim \exp \times \times [e(V - V_k)/kT]$, где V_k — контактная разность потенциалов p - n -перехода, V — внешнее смещение. Таким образом, для холодного катода $E_A = e(V_k - V)$. В последнее время разработаны стабильные холодные катоды с отрицательным электронным сродством на основе GaAs с плотностью тока $j \sim 0.1 - 1 \text{ A/cm}^2$ [1].

В настоящей работе выполнен расчет частотной характеристики и температурного разрешения фототермокаатода. Показано, что эти характеристики фототермокаатода не уступают аналогичным характеристикам лучших пировидиконов.

Частотно-контрастная характеристика

Инфракрасный сигнал вызывает увеличение температуры в каждой точке фототермокаатода на величину $\Delta T(x, y, z)$. Распределение ΔT по объему фототермокаатода описывается уравнением теплопроводности

$$c \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial r} \left(\kappa \frac{\partial \Delta T}{\partial r} \right) = 0, \quad (2)$$

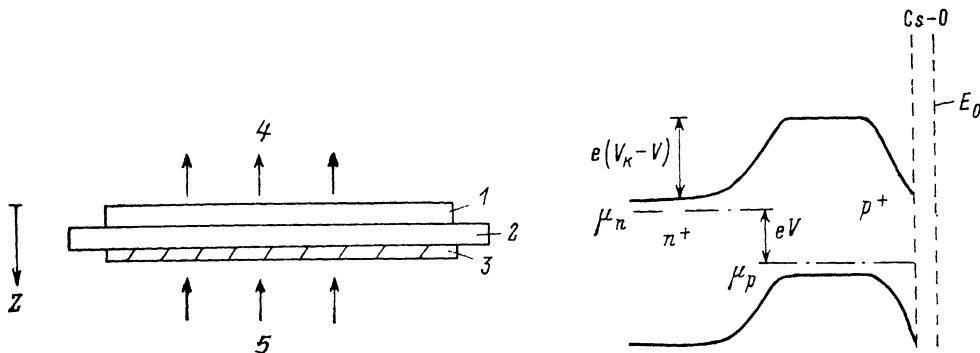


Рис. 1. Конструкция фототермокаатода.

1 — катодный слой, 2 — основа, 3 — поглощающий слой, 4 — электроны, 5 — сигнальное тепловое излучение.

Рис. 2. Зонная диаграмма холодного катода с отрицательным электронным средством на основе прямо смещенного p - n -перехода.

E_0 — уровень вакуума, μ_n и μ_p — электронный и дырочный квазиуровни Ферми.

где c — теплоемкость единицы объема, κ — коэффициент теплопроводности.

Граничными условиями к уравнению (2) являются

$$j_1(x, y) = -\kappa_1 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \Big|_{z=0} = -4\epsilon_1 \sigma T^3 \Delta T(x, y, 0),$$

$$j_3(x, y) = -\kappa_3 \frac{\partial \Delta T}{\partial z} \Big|_{z=d} = 4\epsilon_3 \sigma T^3 \Delta T(x, y, d) - \eta P(x, y, t), \quad (3)$$

где j_1 и j_3 — потоки тепла на эмиттирующей и поглощающей поверхностях; κ_1 , κ_3 и ϵ_1 , ϵ_3 — коэффициенты теплопроводности и излучательные способности соответствующих слоев; σ — постоянная Стефана—Больцмана; d — общая толщина структуры; $P(x, y, t)$ — плотность потока мощности сигнального излучения; η — эффективность поглощения сигнального излучения в слое 3.

Ось z направлена перпендикулярно слоям, и за начало отсчета выбрана эмиттирующая поверхность. Члены, пропорциональные ϵ_1 и ϵ_3 , в (3) представляют собой потоки тепла, отводимого от структуры за счет ее собственного теплового излучения. Температура ΔT выравнивается по толщине структуры за время $t \sim \sum_i d_i^2 c_i / \kappa_i$, где d_i , c_i и κ_i — толщина, теплоемкость и теплопроводность i -го слоя. Например, при $\kappa_i \sim 10^{-3}$ Вт·см $^{-1}$ ·К $^{-1}$, $c_i \sim 1$ Дж·см $^{-3}$ ·К $^{-1}$ и $d = 3$ мкм имеем $t < 10^{-4}$ с. Нас в дальнейшем будут интересовать процессы, происходящие за времена $t > 10^{-4}$ с. При рассмотрении этих процессов величину ΔT можно считать одинаковой на обеих поверхностях фототермокаатода. Тогда, интегрируя (2) по толщине структуры с учетом граничных условий (3), получим

$$\frac{\partial \Delta T}{\partial t} - D \left(\frac{\partial^2 \Delta T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Delta T}{\partial y^2} \right) + \frac{\Delta T}{\tau_R} = \frac{\eta P(x, y, t)}{d\bar{c}}, \quad (4)$$

где $D = \bar{\kappa}/\bar{c}$ — эффективный продольный коэффициент термодиффузии, $\bar{\kappa} = \sum_i \kappa_i d_i / c_i$, $\bar{c} = \sum_i c_i d_i / d$,

$$\tau_R = \frac{c d}{4(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) \sigma T^3} \quad (5)$$

— радиационное время релаксации температуры фототермокатада.

При измерении частотно-контрастной характеристики фотокатодов обычно используются линейчатые миры. Поэтому ниже рассмотрена ситуация, когда мощность фотосигнала гармонически модулирована в направлении оси x с пространственной частотой f_s и постоянно вдоль оси y . Кроме того, мощность фотосигнала считается гармонически модулированной во времени с частотой Ω

$$P(x, y, t) = \frac{P_0}{4} (1 + \cos 2\pi f_s x) (1 + \cos 2\pi \Omega t), \quad (6)$$

где P_0 — пространственно-временная амплитуда колебаний $P(x, y, t)$.

Решая уравнение (4) с источником (6), получим $\Delta T = \Delta T_{f_0} + \Delta T_{f_s}$, где

$$\Delta T_{f_0} = \frac{\eta P_0}{4d\bar{c}} (\tau_R + \tau_f \cos 2\pi f_s x), \quad (7)$$

$$\Delta T_{f_s} = \frac{\eta P_0}{4d\bar{c}} \left[\frac{\tau_R \cos(2\pi \Omega t - \varphi_1)}{\sqrt{1 + (2\pi \Omega \tau_R)^2}} + \frac{\tau_f \cos(2\pi f_s x) \cos(2\pi \Omega t - \varphi_2)}{\sqrt{1 + (2\pi \Omega \tau_f)^2}} \right], \quad (8)$$

$\tau_f^{-1} = [\tau_R^{-1} + (2\pi f_s)^2 D]$ — эффективное время релаксации пространственно неоднородной составляющей ΔT , $\varphi_1 = \arctg(2\pi \Omega \tau_R)$, $\varphi_2 = \arctg(2\pi \Omega \tau_f)$.

Оценим величины τ_R и τ_f . Пусть, например, катодный слой выполнен из GaAs и $d_1 = 1$ мкм, основа выполнена из SiO₂ и $d_2 = 1$ мкм, а поглощающий слой является золотой чернью и $d_3 = 300$ Å. Тогда при $T = 300$ К, $\varepsilon_3 = 1$ и $\varepsilon_1 = 0.5$ из (5) следует $\tau_R \sim 0.3$ с. Для той же структуры при частоте пространственной модуляции сигнала $f_s \geq 10$ см⁻¹ имеем $\tau_f \sim (2\pi f_s)^{-2} D^{-1} \equiv \tau_D \leq 10^{-3}$ с $\ll \tau_R$, где τ_D — время релаксации пространственно неоднородной составляющей температуры за счет термодиффузии. Таким образом, на практике для фототермокатодов всегда $\tau_f \sim \tau_D \ll \tau_R$. Частотно-контрастная характеристика температурного рельефа по определению равна $(T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min})$, где T_{\max} и T_{\min} — максимальная и минимальная температуры. Согласно (7), (8), при $f_s \geq 10$ см⁻¹ ЧКХ $\sim \tau_D / \tau_R < 10^{-2}$. Такой малый контраст без дополнительной обработки изображения глаз человека различить не может. Задача обработки изображения сводится к устранению немодулированной во времени составляющей эмиссионного тока. Эта задача может быть решена следующим образом. Эмиссионный ток с помощью люминесцентного экрана преобразуется в видимое излучение, которое затем пропускается через оптический фильтр, отсекающий стационарную составляющую излучения. Таким оптическим фильтром может служить, например, структура полупроводник—диэлектрик—жидкий кристалл [2]. В итоге через систему фототермокатод—оптический фильтр проходит только модулированная во времени составляющая источника (6). Соответствующий этой составляющей фотоэмиссионный ток, согласно (1), (8), равен

$$\Delta I(x, t) = \frac{\eta I P_0 E_A}{4d\bar{c}kT^2} \left[\frac{\tau_R \cos(2\pi \Omega t - \varphi_1)}{\sqrt{1 + (2\pi \Omega \tau_R)^2}} + \frac{\tau_f \cos(2\pi f_s x) \cos(2\pi \Omega t - \varphi_2)}{\sqrt{1 + (2\pi \Omega \tau_f)^2}} \right]. \quad (9)$$

Из (9) следует, что амплитуда временных колебаний фотоэмиссионного тока в точке x определяется формулой

$$\Delta I(x) = \frac{\eta I P_0 E_A}{4d\bar{c}kT^2} \left\{ \frac{\tau_R^2}{(1 + 2\pi \Omega \tau_R)^2} + \frac{\tau_f^2 \cos^2(2\pi f_s x)}{1 + (2\pi \Omega \tau_f)^2} + \frac{2\tau_R \tau_f [1 + (2\pi \Omega)^2 \tau_R \tau_f] \cos(2\pi f_s x)}{[1 + (2\pi \Omega \tau_R)^2][1 + (2\pi \Omega \tau_f)^2]} \right\}^{1/2}. \quad (10)$$

Частотно-контрастная характеристика фототермокатада, согласно (10), равна

$$ЧКХ = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{2\tau_D}{\tau_R}\right)^2 + (4\pi\Omega\tau_D)^2} - 1}{\sqrt{\left(1 + \frac{2\tau_D}{\tau_R}\right)^2 + (4\pi\Omega\tau_D)^2} + 1}. \quad (11)$$

При малых частотах временной модуляции сигнала $2\pi\Omega\tau_R \ll 1$ из (11) следует, что

$$ЧКХ = [1 + (2\pi f_s)^2 D\tau_R]^{-1} \quad (12)$$

и максимально разрешимая пространственная частота $f_{s, \max} \approx (4\pi^2 D\tau_R)^{-1/2}$. Если $\tau_R \approx 0.3$ с, $\bar{x} \approx 0.5$ Вт/см³·К и $\bar{c} \approx 1$ Дж/см³·К, то $f_{s, \max} \approx 0.15$ см⁻¹. Таким образом, при частотах модуляции сигнала $2\pi\Omega\tau_R < 1$ фототермокатод имеет очень плохое пространственное разрешение. Если же $2\pi\Omega\tau_R \gg 1$, то

$$ЧКХ \approx \begin{cases} 1 & \text{при } f_s^2 < (\Omega/2\pi D), \\ \frac{1}{(2\pi f_s)^2 D\tau_R} \left(1 + \frac{\Omega^2 \tau_R}{D f_s^2}\right) & \text{при } f_s^2 > (\Omega/2\pi D) \end{cases} \quad (13)$$

и максимально разрешимая пространственная частота $f_{s, \max} \approx \sqrt{\Omega/2\pi D}$. Таким образом, варьируя частоту модуляции сигнала Ω , можно управлять пространственным разрешением фототермокатада. Например, при $\bar{x} = 0.5$ Вт/см³·К, $\bar{c} = 1$ Дж/см³·К и $\Omega \approx 300$ Гц имеем $f_{s, \max} \approx 10$ см⁻¹.

Температурное разрешение

В электронно-оптических преобразователях изображения конечным элементом приемного устройства является человеческий глаз. Поэтому минимальный температурный контраст, который может быть обнаружен фототермокатодом, определяется из условия, что число сигнальных фотоэлектронов N_o , эмиттируемых с элемента поверхности катода площадью $(2f_{s, \max})^{-2}$ за время интегрирования сигнала глазом $t_{\text{ин}}$, равно числу шумовых электронов $N_{\text{ш}}$, эмиттируемых с той же площади за то же время. Поскольку процесс эмиссии электронов подчиняется пуассоновской статистике, то

$$N_{\text{ш}} = \frac{1}{2f_{s, \max}} \cdot \sqrt{\frac{j t_{\text{ин}}}{e}}, \quad (14)$$

где j — плотность эмиссионного тока в отсутствие сигнала, e — заряд электрона.

Если температура наблюдаемого объекта превышает температуру окружающей среды T_{ϕ} на величину ΔT_{o6} , то на элемент поверхности катода площадью $(2f_{s, \max})^{-2}$ падает сигнальное излучение мощностью

$$\Phi_o = \frac{\sigma T_{\phi}^3 \Delta T_{o6}}{4f_{s, \max}^2} \left(\frac{D}{F}\right)^2, \quad (15)$$

где D и F — диаметр и фокусное расстояние объектива.

Выше было показано, что для реализации удовлетворительного пространственного разрешения фототермокатада световой сигнал необходимо модулировать во времени с частотой $\Omega \gg (2\pi\tau_R)^{-1}$. В этом случае число сигнальных фотоэлектронов, эмиттируемых за время $t_{\text{ин}} \gg (2\pi\Omega)^{-1}$, равно

$$N_o = \frac{\eta j t_{\text{ин}} E_A \sigma T_{\phi}^3 \Delta T_{o6}}{16\pi e \Omega \bar{c} f_{s, \max}^2 \cdot k T^2} \left(\frac{D}{F}\right)^2. \quad (16)$$

Из полученного ранее соотношения $f_{s, \max} = \sqrt{\Omega/2\pi D}$ и формул (14), (16) следует, что при заданном пространственном разрешении $f_{s, \max}$ минимальная обнаруживаемая фототермокатодом температура ΔT_{o6} равна

$$\Delta T_{06}^{\min} = \frac{16\pi^2 f_s^3 \bar{\kappa} dk T^2}{\eta E_A \sigma T_\phi^3} \left(\frac{F}{D}\right)^2 \sqrt{\frac{e}{j t_{\text{ин}}}}. \quad (17)$$

Выполним численные оценки для случая $T = T_{\text{оф}}$. Плотность темнового эмиссионного тока холодного катода в диодном приближении равна $j = 0.25 e B v_T n \exp \times \times (-E_A/kT)$, где v_T — средняя тепловая скорость электронов в катодном слое; n — концентрация электронов в n -области катодного слоя; B — вероятность выхода в вакуум электронов, дошедших до эмиттирующей поверхности катодного слоя. Следовательно, $E_A = kT \ln(e B v_T n / 4j)$. Для катодов на основе GaAs $B \sim 0.1$. При $n = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $j = 10^{-3} \text{ А/см}^2$, $T = 300 \text{ К}$ имеем $E_A \approx 0.5 \text{ эВ}$. Рассмотрим фототермокатод, в котором основой является пленка SiO_2 толщиной $d_2 = 2 \text{ мкм}$, катодный слой имеет толщину $d_1 = 1 \text{ мкм}$ и выполнен из GaAs, а роль поглощающего слоя играет золотая чернь толщиной $d = 300 \text{ \AA}$, для которой эффективность поглощения $\eta \approx 1$. Теплопроводности монокристаллического GaAs и аморфного SiO_2 равны $\kappa_1 = 0.46 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$ и $\kappa_2 = 0.014 \text{ Вт/см}\cdot\text{К}$ [3]. Теплопроводностью поглощающего слоя ввиду его малой толщины можно пренебречь. Тогда $d\bar{\kappa} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт/К}$. Время интегрирования сигнала глазом $t_{\text{ин}} \approx 0.1 \text{ с}$ [4]. Если для оценок выбрать $F/D = 2$, то после подстановки в (17) приведенных выше значений параметров получим $\Delta T_{06}^{\min} = 4 \cdot 10^{-6} \cdot f_s^2 \bar{\kappa}_{\text{max}} \cdot j^{-1/2}$. Если $f_s \bar{\kappa}_{\text{max}} = 10 \text{ см}^{-1}$, что соответствует пространственному разрешению 1 пара линий/мм, и $j = 10^{-3} \text{ А/см}^2$, то $\Delta T_{06}^{\min} = 0.12 \text{ К}$. При пространственном разрешении 2 пары линий/мм и $j = 0.1 \text{ А/см}^2$ имеем $\Delta T_{06}^{\min} = 0.1 \text{ К}$.

Следует отметить, что в приведенных расчетах мы использовали значение теплопроводности κ_1 , соответствующее монокристаллическому GaAs. На практике слой GaAs, выращенный на SiO_2 , будет, скорее, всего поликристаллическим. Поликристаллы, как правило, имеют значительно более низкую теплопроводность, чем монокристаллы. Поэтому температурное разрешение фототермокатаода с поликристаллическим слоем GaAs должно быть лучше, чем рассчитанное выше.

Таким образом, из проведенных в работе расчетов следует, что пространственное и температурное разрешение фототермокатаода не уступает аналогичным характеристикам лучших пироэлектрических преобразователей.

Список литературы

- [1] Shin K. K., Blum J. M. // J. Electrochem. Soc. 1971. Vol. 117. N 2. P. 118—122.
- [2] Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987.
- [3] Зи С. Физика полупроводниковых приборов. Т. 2. М.: Мир, 1984.
- [4] Ллойд Д. Системы тепловидения. М.: Мир, 1978.

Поступило в Редакцию
12 сентября 1990 г.