

В.В. Жучков, С.В. Пузач, Ю.А. Поляков
(Академия ГПС МЧС России; e-mail: info@academygps.ru)

ДЕТЕКТИРУЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛЁНОЧНЫХ ТЕРМОСЕНСОРОВ ПОЖАРНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Проведён анализ детектирующей способности плёночных термосенсоров с целью раннего обнаружения аварийных ситуаций.

Ключевые слова: детектирующая способность, плёночный термосенсор.

V.V. Zhuchkov, S.V. Puzach, Yu.A. Polyakov
**THE DETECTION CAPACITY OF FILM TERMOSENSORS
OF FIRE THE PURPOSE**

Analysis the detection capacity of film termosensors for early detection of crash situation.

Key words: detection capacity, film termosensor.

С точки зрения эффективного применения термосенсоров в качестве быстродействующих тепlopеленгаторов режимов работы технологического оборудования, а также оперативных обнаружителей очагов воспламенения, фронта горения в каналах и пожаров-вспышек, необходимо оценить детектирующую способность подобного рода сигнализаторов как по минимально регистрируемой температуре **чувствительным элементом (ЧЭ)** термосенсора, так и по плотности теплового потока [1].

Термосенсор представляет собой диэлектрическую тепlopоглощающую матрицу, на поверхности которой смонтирован чувствительный элемент в виде тонкой плёнки, функционирующей в режиме термометра сопротивления.

Рассмотрим вопрос, связанный с детектирующей способностью плёночного термосенсора по минимально регистрируемой температуре. Известно, что пороговая чувствительность металлических термометров сопротивления определяется джонсоновскими шумами, среднеквадратичное электрическое напряжение которых на концах проводника с активным сопротивлением R выражается формулой Найквиста:

$$\bar{e}_t^2 = 4kTR \Delta f,$$

где k – постоянная Больцмана;

R – активное сопротивление плёнки;

Δf – интервал частот, для которой определяется шумовая электродвижущая сила (ЭДС);

T – температура.

По этой формуле можно определить величину шумового электрического напряжения, а, следовательно, и минимальный сигнал с плёночного датчика при соотношении сигнал/шум, равный 1 (это соотношение берём в виде примера).

Измерения с помощью микровольтметра В6-4 показали, что напряжение теплового шума меньше 10^{-7} В при колебаниях комнатной температуры. Детектирующая способность термосенсора по температуре при схеме регистрации с согласованным сопротивлением при условии $R_0 \gg R_{чз}$ определяется как:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = I_0 R_0 \alpha = j_0 \rho_s (b \ell) \frac{L}{b \ell} \alpha = j_0 \rho_s L \alpha,$$

где b, ℓ, L – соответственно ширина, толщина и длина ЧЭ;
 ρ_s – удельное электросопротивление плёнки;
 j_0 – плотность тока через плёнку;
 α – температурный коэффициент сопротивления.

Наименьшая температура Δt_{\min} , регистрируемая плёночным термосенсором, определяется напряжением шума ΔU_{\min} :

$$\Delta t_{\min} = \frac{\Delta U_{\min}}{j_0 \rho_s L \alpha} = \frac{\sqrt{\bar{e}_T^2}}{j_0 \rho_s L \alpha} = \frac{\sqrt{4kTR}}{j_0 \rho_s L \alpha} \sqrt{\Delta f}. \quad (1)$$

Легко показать, что

$$\Delta t_{\min} = \frac{K_1 \sqrt{\Delta f}}{j_0 \sqrt{\rho_s V} \alpha},$$

где V – объём плёнки;
 K_1 – комплекс, отражающий кинетическую энергию

$$K_1 = \sqrt{4kT}.$$

Чувствительность по плотности теплового потока (коэффициент преобразования) определяется для прямоугольного импульса облучения.

Из соотношения (1) и зависимости $q = \frac{\sqrt{\pi} \varepsilon_i \Delta t}{2\sqrt{\tau}}$ [2] имеем:

$$\frac{\Delta U}{q} = \frac{2j_0 \rho_s L \alpha \sqrt{\tau}}{\sqrt{\pi} \varepsilon_i},$$

то есть коэффициент преобразования зависит от времени. Этот, казалось бы, неожиданный результат, является очевидным для ЧЭ на массивной матрице (подложке), имитирующей полуограниченное тело.

Если принять $\tau = \frac{1}{2\pi \Delta f}$, то $\frac{\Delta U}{q} = \frac{\sqrt{2} j_0 \rho_s L \alpha}{\varepsilon_i \pi \sqrt{\Delta f}}, \frac{B}{Bm/cm^2}$.

Минимально обнаружимая плотность теплового потока, которую термосенсор способен различить на фоне шумов:

$$q_{\min} = \frac{\Delta U_{\min} \varepsilon_i \pi \sqrt{\Delta f}}{\sqrt{2} j_0 \rho_s L \alpha} = \frac{K_1 \varepsilon_i \pi \Delta f}{\sqrt{2} j_0 \sqrt{\rho_s} \alpha \sqrt{V}}, Bm/cm^2.$$

Видно, что минимальная плотность теплового потока обратно пропорциональна объёму плёнки в степени $\frac{1}{2}$ и прямо пропорциональна теплоусвоению материала матрицы (подложки).

Предельно малый тепловой поток, регистрируемый термосенсором, будет:

$$q_{\min}^* = q_{\min} S = \frac{K_1 \varepsilon_i \pi \Delta f}{\sqrt{2} j_0 \alpha \sqrt{\rho_s}} \sqrt{\frac{Lb}{\ell}}, \text{ Дж/с.}$$

Указанная величина зависит от отношения площади плёнки к её толщине. Минимальная энергия, фиксируемая термосенсором на фоне шумов, будет:

$$Q = q_{\min}^* \tau = \frac{K_1 \varepsilon_i \sqrt{Lb}}{2\sqrt{2} j_0 \alpha \sqrt{\rho_s} \sqrt{\ell}}, \text{ Дж.}$$

Следует отметить, что минимальная регистрируемая энергия не зависит от полосы частот, в силу чего существенно расширяются возможности модуляции сигнала.

Конкретно для термосенсора, у которого в качестве ЧЭ использована плёнка из платины, имеющая длину $L = 0,2 \text{ см}$, ширину $b = 0,05 \text{ см}$ и толщину $\ell = 6 \cdot 10^{-6} \text{ см}$, и подложка из стекла БД-1 (рис. 1), выпишем параметры для примерного расчёта:

$$j_0 = 15 \cdot 10^4, \text{ А/см}^2, \quad (I = 50 \text{ мА}), \quad (R = 50 \text{ Ом});$$

$$\rho_s = 75 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}; \quad \alpha = 2 \cdot 10^{-3}, \text{ 1/К};$$

$$\varepsilon_i = 1270 \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2 \text{ К с}^{\frac{1}{2}}}; \quad K_1 = 1,65 \cdot 10^{-10}, \text{ Дж}^{\frac{1}{2}}.$$

В результате имеем следующие соотношения для конкретных расчётов:

$$q_{\min} = 7,35 \cdot 10^{-8} \Delta f, \text{ Вт/см}^2; \quad q_{\min}^* = 7,35 \cdot 10^{-10}, \text{ Вт};$$

$$Q = 1,15 \cdot 10^{-10}, \text{ Дж.}$$

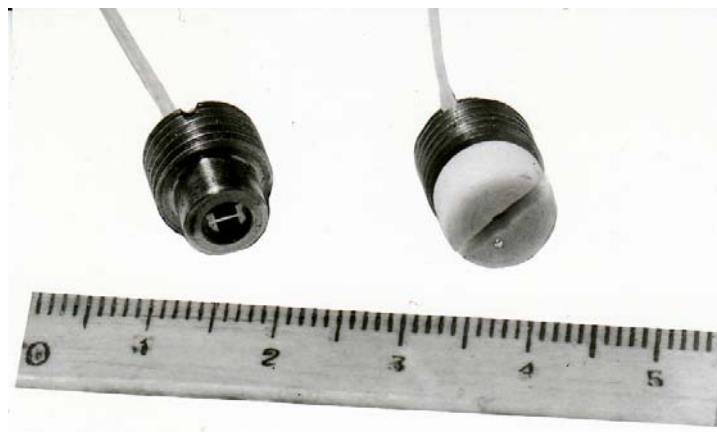


Рис. 1. Плёночный термосенсор

Анализ выведенных соотношений показывает, в каком направлении следует оптимизировать конструкцию и физические параметры термосенсора, чтобы добиться наилучшей чувствительности по энергетическим признакам.

Видно, что один из способов заключается в миниатюризации ЧЭ и повышении тока питания до определённого значения.

Оценим вольтваттную чувствительность термосенсора для тех же заданных физических параметров тонкоплёночного термосенсора.

$$\frac{\Delta U}{q} = 16 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}, \frac{B}{Bm / cm^2};$$

$$\frac{\Delta U}{q^*} = 16 \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}, B/Bm.$$

Принято, что по способности к обнаружению минимальных энергетических параметров логичнее всего пользоваться величинами, обратными этим характеристикам.

При отношении длины ЧЭ к его ширине менее 5, теоретическими и экспериментальными исследованиями показано, что обнаружительная способность обратно пропорциональна квадратному корню из площади ЧЭ теплового детектора, $D^\circ = \text{const} / S^{1/2}$.

Удельная обнаружительная способность тонкоплёночного термосенсора по q_{\min} будет:

$$D_q^\circ = \frac{S^{1/2} \cdot \sqrt{\Delta f}}{q_{\min}}.$$

По плотности теплового потока:

$$D_q^\circ = \frac{\sqrt{2} j_0 \alpha \sqrt{\rho_s} V}{\pi K_1 \varepsilon_i \sqrt{\ell} \sqrt{\Delta f}}, \frac{cm}{Bm / cm^2} \Gamma u^{-1/2};$$

По тепловому потоку:

$$D_q^\circ = \frac{\sqrt{2} j_0 \alpha \sqrt{\rho_s} \sqrt{\ell}}{\pi K_1 \varepsilon_i \sqrt{\Delta f}}, \frac{cm}{Bm} \Gamma u^{-1/2};$$

По энергии:

$$D_Q^\circ = \frac{2\sqrt{2} j_0 \alpha \sqrt{\rho_s} \sqrt{\ell} \sqrt{\Delta f}}{K_1 \varepsilon_i}, \frac{cm}{Дж} \Gamma u^{1/2}.$$

Для термосенсора с параметрами, указанными выше при плотности тока питания $j_0 = 15 \cdot 10^4$, A/cm^2 имеем:

$$D_q^\circ = 1,35 \cdot 10^6 \cdot \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}, \quad D_q^\circ = 1,35 \cdot 10^8 \frac{1}{\sqrt{\Delta f}}, \quad D_Q^\circ = 8,5 \cdot 10^8 \sqrt{\Delta f}.$$

Анализ показывает, что вследствие ограниченных возможностей по варьированию такими физическими и геометрическими параметрами, как коэффициент термического сопротивления α , удельное электросопротивление плёнки ρ_3 , длина L и толщина ℓ ЧЭ, наиболее реальными способами улучшения детектирующей способности термосенсора являются увеличение плотности тока питания ЧЭ j_0 (до определённого предела) и выбор материала подложки с наиболее низким значением коэффициента теплоусвоения ε_i [3].

Следует заметить, что при $\varepsilon_i \rightarrow \varepsilon_{i,\min}$ повышается быстродействие плёночного термосенсора при индикации температуры поверхности в быстропротекающем процессе [4].

При регистрации импульсного излучения обнаружительные характеристики термосенсора с поглощающим покрытием несколько изменяются. Однако, так как поглощающее покрытие из платиновой "черни" отражает около 2-4 % падающего светового потока в видимой и ближней части спектра, особого влияния на детектирующую способность термосенсора ожидать не приходится.

Можно сделать вывод, что плёночные термосенсоры на массивной матрице (подложке) обладают значительной детектирующей способностью при соответствующей оптимизации конструктивных и эксплуатационных параметров.

Литература

1. **Поляков Ю.А., Пузач С.В.** Использование плёночного датчика для аварийного отключения электрохимического генератора // Измерительная техника. 2000. № 7. С. 64-65.
2. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1966. 599 с.
3. **Поляков Ю.А., Аксютин А.С.** Малоинерционный пожарный извещатель на тонких плёнках // Противопожарная защита объектов народного хозяйства: Сборник научных трудов. М.: ВИПТШ МВД СССР, 1979. С. 122-128.
4. **Баутин А.В., Поляков Ю.А.** Система безопасности двигателей внутреннего сгорания на основе быстродействующего термопреобразователя // Труды 13-й научно-техн. конф. "Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления". М.: МГИЭМ. 2001. С. 148-149.

Статья опубликована 15 мая 2013 г.