

УДК 535.232

*И. И. КЛЮЧНИК, Л. М. КУЦЕНКО*

**ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ СВЧ**

---

Целый ряд отличительных свойств пироэлектрических преобразователей, из которых можно назвать неселективность тепловых приемников, быстродействие и большой интервал рабочих темпе-

ратур, способствуют их использованию в широком диапазоне частот для устройств различного назначения. Менее других изучено применение пиропреобразователей в СВЧ-диапазоне, хотя техника СВЧ — одна из областей, где впервые практически была показана высокая эффективность пироэлектриков как преобразователей тепловых потоков излучения [1].

Исследование пироэлектрических преобразователей СВЧ включает в себя электродинамический, тепловой и электрический этапы, отражающие основные ступени преобразования. На первой ступени определяется часть проходящей по тракту мощности СВЧ, поглощенной пироэлектрическим чувствительным элементом. На второй — решение уравнения теплопроводности позволяет найти распределение температуры в чувствительном элементе при передаче ему посредством диссипации электромагнитной энергии импульсного СВЧ-излучения определенного количества тепла. На третьей ступени по средней температуре пироэлектрического чувствительного элемента находятся параметры отклика пиропреобразователя с учетом характера нагрузочной цепи.

Задачи первого этапа, за исключением простейших случаев, связаны с трудностями математического характера и, как правило, решаются экспериментально при согласовании элементов с линией передачи. Динамические и частотные свойства пиропреобразователей в основном определяются на тепловой и электрической ступенях преобразования. А поскольку последний этап является общим для различных типов пиропреобразователей и поэтому наиболее изученным, исследование их основных характеристик (динамического диапазона, функции преобразования, выходных сигналов) прежде всего связано с нахождением температурного режима, отражающего особенности многочисленных конкретных применений и исполнений. Многообразие крайних условий и видов модуляции различного рода тепловых потоков излучения можно объяснить большое количество работ по тепловой теории пиропреобразователей [1]. Однако преобразователи СВЧ, отличительной чертой которых является возможность объемного поглощения излучения всеми слоями чувствительного элемента, недостаточно изучены, хотя использование их в этом диапазоне перспективно [2].

Как правило, основа любого типа пиропреобразователя — трехслойный чувствительный элемент, представляющий собой пластину пироэлектрика с электродами на плоскостях, перпендикулярных к оси поляризации. Размещение такого элемента в волноводе образует волноводно-диэлектрическую структуру, анализ которой позволяет выделить два предельных варианта конструкций, характеризующихся поглощением мощности СВЧ непосредственно пироэлектрическим элементом либо одним из его электродов, являющимся частью внутренней стенки волновода. В первом случае (сверхтонкие электроды) с учетом изложенного в работе [3] плотность мощности, рассеиваемой СВЧ-полем в пироэлектрике, для основного

типа волны прямоугольного волновода можно представить в виде

$$P = 2\varepsilon_0 \varepsilon Z_0 \omega \operatorname{tg} \delta P \lambda_B / \lambda_0 ab, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_0$  — диэлектрическая постоянная;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость материала пьезоэлектрика;  $Z_0$  — волновое сопротивление свободного пространства;  $\omega$  — круговая частота СВЧ-сигнала;  $\operatorname{tg} \delta$  — тангенс угла потерь пьезоэлектрика;  $P$  — падающая мощность;  $\lambda_B$ ,  $\lambda_0$  — длина волны в волноводе и в свободном пространстве;  $a$ ,  $b$  — размер широкой и узкой стенки поперечного сечения волновода.

Для второй конструкции, когда преобразователь расположен вне полости тракта и лишь один из его электродов является частью внутренней стенки волновода, например узкой, объемная плотность тепловых потерь в электроде в среднем за период колебаний СВЧ-поля при согласованной нагрузке находится как диссипативные потери, обусловленные конечной проводимостью материала электрода [4]

$$P_y = \frac{\alpha^2 P e^{-\alpha x} \lambda_0 \lambda_B}{\sigma ab Z_0 \lambda_{кр}^2} = P' \alpha^2 e^{-\alpha x}. \quad (2)$$

Здесь  $\alpha$  — коэффициент затухания излучения в веществе,  $\alpha = 2/\delta$ ;  $\delta$  — глубина скин-слоя;  $x$  — нормаль к поверхности поглощающего электрода;  $\sigma$  — удельная проводимость материала электрода;  $\lambda_{кр}$  — критическая длина волны волновода,  $\lambda_{кр} = 2a$ .

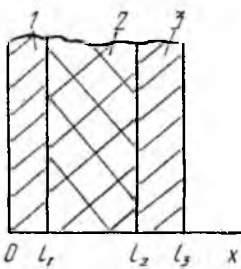


Рис. 1

Численная оценка мощности, поглощенной преобразователем, в каждом из случаев была проведена в соответствии с (1), (2) для используемых в устройствах СВЧ пьезоэлектриков и различных материалов электродов. Результаты этой оценки указывают на более высокую чувствительность преобразователей со сверхтонкими электродами, расположенных в полости волновода. Анализ теплового режима второй конструкции позволяет определить требования к геометрическим и теплофизическим параметрам каждого из слоев чувствительного элемента.

Указанные параметры можно найти из выражений для временного и пространственного распределений температуры, полученных при решении системы одномерных уравнений теплопроводности для трехслойного пьезоэлектрического элемента, толщина которого намного меньше остальных его геометрических размеров (рис. 1):

$$\frac{\partial \theta_i(x, t)}{\partial t} = \kappa_i \frac{\partial^2 \theta_i(x, t)}{\partial x^2} + \frac{F_i(x, t)}{c_i \rho_i}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (3)$$

$0 < x < l_1$ ,  $t > 0$  при  $i = 1$ ;  $l_1 < x < l_2$ ,  $t > 0$  при  $i = 2$ ;  $l_2 < x < l_3$ ,  $t > 0$  при  $i = 3$ . Решение осуществляется в предположении

однородных начальных условий, идеального теплового контакта между слоями и дополнительных граничных условий, отражающих наличие излучения на поверхности чувствительного элемента, находящегося в вакууме, что часто имеет место при эксплуатации волноводных трактов больших уровней мощности:

$$\theta_i(x, 0) = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad (4)$$

$$\theta_1(l_1, t) - \theta_2(l_1, t) = 0; \quad \theta_2(l_2, t) - \theta_3(l_2, t) = 0;$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_1(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l_1} &= \frac{K_2}{K_1} \frac{\partial \theta_2(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l_1}; \quad K_1 \frac{\partial \theta_1(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_1 \theta_1(0, t); \\ \frac{\partial \theta_2(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l_2} &= \frac{K_3}{K_2} \frac{\partial \theta_3(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l_2}; \quad -K_3 \frac{\partial \theta_3(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=l_3} = h_3 \theta_3(l_3, t). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь  $\theta_i(x, t)$  — прирост температуры в  $i$ -м слое чувствительного элемента  $\theta_i(x, t) = T_i(x, t) - T_0$ ;  $T_0$  — температура окружающей среды;  $i$  — индекс, указывающий на принадлежность параметра к соответствующему слою;  $\kappa_i$  — температуропроводность;  $K_i$  — теплопроводность;  $c_i$  — удельная теплоемкость;  $\rho_i$  — плотность;  $h_i = 4\xi_i GT_0$ ;  $\xi_i$  — испускательная способность поверхностей элемента;  $G$  — постоянная Стефана-Больцмана;  $F_i(x, t)$  — функция, характеризующая мощность внутренних источников тепла  $i$ -го слоя пироэлемента.

Учитывая, что в радиотехнических системах СВЧ наиболее широко применяется импульсная передача мощности с прямоугольной формой посылок

$$P = \begin{cases} P_0, & 0 \leq t \leq \tau_n; \\ 0, & \tau_n < t < T, \end{cases}$$

где  $\tau_n$ ,  $T$  — длительность и период следования импульсов излучения, для случая  $T \gg \tau_n$  решение уравнения (3) при условиях (4), (5) можно найти с использованием преобразования Лапласа и теоремы смещения:

$$\theta_i(x, t) = \theta'_i(x, t) - \theta'_i(x, t - \tau_n), \quad i = 1, 2, 3.$$

Здесь

$$\theta'_i(x, t - \tau_n) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq \tau_n; \\ \theta'_i(x, t'), & t' = t - \tau_n > 0; \end{cases}$$

$\theta'_i(x, t)$  определены для каждого слоя через составляющие клеточной функции Грина, приведенные в работе [5]. Используя обозначения этой же работы, запишем выражение для распределения температуры во втором слое (пирообразце), представляющем наибольший интерес. При этом предполагаем, что поглощение мощности чувствительным элементом происходит лишь в результате рассеяния СВЧ-поля в его электроде, который является частью внутренней стенки волновода:

$$F_1(x, t) = P_y; \quad F_2(x, t) = F_3(x, t) = 0;$$

$$\theta_2'(x, t) = \frac{2l_3^2 \alpha^2 P'}{K_1} \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1 - e^{-\frac{a_n^2 x_1 t}{l_3^2}}}{(\alpha^2 l_3^2 + a_n^2) a_n B} \right) A \times$$

$$\times \left\{ \beta_1 + \alpha l_3 \left[ \left( a_n - \frac{\alpha \beta_1 l_3}{a_n} \right) \sin v_1 - (\beta_1 + \alpha l_3) \cos v_1 \right] e^{-\alpha l_1} \right\}; \quad (6)$$

$$A = \Omega_1 \cos a_n m_1 \frac{l_2 - x}{l_3} - m_3 \frac{K_3}{K_2} \Omega_2 \sin a_n m_1 \frac{l_2 - x}{l_3};$$

$$B = \omega_1 \sin v_1 + \frac{K_2}{K_1} m_1 \omega_2 \cos v_1 + \frac{l_1}{l_3} \left( \omega_1 \psi_2 - m_1 \frac{K_2}{K_1} \omega_2 \psi_1 \right) +$$

$$+ m_1 \frac{l_2 - l_1}{l_3} \left( m_1 \frac{K_2}{K_1} \omega_1 \psi_2 - \omega_2 \psi_1 \right) - m_2 \frac{l_3 - l_2}{l_3} \left( m_3 \frac{K_3}{K_2} \Omega_1 \varphi_2 + \Omega_2 \varphi_1 \right) +$$

$$+ m_2 \varphi_1 \cos v_3 - m_2 m_3 \frac{K_3}{K_2} \varphi_2 \sin v_3;$$

$$\psi_1 = a_n \sin v_1 - \beta_1 \cos v_1; \quad \psi_2 = a_n \cos v_1 + \beta_1 \sin v_1;$$

$$\varphi_1 = \psi_1 \cos v_2 + m_1 K_2 K_1^{-1} \psi_2 \sin v_2;$$

$$\varphi_2 = \psi_1 \sin v_2 - m_1 K_2 K_1^{-1} \psi_2 \cos v_2;$$

$$\Omega_1 = m_2 a_n \cos v_3 + \beta_3 \sin v_3; \quad \Omega_2 = m_2 a_n \sin v_3 - \beta_3 \cos v_3;$$

$$\omega_1 = \Omega_1 \cos v_2 - m_3 K_3 K_2^{-1} \Omega_2 \sin v_3;$$

$$\omega_2 = \Omega_1 \sin v_2 + m_3 K_3 K_2^{-1} \Omega_2 \cos v_3; \quad m_1 = \sqrt{\kappa_1 / \kappa_2};$$

$$m_2 = \sqrt{\kappa_1 / \kappa_3}; \quad m_3 = \sqrt{\kappa_2 / \kappa_3}; \quad v_1 = a_n l_1 l_3^{-1};$$

$$v_2 = a_n m_1 (l_2 - l_1) l_3^{-1}; \quad v_3 = a_n m_2 (l_3 - l_2) l_3^{-1};$$

$\beta_i = h_i l_3 K_i^{-1}$ ;  $a_n$  — корни трансцендентного уравнения  $K_1 \psi_1 \omega_1 + m_1 K_2 \psi_2 \omega_2 = 0$  (7), первый корень которого находится по формуле

$$a_1 = \left[ \left( \beta_1 + \frac{K_3}{K_1} \right) / \left( \frac{l_1}{l_3} + m_1^2 \frac{K_2}{K_1} \frac{(l_2 - l_1)}{l_3} + m_2^2 \frac{K_3}{K_1} \frac{(l_3 - l_2)}{l_3} \right) \right]^{1/2},$$

остальные — решением уравнения (7) на ЭВМ.

Выражение (6), найденное посредством интегрирования соответствующей клеточной функции Грина, обеспечивает общность решения при различных механизмах поглощения излучения и уменьшении числа слоев. Это, в частности, дает возможность перейти от (6) к решению задачи теплопроводности для однослойного чувствительного элемента, отражающей случай объемного поглощения мощности СВЧ непосредственно в кристалле при размещении пироэлемента (со сверхтонкими электродами) в полости волновода.

Найденное для пироэлектрического чувствительного элемента распределение температуры (6) позволяет определить среднюю температуру пироэлемента, используя известную методику [6], установить соотношение для критерия линейности работы пиропреобразователя, а также записать выражение для выходного сигнала, нахождение которого связано с дифференцированием по времени

прироста средней температуры пиропластины. Так, например, временная зависимость относительного прироста средней температуры пироэлектрика

$$\theta_{\text{ср } 2}(t) = \frac{2l^2 \alpha^2 p'}{K_1} \frac{l_3}{m_1 (l_2 - l_1)} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - e^{-\frac{a_n^2 x_1^2}{l_3^2}}}{(\alpha^2 l_3^2 + a_n^2) a_n^2 B} (\omega_2 - m_3 \Omega_2 K_3 / K_2). \quad (8)$$

На основные характеристики пиропреобразователя наиболее существенное влияние из геометрических параметров пироэлемента оказывает его толщина ввиду нелинейности их связи.

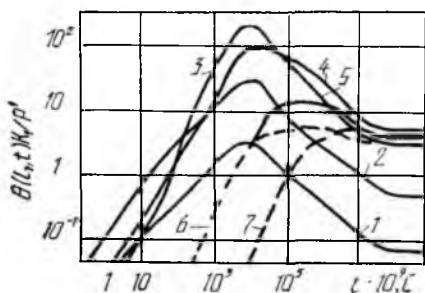


Рис. 2

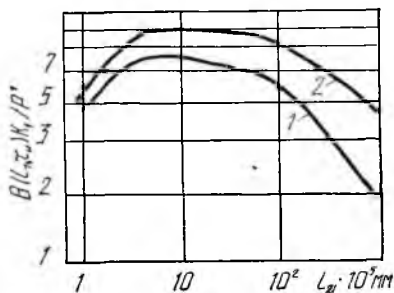


Рис. 3

На рис. 2 представлена временная зависимость относительного прироста температуры поверхности чувствительного элемента, находящейся в непосредственном контакте с поглощающим электродом ( $x = l_1$ ), при изменении толщины этого электрода. Здесь 1 —  $l_1 = 0,01$  мкм; 2 —  $l_1 = 0,1$  мкм; 3 —  $l_1 = 1$  мкм; 4 —  $l_1 = 10$  мкм; 5 —  $l_1 = 100$  мкм. Как следует из графика, под действием импульсной мощности СВЧ прирост температуры достигает максимального значения в момент окончания импульса при толщине электрода, сравнимой с глубиной скин-слоя ( $l_1 = 1$  мкм). Частота СВЧ-колебаний — 10 ГГц, материал электрода — серебро. Увеличение  $l_1$  приводит к возрастанию потерь на теплопроводность и к существенной задержке распространения тепла, что выражается в смещении максимумов кривых в сторону времен, превышающих длительность импульсов излучения, равную 10 мкс. Таким образом, на основе пироэлектрических преобразователей можно создать линию задержки и, в частности, осуществить разделение пиро- и пьезоэлектрической компонент выходного сигнала преобразователя. Снижение относительного прироста температуры при толщинах приемного электрода меньше скин-слоя происходит в связи с уменьшением поглощенной электродом СВЧ-мощности.

В этом случае увеличиваются также переотражение и переизлучение в области чувствительного элемента, что сказывается на электрической прочности и ухудшает согласование тракта. Перечисленными причинами обусловлено и снижение средней температуры пиропластины (пунктирные кривые на рис. 2; 6 —  $l_1 = 1$  мкм; 7 —  $l_1 = 100$  мкм), а в конечном счете — чувствительности преобразователя.

Влияние толщины второго  $l_{21}$  и третьего  $l_{32}$  слоев на относительный прирост температуры пирозлектрического элемента для того же сечения ( $x = l_1$ ) отражено на рис. 3, 4. При этом второй слой представляет собой пластину титаната бария с параметрами  $K_2 = 2,51$  Вт/(м · К),  $\kappa_2 = 6,24 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, материал третьего слоя — медь.

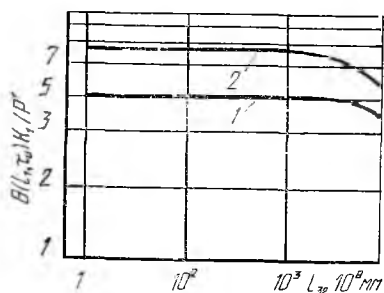


Рис. 4

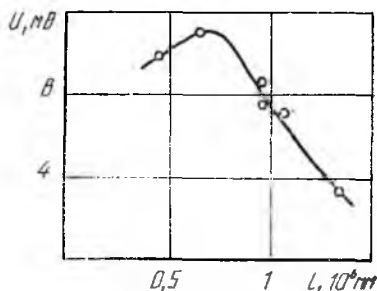


Рис. 5

Спад относительного прироста температуры (рис. 3) при уменьшении толщины пиропластины до десятков и единиц микрометров обусловлен возрастанием влияния теплоотдачи с поверхностей чувствительного элемента. Эти же значения толщины являются предельными для пирозлектриков вследствие технологических трудностей их достижения. Уменьшение чувствительности преобразователя с ростом толщины пироактивной пластины связано с возрастанием теплоемкости образца, что соответствует известным представлениям.

Численный анализ зависимости относительного прироста температуры поверхности пирообразца со стороны приемного электрода от  $l_{32} = l_3 - l_2$  (рис. 4) указывает на то, что третий слой, который в случае идеального контакта между слоями может рассматриваться как теплоотводящее основание, начинает оказывать существенное влияние, когда основной вклад в теплоотдачу на тыльной поверхности пиропластины вносит не излучение, а теплопередача через материал прилегающего слоя.

На рис. 3, 4 отражено также изменение указанных зависимостей от частоты СВЧ-сигнала (кривая 1 — 3 ГГц; кривая 2 — 10 ГГц). Увеличение прироста температуры чувствительного элемента с повышением частоты обусловлено соответствующим умень-

шением глубины проникновения поля в металл электрода и увеличением мощности, рассеиваемой в нем.

Если принять во внимание пропорциональную связь прироста средней температуры чувствительного элемента с выходным напряжением пиропреобразователя, подтверждением полученных данных, в частности, могут служить результаты эксперимента, отражающие изменение пироэлектрического сигнала преобразователя с уменьшением толщины приемного электрода чувствительного элемента. График указанной зависимости (рис. 5) относится к образцу размером  $4 \times 4 \times 0,2$  мм из танталата лития, помещенному в волновод сечением  $23 \times 10$  мм при частоте источника сигнала 9390 МГц. Толщину медного электрода уменьшали путем травления, контролировали микроинтерферометром МИИ-4. Максимум пироэлектрического напряжения, как и температуры (рис. 2), соответствует толщине электрода, близкой к глубине скин-слоя на указанной частоте. Основная погрешность эксперимента обусловлена дискретностью травления толщины электрода.

Таким образом, аналитические выражения для температурного поля СВЧ-пироэлементов, полученные на основе представления о распределенности их параметров, обеспечивают в первом приближении возможность оптимизации геометрических, а также теплофизических параметров каждого из слоев. Найденные для тепловой ступени преобразования зависимости можно использовать при установлении соотношения для критерия линейности работы СВЧ-пиропреобразователя, исследовании его характеристик на этапе электрической ступени преобразования. Результаты численного анализа тепловых полей рекомендуется применять при проектировании устройств сверхвысокочастотного диапазона на базе пироэлектрических чувствительных элементов.

Список литературы: 1. *Кременчуцкий Л. С., Ройцина О. В.* Пироэлектрические приемники излучения.— К.: Наук. думка, 1979.— 382 с. 2. *Ключник И. И., Новик В. К.* Пироэлектрические преобразователи в устройствах СВЧ.— М., 1980.— 35 с.— Деп. в ЦНИИ «Электроника» 19.03.80, № РД-3046. 3. *Хиппель А. Р.* Диэлектрики и волны.— М.: Изд-во иностр. лит., 1960.— 438 с. 4. *Кравченко Н. И., Кукуш В. Д.* Исследование теплового действия основной волны на стенки прямоугольных волноводов // Радиотехника.— 1974.— Вып. 28.— С. 111—120. 5. *Ключник И. И.* Решение одномерной задачи теплопроводности для трехслойного пироэлектрического приемника СВЧ.— К., 1982.— 14 с.— Деп. в УкрНИИТИ 30.11.82, № 3955 Ук-Д82. 6. *Косоротов В. Ф., Кременчуцкий Л. С., Ройцина О. В.* Исследование динамического диапазона пироэлектрического приемника излучения в импульсном режиме // Журн. прикл. спектроскопии.— 1975.— 22.— Вып. 4.— С. 733—739

Поступила в редколлегию 30.10.85