



УДК 537.226.4

© *В. И. Иванов, С. В. Климентьев, В. В. Корчевский, 2010*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ПИРОЭФФЕКТА В ТЕРМОВОЛЬТАИЧЕСКОМ ПРИЕМНИКЕ ИЗЛУЧЕНИЯ

*Иванов В. И.* – д-р физ.-мат. наук, проф. завкафедрой «Теоретическая механика», тел.: (4212) 40-73-76, e-mail: ivanov@festu.khv.ru (ДВГУПС); *Климентьев С. В.* – канд. физ.-мат. наук, доц. кафедры «Электротехника, электроника и электромеханика», тел.: (4212) 40-77-21, e-mail: nrcnich@festu.khv.ru (ДВГУПС); *Корчевский В. В.* – д-р физ.-мат. наук, завкафедрой «Электротехника и электроника», тел.: (4212) 37-51-85, e-mail: kvv@ele.khstu.ru (ТОГУ)

Проведено аналитическое исследование частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности теплового приемника, в котором использовано два эффекта: динамический пироэффект и термовольтаический.

The frequency dependence of the volt-watt sensitivity of a thermal detector operating on the basis of two effects – dynamical pyroeffect and thermovoltic – is analytically investigated.

*Ключевые слова:* сэндвичная структура, термовольтаический эффект, динамический пироэффект, вольт-ваттная чувствительность, тепловой приемник.

В [1] предложен приемник излучения, работа которого основана на использовании термовольтаического эффекта. Он обладает высокой вольт-ваттной чувствительностью в широком спектральном диапазоне. Однако недостатком такого приемника является неравномерная частотная зависимость чувствительности, которая значительно снижается уже в области средних частот модуляции излучения, что ограничивает область его применения. Для решения целого ряда задач измерение мощности излучения необходимо проводить в расширенном частотном диапазоне. Одной из таких задач является исследование формы сигнала.

Для повышения вольт-ваттной чувствительности приемника в области средних частот и выравнивания его частотной характеристики в данной работе предлагается тепловой приемник (ТП), в котором используются два эффекта – термовольтаический и динамический пироэффект. Целью работы является аналитическое исследование частотной зависимости вольт-ваттной чувствительности предлагаемого ТП.

Термовольтаический эффект наблюдается в структуре металл-сегнетоэлектрик-металл (МСМ) с разными металлами [1-4]. Знак термовольтаической ЭДС определяется положением электродов, а величина, в отличие от пирозлектрического эффекта, пропорциональна температуре однородно нагретого кристалла и не зависит от скорости ее изменения [1, 2]. Величина термовольтаического ЭДС имеет резко выраженную зависимость от степени легирования образца, возрастает с уменьшением толщины кристалла и нелинейно зависит от площади электродов [1].

Структурная схема термовольтаического ТП представлена на рис. 1.

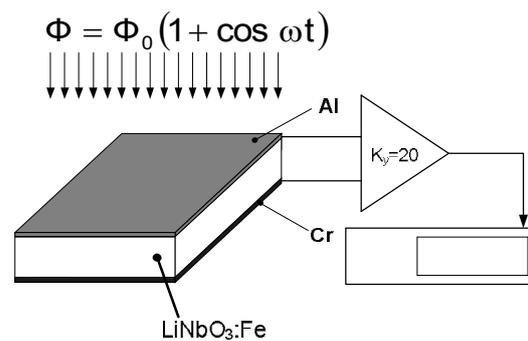


Рис. 1. Структурная схема ТП [1]

Ток, обусловленный термовольтаическим эффектом, определяется выражением

$$J_{твэ} = H\Delta T, \quad (1)$$

где  $\Delta T$  – разность начальной и конечной температур образца;  $H = AE_0L\rho'(R_H A + \rho L)^{-2}$  – коэффициент, характеризующий величину квазистационарного термовольтаического отклика (где  $A$  – площадь кристалла;  $E_0$  – термовольтаическая ЭДС;  $L$  – толщина кристалла;  $R_H$  – сопротивление нагрузки;  $\rho$  – удельное сопротивление кристалла,  $\rho'$  – производная удельного сопротивления кристалла по температуре).

Экспериментально измеренная вольт-ваттная чувствительность данного ТП для кристалла  $\text{LiNbO}_3$  легированного железом ( $S_V(\omega) = V_H(\omega)/\Phi(\omega)$ , где  $V_H(\omega)$  – напряжение сигнала на сопротивлении нагрузки,  $\Phi(\omega)$  – мощность падающего на приемник излучения) на частоте модуляции 1 Гц составила 6 В/Вт [1].

Динамический пирозэффект проявляется в сэндвичных структурах металл-диэлектрик-металл (МДМ) [6]. Для несимметричной системы, т. е.



$M_1DM_2$ , предполагается наличие разности потенциалов в приконтактной области диэлектрика, обусловленной различной работой выхода электронов на границе раздела металл – диэлектрик. Работа выхода металла электрода много меньше работы выхода диэлектрика, что приводит к слабой инжекции носителей заряда в приконтактную область диэлектрика и появлению пространственного заряда в контактных областях. В такой структуре МДМ, при наличии воздействия изменяющегося во времени потока излучения, наблюдается термостимулированный пироток.

Зависимость пироэлектрического тока от скорости изменения температуры кристалла определяется формулой [5, 6]

$$J = \gamma A \frac{dT}{dt}, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – пироэлектрический коэффициент,  $T$  – температура кристалла,  $t$  – время. Чем выше скорость изменения температуры, тем выше величина пироэлектрического тока. Поэтому на нулевых и инфранизких частотах модуляции пироэлектрический эффект проявляется незначительно, а максимально возможного значения достигает на средних частотах.

С уменьшением толщины диэлектрика электрическое поле в нем увеличивается [5, 6]:

$$D_L = \frac{-\varepsilon U}{L(1 + 2\delta\varepsilon L^{-1})}, \quad (3)$$

где  $D_L$  – индукция;  $\delta$  – параметр экранирования [6],  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость,  $U$  – разность потенциалов между электродами,  $L$  – толщина пластинки. Это приводит к росту динамического пироэлектрического коэффициента (рис. 2):

$$\gamma^{E,\sigma} = \left( \frac{\partial \varepsilon_T}{\partial T} \right) E. \quad (4)$$

В рассматриваемом случае пироэлектрический коэффициент определяется наличием в диэлектрике равновесного электрического поля  $E$  и температурной зависимостью диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_T$  [6].

Предлагаемый ТП представляет собой МСМ структуру с различными металлами электродов, что позволяет наблюдать наличие в нем сразу двух, описанных выше эффектов. Следовательно, ток нагрузки выражается суммой токов, обусловленных обоими эффектами:

$$J = \gamma^{E,\sigma} A (\partial T / \partial t) + H \Delta T, \quad (5)$$

где  $T$  – температура кристалла,  $t$  – время.

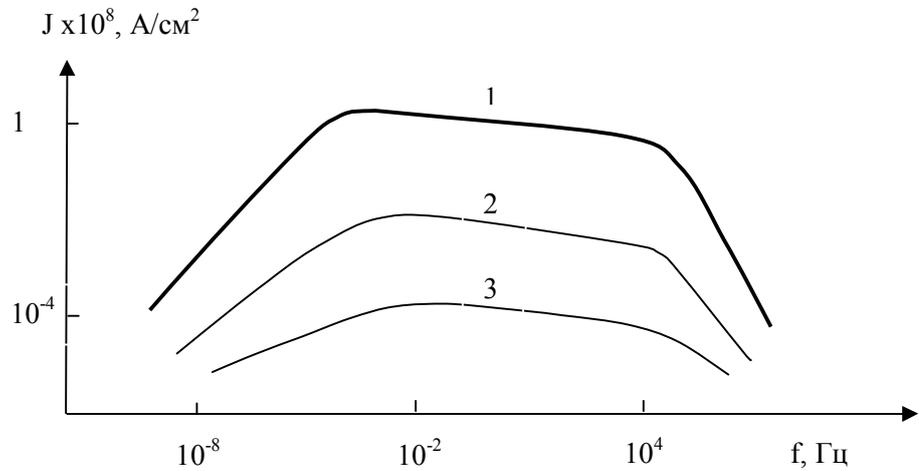


Рис. 2. Частотная зависимость плотности тока в системе  $M_1DM_2$  для пластинок различной толщины с электродами из разных металлов со слабой инжекцией ( $L = 1$  (1), 10 (2) и 100 мкм (3); контактная разность потенциалов  $V = 1$  эВ) [6]

Для предложенного ТП эквивалентная схема замещения представлена на рис. 3.

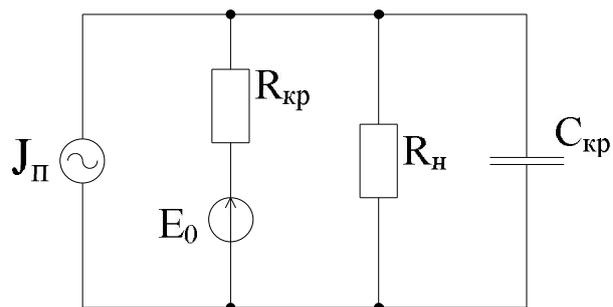


Рис. 3. Эквивалентная схема замещения приемника:  $J_{\text{П}}$  – источник пирозлектрического тока;  $E_0$  – источник термовольтаического напряжения;  $R_{\text{кр}}$ ,  $R_{\text{н}}$  – сопротивления кристалла и нагрузки соответственно;  $C_{\text{кр}}$  – емкость кристалла

Чтобы получить выражение для вольт-ваттной чувствительности предлагаемого приемника, необходимо получить решение дифференциального



уравнения для выходного сигнала (напряжения на сопротивлении нагрузки  $R_H$ ) в соответствии со схемой замещения. Уравнение без учета процессов самоиндукции имеет вид

$$C_{кр} \frac{dV_H}{dt} + \frac{1}{R_0} V_H = A\gamma^{E,\sigma} \frac{dT}{dt} + H\Delta T, \quad (6)$$

где  $V_H$  – выходной сигнал на сопротивлении нагрузки,  $C_{кр}$  – емкость кристалла,  $R_0^{-1} = R_{кр}^{-1} + R_H^{-1}$  ( $R_{кр}$  – сопротивление кристалла).

Пусть на чувствительный элемент падает тепловой поток  $\Phi(t) = A\Phi_0(1 - \cos \omega t)/2$ , где  $\Phi_0$  – плотность потока излучения. Уравнение теплопереноса для чувствительного элемента имеет вид

$$\frac{dT}{dt} + \frac{T}{\tau_T} = \frac{\eta_1 \Phi_0(t)}{c^\sigma L}, \quad (7)$$

где  $c^\sigma$  – удельная теплоемкость кристалла;  $\eta_1$  – поглощательная способность облучаемой поверхности;  $\tau_T$  – тепловая постоянная времени, обусловленная теплообменом с окружающей средой.

Решение уравнения (7) дает для переменной составляющей температуры следующее выражение:

$$T = \frac{2A\Phi_0\eta_1 \cos \omega t}{c^\sigma \cdot L \cdot (1 + \omega^2 \tau_T^2)}. \quad (8)$$

Подставляя в (6) решение уравнения теплопроводности, получаем вольт-ваттную чувствительность ТП:

$$S_V(\omega) = \frac{2\eta_1 \tau_\varepsilon \tau_m \omega A \gamma^{E,\sigma} R_0}{c^\sigma L (1 + \omega^2 \tau_\varepsilon^2)^{1/2} \cdot (1 + \omega^2 \tau_m^2)^{1/2}} + \frac{\eta_1 \tau_\varepsilon \tau_m H (R_{кр} + R_H)}{c^\sigma L (1 + \omega^2 \tau_\varepsilon^2)^{1/2} \cdot (1 + \omega^2 \tau_m^2)^{1/2}}, \quad (9)$$

где  $\tau_\varepsilon = R_0 C_{кр}$  – электрическая постоянная ТП.

Первое слагаемое выражения (9) определяет вклад, обусловленный пироэлектрической составляющей, второе – термовольтаической. Равномерная чувствительность достигается равенством значений этих слагаемых на разных частотных участках диапазона, где их значения не зависят от частоты,

что дает  $2A\gamma^{E,\sigma}R_0 = \tau_T H(R_{кр} + R_H)$ . В этом случае значение вольт-ваттной чувствительности определяется выражением

$$S(V) = \frac{\eta_1 \tau_{\Sigma} 2A\gamma^{E,\sigma} R_0}{c^{\sigma} L} \cdot \frac{(\omega \tau_T + 1)}{\left(1 + \omega^2 \tau_{\Sigma}^2\right)^{1/2} \left(1 + \omega^2 \tau_T^2\right)^{1/2}}. \quad (10)$$

Анализ полученного выражения показывает, что характеристика вольт-ваттной чувствительности постоянна в диапазоне частот от 0 до  $\omega \approx \tau_{\Sigma}^{-1}$ . Небольшое отклонение характеристики от равномерной при ( $\omega \approx \tau_T^{-1}$ ) может быть скомпенсировано с помощью полосового фильтра.

Таким образом, предложенный ТП обладает высокой вольт-ваттной чувствительностью в широком диапазоне частоты модуляции излучения, включая инфранизкие частоты, что позволяет, в частности, использовать его и для исследования формы сигнала.

### Библиографические ссылки

1. *Характеристики* приемника излучения на основе структуры металл-сегнетоэлектрик-металл / Г. Г. Здоровцев, В. И. Иванов, С. В. Климентьев, В. В. Криштоп // Приборостроение. 2006. Т. 49. № 8.
2. *Иванов В. И., Карпец Ю. М., Климентьев С. В.* ТермоЭДС в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов // Изв. вузов. Сер. физ. 2001. № 1.
3. *Термоиндуцированная ЭДС* в легированных кристаллах ниобата лития с электродами из различных металлов / Г. Г. Здоровцев [и др.] : препринт № 19. Хабаровск, 2000.
4. *Ivanov V. I.* Thermo-EMF in LiNbO<sub>3</sub> crystals with different metal electrodes / V.I. Ivanov, Yu.M. Karpets, N.V. Marchenkov, G.G. Zdorovtsev // Fundamental problems of Optoelectronics and Microelectronics, Yuri N. Kulchin, Oleg B. Vitrik, Vladimir I. Stroganov, Editors, Proceedings of SPIE. Vol. 5851, 415–419 (2005).
5. *Ицковский М. А., Щедрина Л. В.* Термостимулированные токи в системе металл–диэлектрик–металл // ФТТ. 1979. Т. 21. № 12.
6. *Пироэлектрический эффект и его применения* / В. Ф. Косоротов, Л. С. Кременчугский, В. Б. Самойлов, Л. В. Щедрина ; под ред. Л. С. Кременчугского. Киев, 1989.