

УДК 621.383.8; 537.226.82

С. Р. Сырцов

(Витебск, Беларусь)

РАСЧЕТ ТЕПЛОВОЙ ПОСТОЯННОЙ ВРЕМЕНИ  
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА  
НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ ПИРОЭЛЕКТРИК — ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

Показана возможность использования уравнения теплового баланса для анализа теплового отклика трехслойной структуры пирозлектрик — жидкий кристалл — подложка. Проведен расчет тепловой постоянной времени системы.

В связи с необходимостью создания малогабаритных неохлаждаемых преобразователей изображения, чувствительных к тепловому излучению объектов ( $\lambda = 8 - 12$  мкм), повышенный интерес вызывают начатые в последние годы исследования по созданию пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) на основе структуры пирозлектрик — жидкий кристалл (ПЭ — ЖК) [1—3]. Принципиальная схема такого модулятора представлена на рис. 1. Как было показано ранее [1, 3], эффективность функционирования такой структуры определяется главным образом способностью пирозлектрического слоя генерировать напряжение  $U_{ЖК}$  на ЖК-слое. Последняя, в свою очередь, зависит от теплофизических характеристик структуры и способности пирозлектрика аккумулировать поток энергии  $W(t)$  от теплового объекта. Строго говоря, для определения вольт-ваттной чувствительности системы необходимо решить нестационарное уравнение теплопроводности, однако обычно предполагают [1—3], что пирозлектрик равномерно прогреет и расчет прироста температуры слоя  $\theta$  проводят на основе решения уравнения теплового баланса [4]:

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{\tau_T} = W(t), \quad (1)$$

где  $\tau_T$  — тепловая постоянная времени. При его решении обычно предполагается выполнение условия ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  — частота модуляции излучения)

$$\omega\tau_T \gg 1, \quad (2)$$

которое означает, что оттоком тепла из пирозлектрического слоя можно пренебречь, и, следовательно, строгое решение тепловой задачи не требуется.

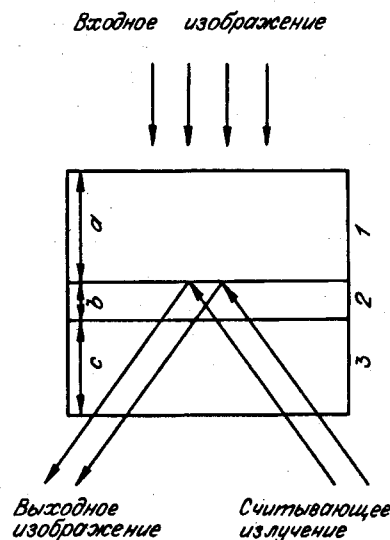


Рис. 1. Принципиальная схема пространственно-временного модулятора света:

1 — пирозлектрический слой, 2 — жидкокристаллический слой, 3 — подложка

Однако возможность использования уравнение теплового баланса (1) и справедливость выполнения неравенства (2) не очевидны и требуют дополнительного обоснования. Рассмотрению этого вопроса и посвящена данная работа.

Рассматриваемая структура представляет собой трехслойную структуру, состоящую из пьезоэлектрического ( $i = 1$ ), жидкокристаллического ( $i = 2$ ) слоев и подложки ( $i = 3$ ) (см. рис. 1). Со стороны ПЭ структура облучается потоком теплового излучения  $W(t)$ . При анализе предполагается, что весь тепловой поток поглощается в тонком слое на поверхности пьезоэлектрика. Предполагается также, что теплоемкостью этого слоя, как и теплоемкостью других технологических слоев на границах ПЭ — ЖК и ЖК-подложка, можно пренебречь по сравнению с теплоемкостью рассматриваемых слоев. Так как поперечные размеры структуры существенно больше суммарной толщины составляющих ее слоев, можно ограничиться решением одномерного нестационарного уравнения теплопроводности

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \frac{K_i}{C_i} \frac{\partial^2 \theta_i(x, t)}{\partial x^2} \quad (3)$$

с граничным условием  $J(0) \equiv -K_1 \left. \frac{\partial \theta_1(x)}{\partial x} \right|_{x=0} = \eta W(t) - g_H \theta_1(0)$ , где  $K_i$  и  $C_i$  — коэффициент теплопроводности и теплоемкость соответствующего слоя;  $g_H = 4\sigma T_0^3 \eta$  ( $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана);  $\theta_1(0)$  — прирост температуры на поверхности ПЭ;  $\eta$  — поглощательная способность.

Интегрируя (3) по толщине пьезоэлектрического слоя, можно получить уравнение для определения средней величины прироста температуры пьезоэлектрика  $\bar{\theta}_1(t) \equiv \frac{1}{a} \int_0^a \theta_1(x, t) dx$  ( $\theta_1 = T - T_0$ ,  $T_0$  — температура окружающей среды):

$$\frac{\partial \bar{\theta}_1(t)}{\partial t} + \frac{J(a, t)}{c_1 a} = \frac{W(t) - g_H \theta_1(0)}{c_1 a}, \quad (4)$$

где  $J(a, t)$  — поток тепла из пьезоэлектрического слоя в структуру.

Для определения величин  $J(a, t)$  необходимо решить уравнение теплопроводности (3) для трехслойной структуры. В случае часто используемого на практике модулированного потока по закону  $W(t) = W_0(1 + e^{i\omega t})$  решение (3) удобно искать [5] в виде  $\theta_i(x, t) = \theta_i(x) e^{i\omega t}$ . С учетом граничных условий и равенства температур и тепловых потоков на границах раздела слоев после несложных, но громоздких преобразований находим:

$$\theta_1(0) = P \bar{\theta}_1, \quad (5)$$

$$J(a) = K_1 \frac{a(P - \text{ch}(a/L_1))}{L_1^2(\text{ch}(a/L_1) - 1)(1 + P)} \bar{\theta}_1, \quad (6)$$

при этом параметр  $P$  определяется выражением

$$P = \text{ch}(a/L_1) + \frac{K_2 L_1}{K_1 L_2} \frac{\text{sh}(a/L_1)}{\text{sh}(b/L_2)} \left\{ \text{ch}(b/L_2) - \frac{1}{\text{ch}(b/L_2) + \frac{K_3 L_2}{K_2 L_3} \text{sh}(b/L_2) \text{th}(c/L_3)} \right\}^{-1}, \quad (7)$$

$L_i = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{K_i}{\omega c_{vi}}}$ ;  $\lambda_{\pi} = \sqrt{\frac{K_i}{\omega c_{vi}}}$  — длина температурной волны в среде;  $c_{vi}$  — удельная объемная теплоемкость  $i$ -го слоя.

Заметим, что согласно (5) поток тепла из пьезоэлектрического слоя пропорционален средней величине прироста температуры пьезоэлектрического слоя  $\bar{\theta}_1$ . Это обстоятельство позволяет привести уравнение (4) к стандартно-

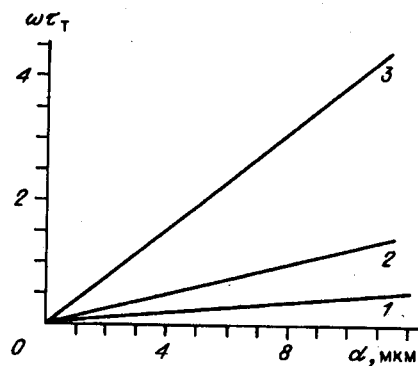


Рис. 2. Зависимость величины  $\omega\tau_T$  от толщины пьезоэлектрического слоя:

$$f = 10 \text{ Гц}, l - b = 2, 2 - 10, 3 - 50 \text{ мкм}$$

му виду уравнения баланса (1) для величины  $\bar{\theta}_1$ . При этом тепловая постоянная времени системы  $\tau_T$  определяется выражением

$$\tau_T = \frac{c_{v1} L_1^2 (\text{ch}(a/L_1) - 1)(1 + P)}{K_1(P - \text{ch}(a/L_1))} \quad (8)$$

и зависит теперь от частоты модуляции и параметров всех составляющих структуру слоев.

Полученные выше выражения позволяют использовать для оценки чувствительности системы известные соотношения теории пьезоэлектрических приемников излучения [4] и оценить влияние на ее величину частоты модуляции и параметров структуры.

Анализ показывает, что тепловая постоянная времени  $\tau_T$  слабо зависит от величины теплоемкости слоев и коэффициентов теплопроводности, а определяется главным образом толщиной пьезоэлектрического и жидкокристаллических слоев. До тех пор, пока длина тепловой волны в пьезоэлектрическом слое превышает ее толщину, зависимость  $\tau_T$  от  $f$  следует закону  $\sim 1/f$ . При  $\lambda_{T1} \sim a$  наблюдается отклонение от этого закона, и при высоких частотах ( $\lambda_{T1} < a$ )  $\tau_T \sim \frac{1}{\omega} \exp\left(\sqrt{\frac{\omega c_{v1}}{K_1}} a\right)$ . На рис. 2 представлена зависимость величины  $\omega\tau_T$  от толщины, составляющих структуру слоев. Видно, что обычно постулируемое неравенство (2), выполнение которого позволяет пренебречь оттоком тепла из пьезоэлектрического слоя и упростить расчет характеристик системы, при обычных толщинах ЖК-слоя ( $\sim 10$  мкм) выполняется лишь для  $a \geq 10$  мкм. Уменьшение толщины пьезоэлектрического слоя с целью повы-

шения чувствительности системы может привести к нарушению этого условия и к необходимости учета влияния на величину  $\tau_T$  параметров других слоев структуры. Это обстоятельство особенно важно учитывать при создании ПВМС по тонкопленочной технологии. Отметим также, что приведенные в работе выражения остаются верными и при учете различных добавочных технологических слоев (чернящего покрытия, диэлектрического зеркала и т. д.). Их учет приводит лишь к перенормировке параметра  $P$ .

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватурин В. П., Дергачев Д. Н., Компанец И. Н. и др. Пространственно-временной модулятор света на основе структуры «пьезоэлектрик — жидкий кристалл». — М., 1985. — (Препр. ФИАН; 248).
2. Kalman P., Toth A. Pyrooptic converter based on a combination of pyroelectric and electrooptic effects // *Ferroelectrics*. — 1987. — 75. — P. 173.
3. Дубровская Т. С., Михневич В. В., Потапенко И. П., Сырцов С. Р. Сенситометрические характеристики модулятора света на основе структуры пьезоэлектрик — жидкий кристалл // *Автоматрия*. — 1991. — № 4.
4. Косоротов В. Ф., Кременчугский Л. С., Самойлов В. Б., Щедрин Л. В. Пьезоэлектрический эффект и его практические применения. — Киев: Наук. думка, 1989.
5. Van der Ziel A. Pyroelectric response and  $D^*$  of thin pyroelectric films on a substrate // *J. Appl. Phys.* — 1973. — 44, N 2. — P. 546.

Поступила в редакцию 19 октября 1992 г.