

## ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТРУКТУР ПИРОЭЛЕКТРИК- ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

*В.Н. Шут, А.В. Гаврилов, В.Л. Трубловский*

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день наибольшее распространение получили преобразователи изображения (ПИ), в которых в качестве электрооптической среды выступают жидкие кристаллы (ЖК). Жидкокристаллические ПИ компактны просты в эксплуатации и работают при низких питающих напряжениях [1].

Большое внимание уделяется устройствам, преобразующим изображение инфракрасного диапазона длин волн в видимое. Это связано с тем, что подавляющая часть объектов, окружающих нас, находится при температуре, близкой к 300 К, и излучает в спектральном диапазоне 2-100 мкм с максимумом в районе  $\lambda \sim 10$  мкм.

В настоящее время все более востребованными являются ПИ для области излучения 10 мкм и более. Для данной области (порядка десятков микрон) весьма эффективно применение в качестве фоточувствительного слоя пироэлектрических (ПЭ) материалов, которые обеспечивают преобразование тепловых полей излучения в соответствующее пространственное распределение связанных зарядов на их поверхности [2].

Преобразователи изображения на основе структуры ПЭ-ЖК позволяют осуществить параллельную обработку и преобразование информации без использования достаточно сложных электронных систем сканирования и охлаждения [3]. Созданные на основе пироэлектрических материалов недорогие, компактные ПИ для среднего ИК – диапазона ( $\lambda \sim 10$  мкм) могли бы найти широкое применение при решении задач визуализации невидимых изображений в медицине, в технике неразрушающего контроля и т.д. Особый интерес вызывает создание простых и надежных устройств для диагностики модовой структуры ИК – лазеров. Поэтому работы по практической реализации изложенных выше принципов визуализации тепловых полей являются актуальными.

### 1 РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУР В ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МИШЕНИ ПРИ НАГРЕВАНИИ ВНЕШНИМ ИСТОЧНИКОМ ИЗЛУЧЕНИЯ

Используемые на практике пироэлектрические мишени представляют собой плоские пластины активных материалов площадью  $S$  около  $1 \text{ см}^2$  и толщиной менее одного миллиметра. Это позволяет при описании тепловых и электрических процессов в мишенях ограничиться рассмотрением одномерного случая. Нами была рассмотрена слоистая структура пироэлектрик-ЖК-подложка.

Задавались следующие условия: частота модуляции падающего излучения  $f=10$  Гц, средняя плотность теплового потока  $W_0/2=1 \text{ Вт/м}^2$ . В качестве пироэлектрической мишени были выбраны монокристаллы танталата лития ( $\text{LiTaO}_3$ ), являющиеся отличным материалом по факторам пироэлектрического качества. Рассматривались пластины толщиной  $d_{пэ}=100$  мкм, теплопроводностью  $k=3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ , теплоемкостью  $c=430 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$ , плотностью  $\rho_{пэ}=7400 \text{ кг/м}^3$ . Толщина стеклянной подложки задавалась  $d_{ст}=500$  мкм, толщина ЖК ячейки –  $d_{жк}=10$  мкм. Для определения распределения температуры в пироэлектрике решалось одномерное уравнение теплопроводности

$$c\rho_{пэ} \frac{\partial T}{\partial t} - k \Delta T = 0 \quad (1)$$

с граничными условиями:

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=d} - \sigma(T(d,t) - T_0) = 0, \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} + \sigma(T(0,t) - T_0) = W, \quad (3)$$

где,  $\sigma$  – коэффициент теплоотдачи поверхности,  $d = d_{пэ} + d_{жк} + d_{см}$ .

Тепловой поток в случае синусоидальной модуляции определяется выражением

$$W = \frac{W_0}{2}(1 - \cos(\omega t)), \quad (4)$$

где  $\omega = 2\pi f$ .

Полученная система уравнений решалась с помощью программного пакета FemLab.

В стационарном состоянии, когда средняя температура не изменяется, колебания температуры пьезоэлектрической пластины могут быть описаны синусоидой с частотой колебаний  $f$  (рис.1). На рисунке 1 представлены изменения температуры в различных точках пьезоэлектрической пластины от времени относительно средней температуры поверхности пьезоэлектрика.

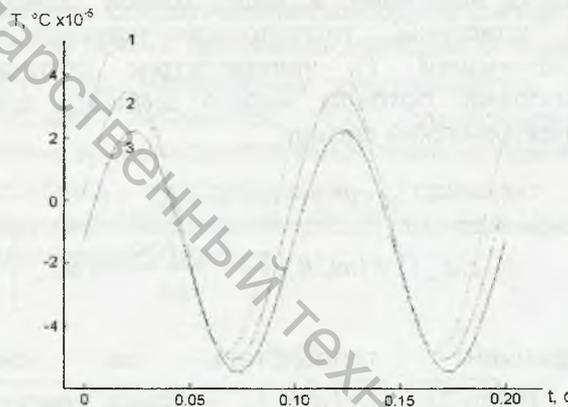


Рисунок 1 - Изменение температуры в пьезоэлектрическом слое (1–поверхность, 2–в центре, 3–граница раздела пьезоэлектрик-ЖК) от времени относительно средней температуры поверхности пьезоэлектрика

Синусоидальное изменение средней температуры в кристалле при заданных условиях составляет  $\Delta T = 8,32 \cdot 10^{-5}$  К. Изменение спонтанной поляризации  $dP_s$  связано с изменением средней температуры пьезоэлектрика следующим выражением:

$$dP_s = \gamma dT, \quad (5)$$

где  $\gamma$  – пьезоэлектрический коэффициент. Таким образом, зная изменение поляризации от температуры и константы приемника пьезосигнала (в нашем случае параметры ЖК-каскада), можно прогнозировать величину преобразования теплового излучения в электрический сигнал.

## 2 РАБОТА ПИРОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КАСКАДА С ПАССИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Структура пьезоэлектрик-ЖК-подложка может быть описана с помощью простой эквивалентной схемы замещения: генератор тока, нагруженный параллельно соединенными емкостями и сопротивлениями пьезоэлектрика и ЖК. Так как заряд  $q$ , выделяемый на поляризованной поверхности, определяется выражением  $q = SP_s$ , то

тогда, с учетом (5), ток, протекающий через нагрузку, изменяется по следующему закону:

$$i = \gamma S dT/dt. \quad (6)$$

В случае если изменение средней температуры пироэлектрика подчиняется синусоидальному закону с угловой частотой колебаний  $\omega$ , то амплитуда колебания напряжения на нагрузке будет

$$U_m = \gamma S \frac{\Delta T}{2} \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}, \quad (7)$$

где  $R$  – общее сопротивление параллельного соединения пироэлектрика и ЖК,  $C$  – общая емкость параллельного соединения пироэлектрика и ЖК.

С другой стороны, основные расчетные соотношения могут быть получены, не используя численного моделирования, при рассмотрении однородного по структуре и равномерно прогреваемого радиационным потоком образца как системы с сосредоточенными параметрами [4]. Тогда в предположении, что пироактивный кристалл выполнен в виде тонкой однородной и изотропной плоскопараллельной пластины, теплотери подчиняются закону Ньютона (являются только функцией  $T$ ), пироэлектрик облучается синусоидально модулированным тепловым потоком, можно записать следующее выражение, описывающее пироэлектрический сигнал:

$$U = \frac{\gamma S W_0 e^{i\omega t} (1 - schhd_{ns}) R}{c_1 d_{ns} (1 + i\omega CR) \left[ 1 + \frac{G + i\omega c_0}{kh} thhd_{ns} \right]}, \quad (8)$$

где  $G$  – коэффициент теплотери за счет проводимости,  $h = (1+i)\sqrt{\omega/2a}$ ,  $\sqrt{2a/\omega} = \lambda_T$  – длина температурной волны,  $c_1$  – удельная теплоёмкость единицы объема кристалла,  $a = k_1/c_1$ ,  $c_0$  – теплоёмкость единицы поверхности облучаемого электрода.

В звуковом диапазоне длин волн выражение (8) можно упростить. Например, при  $hd_{ns} \gg 1$   $schhd_{ns} \rightarrow 0$ . При теплоёмкости  $c_0 = (2 \div 3) \cdot 10^5$  Дж/К·см<sup>2</sup> и частотах менее 20кГц выражение в квадратных скобках близко к единице. Это справедливо для кристаллов LiTaO<sub>3</sub>, триглицинсульфата и BaTiO<sub>3</sub> толщиной около 100 мкм. Тогда (8) можно переписать в виде

$$U_m = \frac{\gamma W_0 SR}{c_1 d_{ns} \sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}}. \quad (9)$$

При толщине пироэлектрической мишени более 100 мкм данные, полученные из решения уравнений (7) и (9), находятся в хорошем соответствии. Поэтому в случае объемных пироэлектриков можно использовать для анализа электрических параметров структуры ПЭ-ЖК уравнение (9).

### 3 ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТРУКТУРЫ ПЭ-ЖК

В настоящее время наилучшими пироэлектрическими материалами являются танталат лития и триглицинсульфат. Характеристики данных материалов систематизированы в таблице 1. В таблице также приведены данные по свойствам жидких кристаллов. Видно, что сопротивление пироактивных материалов значительно превосходит сопротивления ЖК. Поэтому при рассмотрении работы

структур ПЭ-ЖК сопротивление пироматериалов можно не учитывать. Таким образом, на значение напряжения могут оказывать влияние следующие характеристики: удельное сопротивление ЖК, толщина пироэлектрического и жидкокристаллического слоя, а также частота модуляции падающего излучения.

Таблица 1 - Тепловые, диэлектрические и пироэлектрические характеристики материалов

Материал	$T_k, ^\circ\text{C}$	$\gamma \cdot 10^4,$ $\text{Кл}/\text{м}^2 \cdot \text{К}$	$\rho \cdot 10^{-3},$ $\text{кг}/\text{м}^3$	$c_1 \cdot 10^{-6},$ $\text{Дж}/\text{м}^3 \cdot \text{К}$	$\varepsilon$	$\text{tg } \delta$	$\rho \cdot 10^{-10},$ $\text{Ом} \cdot \text{м}$
ТГС	49	3,5	1,69	2,7	40	0,02	-
$\text{LiTaO}_3$	618	2,3	7,45	3,18	43	0,002	$10^{15}$
ЖК	-	-	1,0	0,13	10	-	$10^{7-}$ $10^{12}$

Зависимость напряжения на ЖК-слое от его удельного сопротивления приведена на рис.2. Толщины ЖК-ячеек выбирались, исходя из возможностей современных технологий: 4-10 мкм. Видно, что напряжение на структуре монотонно увеличивается с увеличением сопротивления ЖК-материала вплоть до  $10^9$  Ом·м. При дальнейшем увеличении сопротивления выходной сигнал не изменяется. Это связано с тем, что величина  $(\omega CR)^2$  принимает значения больше единицы (9).

Расчеты показывают, что напряжение увеличивается практически прямо пропорционально толщине ЖК-ячейки, т.к. одновременно увеличивается нагрузочное сопротивление и уменьшается емкостная составляющая.

Уменьшение толщины пироэлектрика приводит практически к экспоненциальному росту пиронапряжения (рис.3), т.к. одновременно уменьшается его теплоемкость и увеличивается емкость.

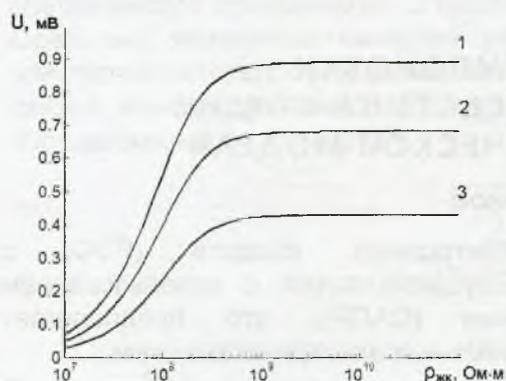


Рисунок 2 - Зависимость напряжения на ЖК-слое от его удельного сопротивления при  $f=10$  Гц,  $W=1$  Вт/м<sup>2</sup>,  $d_{пэ} = 100$  мкм: 1-  $d_{жк}=10$ , 2 - 7, 3 - 4 мкм

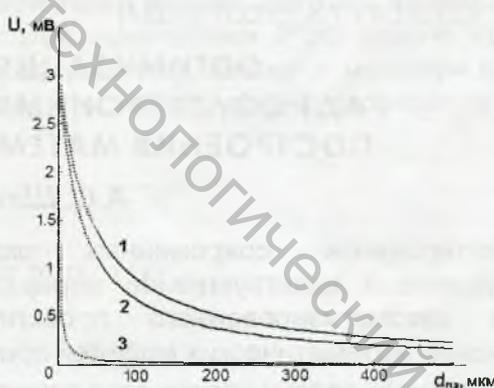


Рисунок 3 - Зависимость пиронапряжения от толщины пироэлектрика при  $f=10$  Гц,  $W=1$  Вт/м<sup>2</sup>, 1-  $d_{жк}=10$  мкм,  $\rho_{жк}=10^{11}$  Ом·м, 2 -  $d_{жк}=7$  мкм,  $\rho_{жк}=10^9$  Ом·м, 3 -  $d_{жк}=4$  мкм,  $\rho_{жк}=10^7$  Ом·м

Однако проведенные предварительные исследования показали, что при  $d_{пэ}$  менее 50 мкм необходимо учитывать теплоотвод из ПЭ-элемента в ЖК. Т.е. необходимо проведение теплофизического расчета структуры. В первом приближении можно констатировать, что толщина пироэлектрической мишени должна составлять 100 мкм.

Пироэлектрический сигнал существенным образом зависит от частоты модуляции. В области низких частот напряжение экспоненциально растет с уменьшением частоты (для случая высокоомных жидких кристаллов). Однако при

уменьшении частоты модуляции будет уменьшаться пространственное разрешение структуры. Для достижения максимальной чувствительности преобразователя необходимо работать на частотах 10 Гц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численными и аналитическими методами исследованы теплофизические свойства слоистой структуры пироэлектрик-ЖК-подложка. Показано, что величина пиросигнала достигает максимального значения при удельном сопротивлении ЖК, равном  $10^9$  Ом·м. Чувствительность структуры возрастает с уменьшением толщины пироэлектрика и частоты модуляции падающего излучения.

#### Список использованных источников

1. Lueder E., "Liquid Crystal Displays", Wiley Series, New York (2001) 352 p.
2. Lang S. B., *Ferroelectrics*, 53, 189-196 (1984).
3. Turi L., Kalman P., Toth A., *Ferroelectrics*, 99, 239-245 (1989).
4. Косоротов В.Ф., Кременчугский Л.С., Самойлов В.Б., Щедрина Л.В. «Пироэлектрический эффект и его практические применения» Киев: наук. думка, 1989, 224с.

#### SUMMARY

The thermophysical properties of layered structure pyroelectric-LC-substrate have been investigated by numerical and analytical methods. It has been shown that magnitude of pyroelectric signal reaches the maximal value at resistivity of LC equal  $10^9$   $\Omega$ ·m. The sensitivity of the structure increases with decrease of pyroelectric thickness and frequencies of modulation of incident radiation.

УДК 621.3.049.73.75:001.2(024)

### ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА СТАДИИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

*А.С. Шандриков*

Проектирование современных радиоэлектронных средств (РЭС) с многоуровневой конструктивной иерархией осуществляется с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР), что предполагает применение математических моделей принципиальных электрических схем.

Для решения задачи компоновки в качестве таких моделей используется граф  $G = (X, U)$ , в котором множество вершин  $X$  заменяет множество радиоэлектронных компонентов (РЭК), а множество рёбер  $U$  – электрические связи между ними в соответствии с принципиальной электрической схемой [1, 2].

Процесс построения графа принципиальной электрической схемы можно условно разбить на следующие этапы:

1 этап – развязка электрических узлов. Необходимость данной операции объясняется следующим обстоятельством. При переходе от принципиальной электрической схемы к графу каждый электрический узел заменяется полным подграфом, в котором каждая вершина соединена со всеми остальными вершинами подграфа. Это означает присутствие в подграфе электрического узла «лишних» рёбер – соединений, фактически не существующих в принципиальной электрической схеме [1, с. 17]. Наличие такой избыточной информации отрицательно сказывается на оптимальности результатов компоновки РЭС и размещения радиоэлектронных компонентов (РЭК) внутри скомпонованных модулей второго иерархического уровня. Для устранения указанного недостатка