

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СТРУКТУРАХ ПИРОЭЛЕКТРИК - ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

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

ВВЕДЕНИЕ

Для детектирования излучения используются различные датчики, характеристики которых изменяются при воздействии определенных длин волн. Тепловая радиация может быть преобразована в электрические сигналы квантовыми или тепловыми датчиками, в частности, пироэлектрическими датчиками. Квантовые детекторы изготавливаются на основе узкозонных полупроводников типа теллурида кадмия ртути ($Cd_xHg_{1-x}Te$) или антимонида индия ($InSb$), а также структур металл-полупроводник (диоды Шоттки) [1]. Но эти материалы для работы требуют глубокого охлаждения и эффективны лишь в видимой и ближней ИК-области спектра. Диапазон длин волны близкий к $10 \mu m$ представляет особый интерес, т.к. именно в этой области излучение объектов с комнатной температурой достигает максимальной интенсивности. Для данного спектрального диапазона широко используются пироэлектрические материалы [2]. Эти материалы применяются как для измерения температур, так и преобразования теплового изображения в видимое. Наблюдение инфракрасных образов широко используется в медицинской диагностике, технике неразрушающего контроля и т.д. Особый интерес вызывает создание простых и надежных устройств для диагностики модовых структур ИК – лазеров. Для визуализации тепловых объектов большое внимание уделялось разработке пироэлектрических матриц, что обусловлено их совместимостью с кремниевыми приборами с зарядовой связью (ПЗС) [3]. Однако изготовление таких приборов является сложной технологической задачей [4].

Пироэлектрические материалы преобразуют тепловое излучение в пространственное распределение связанных зарядов на их поверхности. Поэтому возможно конвертировать инфракрасные изображения непосредственно в видимые, если пироэлектрические материалы (ПЭ) объединены с соответствующей электрооптической средой. В качестве такой электрооптической среды могут использоваться жидкие кристаллы (ЖК) [5, 6]. Это обстоятельство определяется, прежде всего, уникальными свойствами жидких кристаллов, а именно: их чрезвычайно высокой чувствительностью к управляющим воздействиям; высокой крутизной модуляционной характеристики; технологичностью изготовления на их основе многоэлементных приборов и устройств большого формата [7]. В данной работе приведены результаты исследований характеристик преобразователя изображения на основе структур ПЭ – ЖК при воздействии лазерного излучения.

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В СТРУКТУРЕ ПИРОЭЛЕКТРИК- ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Преобразователь изображения представляет собой плоскую слоистую структуру: пироэлектрик – ЖК – стеклянная подложка. Диаметр пироэлектрической мишени брался равным 1 см, толщины ЖК слоя и подложки – 10мкм и 500мкм, соответственно. Лазерный луч, имеющий круглое сечение диаметром 100 мкм, падает в центр пластины перпендикулярно ей (рис. 1). Плотность теплового потока ($W=100 \text{ Вт/м}^2$), создаваемая лазером, считалась постоянной во времени и неизменной в пределах сечения луча. В качестве пироэлектрического слоя мишени были выбраны монокристаллы танталата лития ($LiTaO_3$), являющиеся одним из

лучших материалов по факторам пьезоэлектрического качества (теплопроводность $k=3$ Вт/м·К, теплоемкость $c=430$ Дж/кг·К, плотность $\rho'_{пз}=7400$ кг/м³). Рассматривались пластины различной толщины $d_{пз}$.

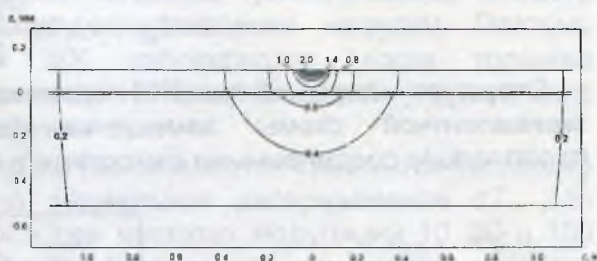
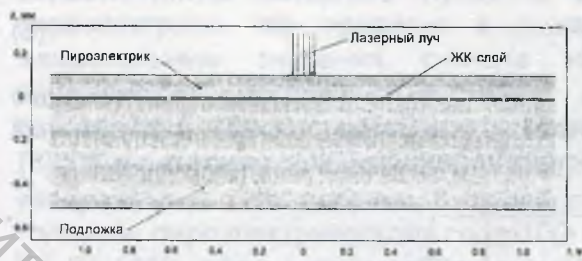


Рисунок 1 - Схематичное изображение структуры преобразователя изображения

Рисунок 2 - Распределение температуры ΔT (10^{-3}°C) в мишени относительно температуры окружающей среды при воздействии постоянного лазерного излучения ($W = 100$ Вт/м², $d_{пз} = 100$ мкм)

Распределение температуры в пьезоэлектрической мишени может быть описано с помощью уравнения теплопроводности:

$$c\rho'_{пз} \frac{\partial T}{\partial t} - \Delta T = 0. \quad (1)$$

Граничные условия (III-го рода) для поверхности, подверженной лазерному излучению с плотностью теплового потока W , имеют вид:

$$\vec{n}k \text{ grad}T = \sigma(T_0 - T) + W, \quad (2)$$

для остальной поверхности:

$$\vec{n}k \text{ grad}T = \sigma(T_0 - T), \quad (3)$$

где \vec{n} – единичный вектор нормали к поверхности, T_0 – температура окружающей среды.

Полученная система уравнений решалась с помощью программного пакета FemLab.

Результаты расчетов приведены на рисунке 2, на котором показано распределение температуры $\Delta T = T - T_0$ мишени относительно температуры T_0 окружающей среды. Из рисунка видно, что нагрев сосредоточен у поверхности, на которую падает тепловой поток. Область, для которой нагрев $\Delta T > \Delta T_{\text{max}}/2$ имеет диаметр порядка 150 мкм и глубину ~ 50 мкм, причем с уменьшением толщины пьезоэлектрического слоя размеры данной области увеличиваются. Величина ΔT_{max} составляет $1.9 - 2.5 \times 10^{-3}^{\circ}\text{C}$ при толщинах пьезоэлектрика 200-50 мкм и плотности теплового потока $W=100$ Вт/м².

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

При постоянном тепловом потоке в стационарном состоянии пьезосигнал будет отсутствовать из-за компенсации связанного заряда. В случае переменного (модулированного) теплового потока на пьезоэлектрике будет выделяться переменный связанный заряд. Переменный заряд создает переменный потенциал, величина которого определяется временным изменением температуры пьезоэлектрика. Ось поляризации пьезоэлектрика перпендикулярна пластине, поэтому для поляризации справедливо выражение:

$$P_s(r) = \gamma dT(r), \quad (4)$$

где P_s – спонтанная поляризация, γ – пьезоэлектрический коэффициент, dT_m – изменение средней по толщине температуры пьезоэлектрика.

Заряд Δq , выделяемый на поверхности площадью ΔS , определяется соотношением: $\Delta q = \Delta S P_s$. Тогда, учитывая (4), в случае изменения средней по

толщине температуры пьезоэлектрика по синусоидальному закону с угловой частотой колебаний ω и амплитудой $dT_m/2$, амплитуда колебания тока, протекающего через нагрузку (пьезоэлектрик и ЖК), будет:

$$I_m = \gamma \Delta S \omega \frac{dT_m}{2} \quad (5)$$

Структура пьезоэлектрик-ЖК-подложка может быть описана с помощью эквивалентной схемы замещения (рис.3): генератор тока, нагруженный параллельно соединенными емкостями и сопротивлениями пьезоэлектрика и ЖК [8].

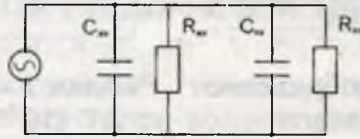


Рисунок 3 - Эквивалентная схема структуры пьезоэлектрик-жидкий кристалл.

Так как $R_{пз} \gg R_{жк}$, то сопротивление структуры определяется выражением:

$$|Z| = \frac{R}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \approx \frac{R_{жк}}{\sqrt{1 + \omega^2 R_{жк}^2 C^2}}, \quad (6)$$

где R – общее сопротивление параллельного соединения сопротивления пьезоэлектрика $R_{пз}$ и ЖК $R_{жк}$ (площадью ΔS), C – общая емкость параллельного соединения пьезоэлектрика и ЖК (площадью ΔS). А напряжение в заданной точке ($\Delta S \rightarrow 0$) на нагрузке будет:

$$U_m(r) = Z I_m \approx \gamma \omega \frac{dT_m(r)}{2} \frac{\rho_{жк} d_{жк}}{\sqrt{1 + \omega^2 (\epsilon_0 \rho_{жк} d_{жк} (\epsilon_{жк} / d_{жк} + \epsilon_{пз} / d_{пз}))^2}}, \quad (7)$$

где $\rho_{жк}$ – удельное сопротивление ЖК, $\epsilon_{пз}$ и $\epsilon_{жк}$ – диэлектрическая проницаемость пьезоэлектрика и ЖК, соответственно.

Анализ уравнения (6), (7) показал, что напряжение на ЖК монотонно увеличивается с увеличением его удельного сопротивления вплоть до 10^9 Ом*м. При дальнейшем увеличении сопротивления выходной сигнал не изменяется. Это связано с тем, что величина $(\omega RC)^2$ принимает значения больше единицы.

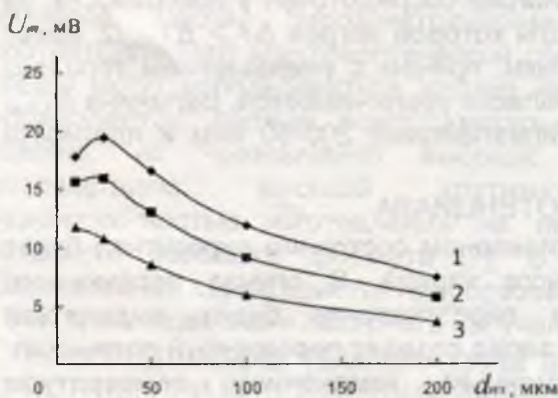


Рисунок 4 - Зависимость амплитуды напряжения U_m на ЖК слое в центре лазерного луча (радиусом 50 мкм, $W=100$ Вт/м², $d_{пз}=100$ мкм) для частот модуляции излучения: 1 – 10, 2 – 30, 3 – 100 Гц

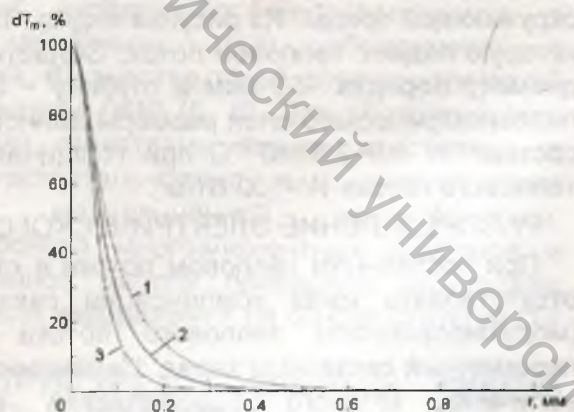


Рисунок 5 - Радиальное распределение температуры ($r=0$ соответствует центру лазерного луча) для частот модуляции f : 1 – 10 Гц; 2 – 30 Гц; 3 – 100 Гц ($d_{пз}=100$ мкм, $W=100$ Вт/м²)

Напряжение, создаваемое в электрооптическом слое, также зависит от толщины пьезоэлектрика и частоты модуляции (рис. 4). При уменьшении толщины $d_{пз}$ пьезоэлектрического слоя возрастают максимальные колебания температуры dT_m (в области пятна лазерного луча). С другой стороны, увеличивается емкость пьезоэлектрика, что приведет к снижению сопротивления нагрузки. Поэтому максимальные значения сигнала на ЖК наблюдаются, когда толщина пьезоэлектрика составляет несколько десятков микрон. Величина пьезосигнала возрастает с уменьшением частоты модуляции.

Однако с уменьшением частоты модуляции увеличивается «размытие теплового изображения». На рисунке 5 приведено радиальное распределение dT_m для толщины пьезоэлектрического слоя 100 мкм при частотах модуляции 10, 30 и 100 Гц. За 100% взято максимальное значение dT_m (в точке $r=0$) для каждой из частот модуляции. Видно, что большей частоте модуляции соответствует более крутой спад dT_m , следовательно, при больших частотах изображение будет более четким.

Таблица 1. Расстояние r_e , мкм от центра лазерного луча, на котором амплитуда пьезосигнала U_m (мВ) меньше максимального значения (в центре $r=0$) в e раз.

f , Гц \ $d_{пз}$, мкм	10	25	50	100	200
10	75	87	97	104	109
30	69	77	81	84	87
100	62	65	66	67	68

На распределение электрического потенциала в мишени так же оказывает влияние толщина пьезоэлектрического слоя, но несколько в меньшей степени, чем частота модуляции (табл.1).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены исследования распределения температуры и электрического потенциала в структуре пьезоэлектрик-ЖК при воздействии лазерного излучения. Установлено, что для достижения максимальной величины пьезосигнала оптимальными являются толщины пьезоэлектрического слоя ~20 мкм. Показано, что разрешающая способность преобразователя возрастает с увеличением частоты модуляции теплового излучения и уменьшением толщины пьезоэлектрика. Исследованные структуры могут представлять интерес для визуализации модовых структур лазеров ИК-диапазона.

Список использованных источников

1. Kosonocky W.F., Elabd H. A PtSi Schottky-barrier infrared MOS area imager with large fill factor // Jpn. J. Appl. Phys. 22-1, 103 (1983).
2. Lang S. B. Review of recent work on pyroelectric applications // Ferroelectrics. 53, 189 (1984).
3. Watton R., Manning P., Burgess D., Gooding J. The pyroelectric/CCD focal plane hybrid: Analysis and design for direct charge injection // Infrared Phys. 22, 259 (1982).
4. Muralt P. Micromachined infrared detectors based on pyroelectric thin films // Rep. Prog. Phys. 64, 1339 (2001).
5. Turi L., Kalman P., Toth A. Pyrooptic converter, a new device for wavelength conversion of electromagnetic radiation // Ferroelectrics. 99, 239 (1989).
6. Шут В.Н., Гаврилов А.В., Трубловский В.Л. Пьезоэлектрический преобразователь изображения // Вестник ВГТУ, 2007, №12. С. 136-140.
7. Lueder E. Liquid Crystal Displays. New York: Wiley Series, 2001, 352 p.

8. Косоротов В.Ф., Кременчугский Л.С., Самойлов В.Б., Щедрина Л.В. Пирозлектрический эффект и его практические применения.- Киев: Наук. думка, 1989. - 224 с.

SUMMARY

The investigations of temperature distribution and electric potential in pyroelectric - liquid crystal structure at affect of laser radiation was carried out. The analysis was made on the basis of the numerical decision of the thermal conductivity equations. It has been shown, that pyrosignal reach highest possible value when pyroelectric thickness is close to 20 μm . Spatial resolution of the device increase with raising of chopping frequency of infrared radiation and decreasing of pyroelectric thickness. These devices are perspective for diagnostics of mode structure of IR-lasers.

УДК 339:621

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДИЗАЙНЕРСКИХ РАЗРАБОТОК НА МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ ВИТЕБСКА

Е.В. Белов

В настоящее время на машиностроительных предприятиях г. Витебска организован выпуск товаров народного потребления (ТНП) в достаточно больших объемах. ВИСТАН выпускает более 60-ти наименований ТНП, ВИЗАС - более 30-ти наименований, налажен выпуск ТНП и другими машиностроительными предприятиями Витебска, ВЗЭП выпускает автомобильные насосы, домкраты и т.д., РУП «Механический завод» выпускает ТНП и предметы городского хозяйства, например, урны.

Следовательно, практически все машиностроительные предприятия Витебска заняты в сфере этого производства. В то же время, анализ состояния организации производства по выпуску ТНП показал, что она находится на низком уровне, особенно что касается дизайна внешней формы изделия. Многие образцы ТНП устарели не только физически, но и морально. У выпускаемой заводом ВИСТАН удочки для подледного лова дизайн внешней формы не менялся более 30 лет; о какой конкурентно способности можно говорить при таком дизайне? Выпускаемый РУП «Механический завод» бытовой керосиновый фонарь для сельской местности имеет внешнюю форму, соответствующую пятидесятым годам прошлого века. При этом не изменился не только дизайн, но технология производства.

Анализ компьютерных программ, используемых на производстве, показал, что ни на одном из них не используются графические пакеты прикладных программ, позволяющие прорабатывать дизайн внешней формы разрабатываемых образцов ТНП.

В то же время существующие в настоящее время программы, такие как 3Ds Max и CorelDRAW, Autodesk Inventor позволяют вести разработку дизайна внешней формы не только на плоскости, но и в объеме, кроме того, эти программы позволяют разрабатывать не только внешнюю форму и цветовую гамму объекта, но и, что особенно важно, передавать фактуру материала в зависимости от метода его обработки или получения. Использование этих программ значительно расширяет возможности дизайнера, так как позволяет проработать значительно больше возможных вариантов решения поставленной задачи.

Особое внимание при разработке дизайна внешней формы ТНП следует обращать на важнейшие категории композиции - тектонику, поскольку именно эта категория связывает воедино материал, работу несущей основы конструкции и метод изготовления, так как практически каждый метод изготовления позволяет раскрыть фактуру материала особым, характерным только для него способом.