

16. Sviridov E. V., Mukhortov V. M., Golovko Y. I. et al. // Sov. Tech. Phys. Lett.—1983.—9.—P. 72.
17. Kushida K. and Takeuchi H. // Jpn. J. Appl. Phys.—1985.—24-2.—P. 407.
18. Iijima K., Tomita Y., Takayama R. and Ueda T. // J. Appl. Phys.—1986.—60.—P. 361.
19. Okuyama M., Ueda T. and Hamakawa Y. // Jpn. J. Appl. Phys.—1985.—24-2.—P. 619.
20. Matsubara S., Miura S., Miyasaka Y. and Shohata N. // J. Appl. Phys.—1989.—66.—P. 5826.
21. Hecq H. and Hecq A. // J. Vac. Sci. Technol.—1981.—18.—P. 219.

Поступила в редакцию 4 января 1991 г.

УДК 621.383:537.226.82

Т. С. Дубровская, В. В. Михневич, И. П. Потапенко,
С. Р. Сырцов

(Витебск)

СЕНСИТОМЕТРИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯТОРА СВЕТА НА ОСНОВЕ СТРУКТУРЫ ПИРОЭЛЕКТРИК—ЖИДКИЙ КРИСТАЛЛ

В последние годы наблюдается повышенный интерес к исследованию параметров пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) для среднего и дальнего ИК-диапазонов длин волн на основе структуры пироэлектрик — жидкий кристалл (ПЭ — ЖК) [1—3]. Это объясняется перспективностью данной структуры в плане использования ее в качестве основного узла малогабаритных неохлаждаемых тепловизионных приборов, что позволит значительно упростить их конструкцию и уменьшить массогабаритные характеристики за счет исключения систем сканирования и охлаждения. Несмотря на это, целенаправленных исследований по влиянию параметров пироэлектрического и жидкокристаллического слоев на электрооптические характеристики указанных структур до настоящего времени выполнено не было.

Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию частотных и сенситометрических характеристик оптоэлектронной пары на основе структуры пироэлектрик — жидкий кристалл.

Теория. Функционирование ЖК-ячейки в оптоэлектронной паре (рис. 1) описывается стандартным образом: ее оптический отклик зависит от природы используемого в ЖК эффекта — ориентационного (*S*-, *B*-, "твист"-эффект) или электрогидродинамического — и определяется лишь частотой *f* модуляции ИК-излучения и величиной напряжения *U*, генерируемого на ячейке, в результате облучения пироэлектрика. Поэтому анализ действия оптопары ПЭ — ЖК может быть проведен на основе известной теории пироэлектрических приемников излучения [1], где роль нагрузки выполняет ЖК-ячейка.

Величина напряжения *U* при падении на ПЭ потока ИК-излучения $\Phi = \Phi_0 \sin 2\pi f t$ (Φ_0 — амплитуда потока) определяется выражением

$$U = \frac{\alpha R_1 \gamma W s_1}{d \sqrt{1 + (\omega \tau_e)^2}} \cos(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

где $\tau_e = R_1(C_1 + C_2)$; $W = \Phi_0/s_1$; s_1, d — соответственно площадь и толщина пироэлектрика; $\omega = 2\pi f$; R_1 — сопротивление ЖК; C_1, C_2 —

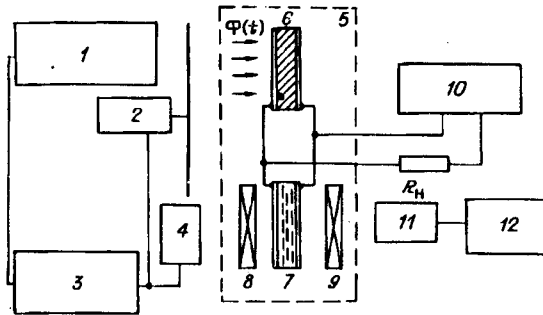


Рис. 1. Схема проведения эксперимента:
 1 — черное тело; 2 — модулятор; 3 — блок питания; 4 — осветитель; 5 — оптопара ПЭ—ЖК; 6 — пироэлектрик; 7 — ЖК-ячейка; 8 — поляризатор; 9 — анализатор; 10 — блок питания; 11 — ФЭУ; 12 — усилитель

емкость ПЭ и ЖК; γ — пироккоэффициент; $\varphi = \omega H/G$; H — теплоемкость образца; α — поглощательная способность облучаемой поверхности пироэлектрика.

Выражение (1) получено в предположении $\omega\tau \gg 1$, которое верно в широком интервале величин d и f [1] ($\tau = H/G$ — время термической релаксации кристалла; G — суммарный коэффициент теплопотерь).

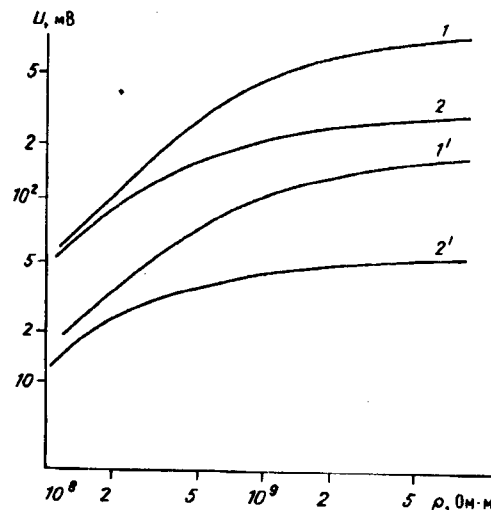
Вольт-ваттная чувствительность системы $S = \partial U/\partial W$ определяется при этом соотношением

$$S = \begin{cases} \alpha M_1 \rho a s_1 / d s_2, & \omega\tau_e \ll 1; \\ \alpha M_2 C_1 / \omega(C_1 + C_2), & \omega\tau_e \gg 1, \end{cases} \quad (2)$$

в котором $M_1 = \gamma/h$, $M_2 = \gamma/\epsilon_0 \epsilon_1 h$ — критерии качества пироэлектрического материала [4]; ρ — удельное сопротивление ЖК; s_2 — площадь ЖК; h — удельная объемная теплоемкость пироэлектрика. Из анализа выражений (1), (2) следует, что для улучшения пороговых характеристик оптопары необходимо использование ЖК-ячеек с высокоомным жидким кристаллом и максимально возможной толщиной a (если, конечно, это не приводит к ухудшению вольт-контрастных характеристик ячейки). Этому же способствует уменьшение частоты модуляции падающего излучения. Соответствующие зависимости U от удельного сопротивления ЖК при разных частотах модуляции представлены на рис. 2.

В свою очередь, уменьшение толщины пироактивного слоя также способствует увеличению чувствительности структуры. Как следует из (2), максимальная величина вольт-ваттной чувствительности достигается при толщинах $d < d_* = a\epsilon_1/\epsilon_2$ (ϵ_1 и ϵ_2 — диэлектрическая проницаемость ПЭ и ЖК), когда $C_1 > C_2$. Значения S_{\max} и d_* для наиболее часто используемых на

Рис. 2. Зависимость U от удельного сопротивления ЖК для ТГС (1, 2) и LiTaO₃ (1', 2'); $d = 50$ мкм; $E_2 = 5$; $W = 10^{-3}$ Вт/см²; $s_1 = s_2 = 1$ см² (1, 1' — $f = 1$; 2, 2' — 5 Гц)



**Значения вольт-ваттной чувствительности и критической толщины
для широко используемых пьезоэлектриков**

Параметры	LiTaO ₃	ТГС	ТГФБ	ЦТСЛ	PVF ₂
S_{\max} , В/Вт · см ²	350	800	1600	70	150
d^* , мкм	50	30	25	500	5

Примечание. ТГФБ — триглицинфторбериллат, ЦТСЛ — керамика титаната цирконата свинца, легированная лантаном, PVF₂ — поливинилиденфторид.

практике пьезоэлектрических кристаллов при частоте модуляции $f = 1$ Гц и параметрах ЖК-слоя $a = 10$ мкм, $\epsilon_2 = 10$ представлены в таблице.

Как известно [2], для эффективного использования ЖК в качестве электрооптической среды в ПВМС необходимо осуществление модуляции напряжения на ЖК-слое ≈ 100 мВ. Полученные результаты показывают, что эффективное функционирование ПВМС на основе структуры ПЭ — ЖК возможно лишь на частотах $f \leq 10$ Гц и при интенсивностях падающих потоков ИК-излучения порядка 10^{-3} Вт/см². В режиме регистрации изменения светового потока, проходящего через ЖК-ячейку с помощью ФЭУ и при достаточно большом соотношении площадей s_1/s_2 , возможна регистрация ИК-излучения интенсивностью $W = 10^{-6}$ Вт/см².

Эксперимент. Схема эксперимента представлена на рис. 1. В качестве ПЭ-элемента использовались полированные пластины LiTaO₃ и ТГС, легированного $L - \alpha$ -аланином толщиной $d = 100$ — 400 мкм. Никелевые электроды (толщиной 30 нм) наносились методом вакуумного напыления. Для более качественного и равномерного поглощения ИК-излучения в широком диапазоне длин волн производилось чернение одного из электродов. Источником ИК-излучения служило черное тело (ЧТ) с площадью отверстия диафрагмы $A = 0,5$ см². Величина облученности на пьезоэлементе оценивалась по формуле

$$W = \sigma(T^4 - T_0^4)A/2\sqrt{2}\pi l^2,$$

где l — расстояние между плоскостью диафрагмы ЧТ и плоскостью пьезоэлемента; T_0 — температура окружающей среды; σ — постоянная Стефана — Больцмана. Температура ЧТ менялась от комнатной до $T = 600$ °С, что позволяло проводить исследования при уровнях облученности ПЭ $W = (10^{-5} - 10^{-3})$ Вт/см².

Показанная выше целесообразность использования жидких кристаллов с большим удельным сопротивлением делает необходимым применение ячеек, работающих на основе ориентационных электрооптических эффектов. В работе исследовались ячейки с существенно различающимися площадями, работающие на "твист"-эффекте. Наряду с заводской ячейкой площадью $s = 0,5$ мм² (ЖК-марки 807, $a = 10$ мкм, $U_{\text{пор}} = 1,5$ В, контраст 1 : 10), исследования проводились на ячейке площадью 1 см² ($a = 10$ мкм, $U_{\text{пор}} = 1,5$ В, контраст 1 : 5, ЖК-марки 1652). Ячейка изготавливалась по стандартной технологии с нанесением ориентирующих покрытий методом косоугольного напыления. К ЖК-ячейке через нагрузочное сопротивление $R_H = 6 \cdot 10^{10}$ Ом подводилось постоянное напряжение $U =$

(см. рис. 1). Выбором амплитуды напряжения питания рабочая точка ЖК-ячейки устанавливалась на соответствующем участке склона вольт-контрастной характеристики.

Приведенные выше теоретические оценки показывают, что в исследуемом диапазоне интенсивностей ИК-излучения эффективное изменение электрооптических характеристик ЖК-ячеек возможно лишь при низких частотах модуляции $f \leq 10$ Гц, когда $f < 1/\tau$ (τ — характерное время реакции ЖК на действие поля). В этом случае ячейка в конце каждого периода модуляции успевает вернуться в начальное состояние, т. е. наблюдается эффект мерцания. Это затрудняло визуальную оценку изменения контрастности ячейки. Поэтому реакция ЖК-ячейки оценивалась по переменному сигналу, снимаемому с ФЭУ. На рис. 3 представлена зависимость изменения контраста ячейки от частоты модуляции излучения f при облученности пироэлектрика $W = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Вт/см² ($T = 500$ °С, $l = 20$ см) для обеих ячеек.

Зависимость изменения контраста ячейки от интенсивности ЖК-излучения, падающего на ПЭ, представлена на рис. 4.

Пороговая чувствительность структуры оценивалась визуально по уровню 4 %-ного изменения контраста и составляла $W_* = 4 \cdot 10^{-4}$ Вт/см² при частоте модуляции $f = 1$ Гц. Чувствительность структуры, оцененная по уровню шумов ФЭУ, $W_* = 10^{-6}$ Вт/см². С повышением частоты модуляции ИК-излучения чувствительность падает (см. рис. 4). При частотах модуляции $f \approx 20$ Гц использование структур ПЭ — ЖК в ПВМС, работающих в диапазоне среднего и дальнего ИК-излучения, возможно при потоках $W \geq 10^{-3}$ Вт/см².

Заметим, что низкие частоты модуляции ограничивают пространственное разрешение системы несколькими линиями на миллиметр.

Заключение. Проведенные в работе экспериментальные исследования частотных и сенситометрических характеристик оптоэлектронной пары на основе структуры ПЭ — ЖК подтвердили выводы теоретических расчетов о возможности использования таких структур в жидкокристаллических ПВМС среднего ИК-диапазона, функционирующих на частотах $f \leq 10$ Гц и при уровнях облученности $W \approx 10^{-3}$ Вт/см². Это делает перспективным их использование в системах диагностики ИК-лазеров и при создании тепловизионных систем для наблюдения высокотемпературных объектов

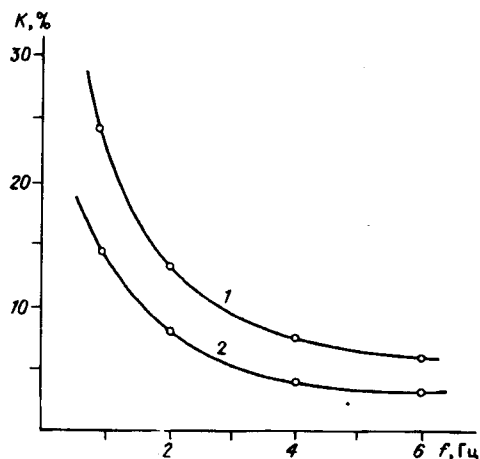


Рис. 3. Зависимость изменения контраста ЖК-ячейки от частоты модуляции для LiTaO₃:

$$R_1 = 6 \cdot 10^9 \text{ Ом (1)}, R_1 = 3 \cdot 10^8 \text{ Ом (2)}$$

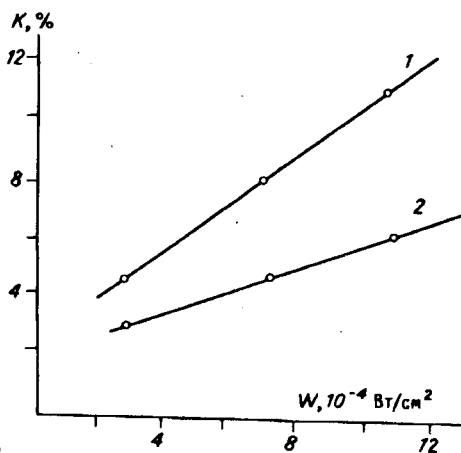


Рис. 4. Зависимость изменения контраста ЖК-ячейки от интенсивности падающего ИК-излучателя для LiTaO₃ при частотах 1 (1) и 5 Гц (2)

($\Delta T = 50^\circ\text{C}$). Использование указанных структур в тепловизионных системах для наблюдения низкотемпературных объектов ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$) без введения в структуру дополнительных усилительных слоев проблематично. Поэтому конкурентоспособность указанных структур по сравнению с традиционно применяемыми в тепловидении существенно зависит от решения этой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вашурин П. В., Дергачев Д. Н., Компанец И. Н. и др. Пространственно-временной модулятор света на основе структуры "пирозлектрик — 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. Петин Б. Ф. Твердотельный преобразователь теплового изображения // Труды МВТУ.—1989.—79, N 519.
4. Кременчугский Л. С., Ройцина О. В. Пирозлектрические приемные устройства.— Киев: Наук. думка, 1982.

Поступила в редакцию 25 декабря 1990 г.
