

03; 12

ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА $\lambda = 1.06$ мкм С ЭЛЕКТРО- И СВЕТОУПРАВЛЯЕМЫМИ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ МОДУЛЯТОРАМИ

М. А. Грознов, В. С. Мыльников, Н. И. Плетнева

Исследовано изменение контрастно-временных характеристик модулятора света типа халькогенидный стеклообразный полупроводник—жидкий кристалл (ХСП—ЖК) под действием рабочих значений плотностей энергии считывающего импульсного излучения лазера на АИГ: Nd^{3+} . Основными причинами изменения характеристик являются нагрев жидкого кристалла благодаря поглощению излучения фоточувствительным слоем и проводящими электродами и фотогенерация носителей заряда в ХСП, приводящая, в частности, к ограничению реверсивности ПВМС на уровне нескольких герц. Характерные времена отклика модулятора не превосходят 1 мс при нагреве и 1 с при фотогенерации.

Введение

Целью данной работы было исследование лучевых стойкостей и основных причин изменения контрастно-временных характеристик электро- и светоправляемых жидкокристаллических ПВМС [¹⁻⁶] под действием импульсного излучения на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм при длительностях импульсов генерации $\tau_I = 20$ нс и $\tau_{II} = 100$ мкс.

Объекты исследования и техника эксперимента

В качестве электроуправляемых ПВМС использовались ЖК ячейки на S - и T -эффектах толщиной 2—3 мкм. Они представляли собой планарно ориентированный жидкий кристалл (смесь цианобифенилов с $\Delta\epsilon = 12$, $\Delta n = 0.22$, $\Delta T = -0-59$ °C [⁷], заключенный между стеклянными подложками с ориентирующими покрытиями из GeO и прозрачными электродами из In_2O_3 (10 % SnO_2), к которым прикладывалось постоянное управляющее напряжение. Светоправляемые ПВМС (на T -эффекте) состояли из пленки халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) $\text{As}_{10}\text{Se}_{90}$ толщиной 2 мкм и жидкого кристалла (аналогичного описанному выше) толщиной 2—3 мкм. Все исследуемые образцы располагались между скрещенными поляризаторами.

В качестве источника воздействующего излучения на $\lambda = 1.06$ мкм использовался лазер на АИГ: Nd^{3+} , частоту F_{ν} следования импульсов и плотность энергии W генерации которого можно было изменять соответственно от 1 до 20 Гц и от 10^{-2} до 40 Дж/см². Излучение фокусировалось на исследуемые образцы и имело площадь пятна S от 10^{-1} до 10^{-4} см². Электрооптические и временные характеристики ПВМС (при изменении W и τ) определялись с помощью калиброванного фотоприемника, который располагался за выходным поляризатором (анализатором) и регистрировал изменение величины пропускания модулятора на $\lambda = 0.63$ мкм (считывающее излучение He—Ne лазера).

Результаты измерения лучевых стойкостей различных слоев, входящих в состав ХСП-ЖК модуляторов, представлены на рис. 1. Эксперименты показали, что лучевые стойкости, определяемые порогом оптического разрушения (ОР), составляли для различных элементов от 0.5 (для ХСП) до 7 Дж/см² (для

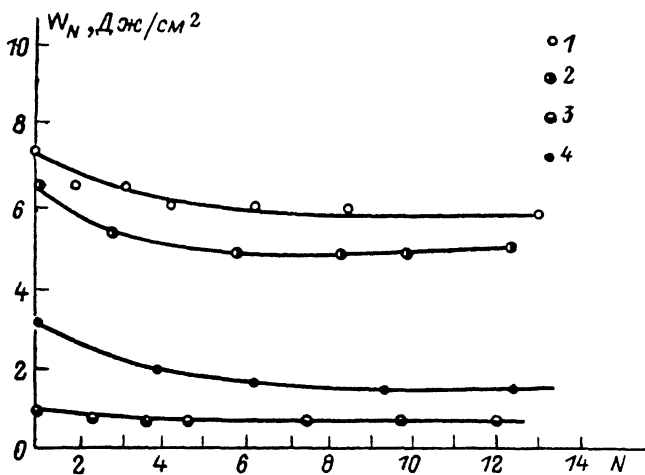


Рис. 1. Зависимость порога разрушения W_N от количества импульсов излучения N для ХСП-ЖК модулятора при $S=5 \cdot 10^{-3}$ см², $\tau=20$ нс.

1 — электроды, 2 — ориентант на электроде, 3 — фотополупроводник, 4 — ХСП-ЖК модулятор.

прозрачных электродов с ориентантами), при этом величины W_N практически не менялись для $N \geq 10$. На рис. 2 приведена зависимость порога оптического разрушения жидкокристаллических ячеек от количества N , частоты F_N и плотности энергии W импульсов генерации. Пороги разрушения ЖК ячеек без электродов (присутствует только ориентант GeO) были в 3 раза выше, чем ячеек с электродами, причем при росте F_N с 10 до 20 Гц разрушение происходило при меньшем (в ~ 4 раза) количестве импульсов. В экспериментах наблюдалась близость значений порогов ОР для прозрачных проводящих покрытий (нанесенных на подложки К-8) и ЖК ячеек. Обнаружено, что пороги ОР для ЖК ячеек уменьшаются в 2 раза при увеличении частоты следования импульсов генерации с 1 до 20 Гц и возрастают в 2.5 раза при уменьшении площади элемента сканирования S с $5 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ см².

Согласно [8], под действием больших интенсивностей света в ЖК ячейке должна происходить по-

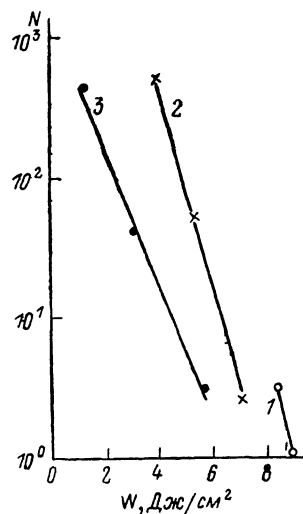


Рис. 2. Зависимость порога разрушения W_N жидкокристаллических ячеек от W , F_N и N .

F_N , Гц: 1 — 1, 2 — 10, 3 — 20. $S=2 \cdot 10^{-3}$ см², $\tau=20$ нс.

роговая переориентация молекул жидкого кристалла при неадиабатических деформациях, названная светоиндуцированным переходом Фредерикса (СПФ). Однако в проведенных экспериментах СПФ не наблюдался вплоть до интенсивностей, соответствующих порогу разрушения электродов и ориентантов ($I \leq 0.3$ ГВт/см²).

Характерные временные зависимости изменения пропускания T светуправляемого ПВМС при воздействии одиночного импульса света с длительностью

τ_I и τ_{II} представлены соответственно на рис. 3, а, б. Будем называть оптическим откликом процесс изменения T модулятора под действием излучения на $\lambda = 1.06$ мкм, приводящий к появлению одного из экстремумов (минимумов) в динамике пропускания ПВМС. Как видно из рис. 3, наблюдается два вида откликов (1 и 2):

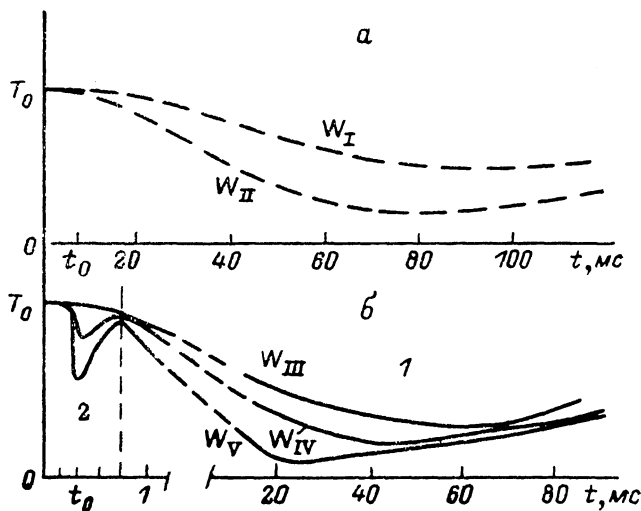


Рис. 3. Динамика пропускания ПВМС под действием одиночного импульса генерации с плотностью энергии \bar{W} ($W_I < W_{II} < W_{III} < W_{IV} < W_V$), приходящего в момент времени t_0 .

Пунктир — $\tau = \tau_I$, сплошные кривые — $\tau = \tau_{II}$; T_0 — начальное пропускание ПВМС; $S = 10^{-1} \text{ см}^2$.

На рис. 4 приведена зависимость контраста K модулятора от плотности энергии W воздействующего импульсного излучения. Максимальный контраст вычислялся из соотношения

$$K_m = T_0 / T_m, \quad (1)$$

где $m=1, 2$ — номера откликов; T_0 и T_m — соответственно начальное и минимальное пропускание ПВМС (рис. 1).

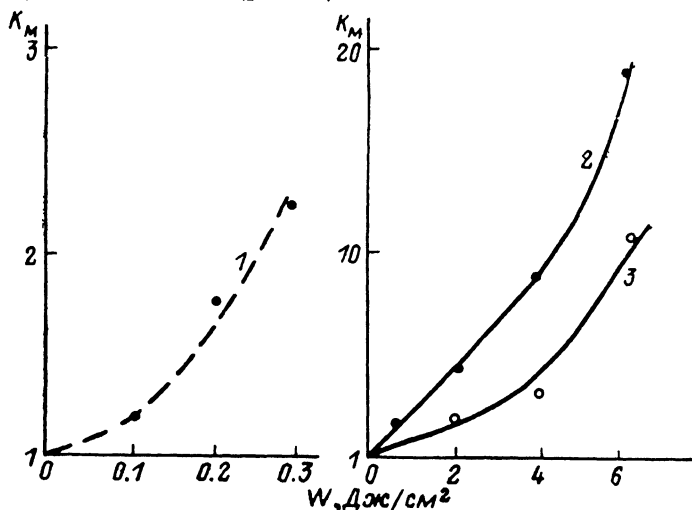


Рис. 4. Зависимость K_1 (1, 2) и K_2 (3) от W .

Пунктир — $\tau = \tau_I$, сплошная кривая — $\tau = \tau_{II}$.

Эксперименты показали, что рабочие значения W_p (т. е. не вызывающие необратимой деградации слоев ПВМС) составили менее 3 Дж/см² в режиме свободной генерации и около 0.2 Дж/см² в моноимпульсном режиме работы

лазера на АИГ: Nd^{3+} . При данных плотностях энергий наработка на частоте в 1 Гц в сериях по 100—200 импульсов не приводила к появлению необратимых изменений в характеристиках модулятора. Полученные значения рабочих плотностей энергий W_p в ~ 5 раз лучше, чем аналогичные значения, достигнутые при работе с ПВМС с фоточувствительным слоем $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$ [4, 6]. Порог оптического разрушения $\text{As}_{10}\text{Se}_{90}$ —ЖК за 1 импульс с вероятностью 50 % происходил при $W \approx 3$ Дж/см² для $\tau \approx \tau_I$ и при $W \approx 8$ Дж/см² для $\tau \approx \tau_{II}$.

На рис. 5 представлена зависимость времен включения и выключения модулятора, соответствующих оптическому отклику I , от плотности энергии на $\lambda=1.06$ мкм. Под временем включения или выключения $t_{вкл}$, $t_{выкл}$ понималось время, в течение которого контраст ПВМС увеличивался от $K=1$ до $K=0.9K_m$ или соответственно уменьшался от $K=K_m$ до $K=0.1K_m$ его экстремальных значений. Для оптического отклика 2 длительность импульса свободной генерации определяла его время включения. При этом время выключения отклика составляло 100—300 мкс.

Анализ полученных результатов

Дополнительные исследования показали, что спектры пропускания $T=T(\lambda)$ для различных слоев, входящих в состав ПВМС, с точностью до френелевских потерь на стеклянных подложках составляют не менее 80—95 % на $\lambda=1.06$ мкм, причем имеется явно выраженный рост $T(\lambda)$ при увеличении λ от 0.3 до 1.1 мкм. Наиболее низкой лучевой стойкостью на $\lambda=1.06$ мкм обладает, как и можно было ожидать [9], фоточувствительный слой ~ 0.5 Дж/см², что ограничивает возможный диапазон применений ПВМС на основе ХСП (рис. 1).

В проведенных экспериментах наблюдалась близость порогов ОР для прозрачных проводящих покрытий (нанесенных для исследования на подложки из стекла $K=8$) и ЖК ячеек, что свидетельствует об определяющей роли In_2O_3 (10 % SnO_2) в величине лучевой стойкости электроуправляемых ПВМС. Подтверждением вышеизложенного является расчет (выполненный без учета теплоотвода за время действия импульса излучения и в предположении однородного по рабочей апертуре ячейки поглощения) величины ОР электродов W_1^T , происходящего за счет лазерного нагрева, результаты которого сравнимы с экспериментальными данными (рис. 2)

$$W_1^T = \frac{1}{\alpha a} \left(\frac{E}{S} \right) = \frac{c\rho T^0}{\alpha} \geq 10 \text{ Дж/см}^2, \quad (2)$$

где $c=0.73 \cdot 10^3$ Дж/град·кг — теплоемкость; $\alpha=100$ см⁻¹ — коэффициент поглощения; $\rho \approx 3 \cdot 10^3$ кг/м³ — удельная плотность и $a=0.1$ мкм — толщина электрода; $T \geq 500$ °C — температура, при которой происходят необратимые изменения в In_2O_3 (10 % SnO_2); E — поглощенная электродом энергия.

Для теоретической оценки пороговой интенсивности $I_{\text{пор}}$, вызывающей СПФ в тонких ($d=2-5$ мкм) ЖК ячейках, была использована выведенная в [10] формула

$$T_{\text{пор}} = \frac{1555 \cdot V}{n_1^2 - n_1^2} n_{\parallel} K_{22} \left(\frac{n_{\parallel} - n_{\perp}}{\lambda} \right)^4 d^2 \approx 3-15 \frac{\text{МВт}}{\text{см}^2}, \quad (3)$$

где $V=3 \cdot 10^8$ м/с — скорость света, $n_{\parallel}=1.62$ и $n_{\perp}=1.44$ — соответственно для $\lambda=1.06$ мкм показатели преломления в направлении вдоль и перпендикулярно директору, $K_{22} \approx 5 \cdot 10^{-12}$ Н — константа упругости.

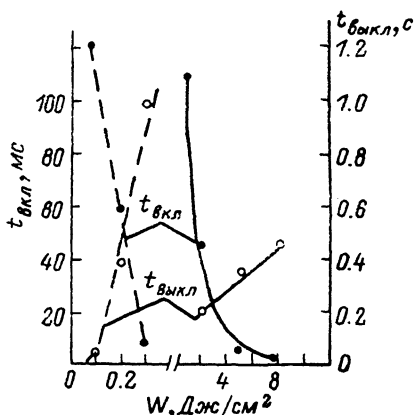


Рис. 5. Зависимость $t_{вкл}$ и $t_{выкл}$ от W для отклика I.
Пунктир — $\tau = \tau_I$, сплошная кривая — $\tau = \tau_{II}$.

Однако в проведенных экспериментах СПФ не наблюдалась вплоть до интенсивностей $I \leq 0.3$ ГВт/см², поэтому теоретическую формулу (3) не следует использовать для оценки порога СПФ в тонких ЖК ячейках, хотя для рассматриваемого выше случая было выполнено необходимое условие применимости этой формулы [10]

$$d > \lambda/6.3 \cdot (n_{\parallel} - n_{\perp}). \quad (4)$$

На основании анализа контрастно-временных характеристик ХСП—ЖК модуляторов можно утверждать, что появление отклика I вызвано фотогенерацией носителей заряда в ХСП (за время действия импульсного излучения) которая приводила к перераспределению напряжения в сэндвиче ПВМС в сторону его увеличения на ЖК. При этом заметное изменение величины контраста K_1 наблюдается при довольно больших экспозициях излучения на $\lambda=1.06$ мкм, например, $K_1=2$ при $W \approx 0.2$ Дж/см² (рис. 4). Это связано с тем, что область максимальной фоточувствительности ХСП соответствует $\lambda=450-550$ мкм, а при переходе в более длинноволновую область спектра происходит резкое уменьшение величины квантового выхода этого фоточувствительного слоя [11]. Уменьшение $t_{\text{вкл}}$ и увеличение $t_{\text{выкл}}$ с ростом W (рис. 5) отражают процесс увеличения количества фотогенерируемых носителей заряда, благодаря которым осуществляется модуляция ЖК.

Отклик 2 появлялся только во время действия на ПВМС импульса свободной генерации ($\tau \approx 100$ мкс) и был обусловлен нагревом ЖК при поглощении излучения фоточувствительным слоем и проводящими покрытиями. Подобные устройства (нагреваемый элемент—жидкий кристалл) широко используются в качестве визуализаторов инфракрасного излучения [5] и селективных зеркал, работающих на принципе изменения шага спирали холестерического ЖК при нагревании [12]. Подтверждением вышеизложенного механизма появления отклика 2 является совпадение временных ($t_{\text{вкл}}=100$ мкс и $t_{\text{выкл}}=300$ мкс) характеристик этого отклика с характерными временами тепловой релаксации t_p^T жидкого кристалла [12]

$$t_p^T \approx d_0^2/k \approx 40-100 \text{ мкс}, \quad (5)$$

где $d_0=4 \cdot 10^{-6}$ м — общая толщина ХСП и ЖК слоев, $k=1 \cdot 10^{-7}$ м²/с — коэффициенты температуропроводности для жидкокристаллических [13] и стеклообразных материалов [14]. Различие экспериментальных и теоретических значений связано с необходимостью учета при расчетах различных температуропроводностей и толщин ХСП и ЖК слоев, а также геометрического размера освещаемой зоны ПВМС.

Исследования проводились с учетом возможности стыковки ПВМС с усилителями яркости для создания гибридных устройств [15, 16]. На основании результатов работы [11], где были измерены спектральные и люкс-амперные характеристики фоточувствительных слоев $\text{As}_{49}\text{Se}_{52}$, $\text{As}_{20}\text{Se}_{80}$, $\text{As}_{10}\text{Se}_{90}$ и $\text{As}_5\text{Se}_{95}$, выбор был остановлен на $\text{As}_{10}\text{Se}_{90}$. Согласно [15, 16], входная чувствительность усилителя яркости соответствует $\sim 10^{-9}$ Вт/см²; максимальные рабочие значения интенсивностей воздействующего на ХСП—ЖК модулятор излучения на $\lambda=1.06$ мкм составляют

$$I_1 = \frac{W_I^p}{\tau_I} = \frac{0.2 \text{ Дж/см}^2}{20 \text{ нс}} \approx 10^7 \text{ Вт/см}^2 \quad \text{при } \tau = \tau_I,$$

$$I_2 = \frac{W_{II}^p}{\tau_{II}} = \frac{3 \text{ Дж/см}^2}{100 \text{ мкс}} = 3 \cdot 10^4 \text{ Вт/см}^2 \quad \text{при } \tau = \tau_{II}. \quad (6)$$

Поэтому коэффициенты усиления по яркости гибридного устройства, считывая с которого будет осуществляться излучением лазера на АИГ: Nd^{3+} , составят 10^{13} и 10^{16} соответственно при работе лазера в режимах свободной генерации и модулированной добротности. Полученные значения на несколько порядков (3—6) выше максимальных коэффициентов усиления, которые были достигнуты при непрерывном считывании [15].

Выводы

1. Замена ХСП с $As_{20}Se_{80}$ на $As_{10}Se_{90}$ (последний имеет меньшую фоточувствительность в ближней ИК области) позволяет почти в 5 раз повысить рабочие значения считывающего излучения на $\lambda=1.06$ мкм, что составляет для режима свободной генерации ($\tau=100$ мкс) 3 Дж/см² и для режима модулированной добротности ($\tau=20$ нс) 0.2 Дж/см². Импульсное считывание с гибридных устройств, в которых используется ХСП—ЖК модулятор, позволяет увеличить на 3—6 порядков коэффициент усиления по яркости (считываемых с этих устройств изображений) по сравнению с традиционным непрерывным считыванием.

2. Для ЖК ячеек при $\tau=20$ нс установлено, что пороги оптического разрушения ячеек уменьшаются в 2 раза при увеличении частоты следования импульсов генерации с 1 до 20 Гц и возрастают в 2.5 раза при уменьшении элемента сканирования с $5 \cdot 10^{-3}$ до $2 \cdot 10^{-4}$ см². Самым легкоразрушаемым слоем в электроуправляемых ПВМС являются прозрачные электроды.

3. Основными причинами изменения контрастно-временных характеристик модулятора под действием импульсного излучения являются нагрев жидкого кристалла благодаря поглощению излучения ХСП и проводящими электродами и фотогенерация носителей заряда в $As_{10}Se_{90}$, приводящая, в частности, к ограничению реверсивности ПВМС на уровне нескольких герц. Характерные времена изменения характеристик модулятора под действием нагрева и фотогенерации не превосходят соответственно 1 мс и 1 с.

Авторы благодарны Л. Н. Сомсу и А. П. Онохову за ценные замечания, высказанные ими при просмотре рукописи.

Литература

- [1] Сизарулидзе Д. Г., Чилая Г. С., Бродзели М. И. // Квантовая электрон. 1979. Т. 6. С. 1271—1277.
- [2] Stephen B., Jacobs D. // SPIE. Polarizers and Application. 1981. Vol. 307. P. 98—105.
- [3] Думаревский Ю. Д., Ковалюк Н. Ф., Савин А. И. Преобразование изображений в структурах полупроводник—диэлектрик. М.: Наука, 1987. 176 с.
- [4] Владимиров Ф. Д., Грознов М. А., Покровский В. П. // Тез. докл. I Всесоюз. конф. «Теоретическая и прикладная оптика». Л., 1984. С. 122—123.
- [5] Картужанский А. Л. Несеребряные фотографические процессы. Л.: Химия, 1984. 375 с.
- [6] Владимиров В. Л., Грознов М. А., Еременко А. С. и др. // Квантовая электрон. 1985. Т. 12. № 10. С. 2071—2076.
- [7] Плетнева Н. И., Моричев И. Е., Владимиров Ф. Л., Басяева Л. И. // Квантовая электрон. 1983. Т. 10. № 9. С. 1892—1895.
- [8] Аракелян С. М., Чилингарян Ю. С. Нелинейная оптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1984. 360 с.
- [9] Харченко А. А., Мыльников В. С. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 11. Вып. 6. С. 280—283.
- [10] Аракелян С. М., Кароян А. С., Чилингарян Ю. С. // Опт. и спектр. 1983. Т. 55. Вып. 4. С. 675—678.
- [11] Аверьянов В. Л., Карпова Л. Н., Коломиец Б. Т. и др. // ФТД. 1972. Т. 6. Вып. 9. С. 1709—1714.
- [12] Зельдович Б. Я., Табириян Н. В. // Квантовая электрон. 1984. Т. 11. № 12. С. 2419—2426.
- [13] Блинов Л. И. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.
- [14] Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- [15] Васильев А. А., Касасент Д., Компанец И. Н., Парфенов А. В. Пространственные модуляторы света. М.: Радио и связь, 1987. 320 с.
- [16] Vleha W. P., Lipton L. T., Grinberg J. et al. // Opt. Engineering. 1978. Vol. 17. N 4. P. 371—384.

Ленинградский механический институт

Поступило в Редакцию
29 декабря 1987 г.
В окончательной редакции
1 сентября 1988 г.