

МОДУЛЯТОР НА ОСНОВЕ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СМЕКТИКА, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ НАРУШЕННОЕ ПОЛНОЕ ВНУТРЕННЕЕ ОТРАЖЕНИЕ

А. Л. Андреев, А. В. Парфенов, Е. П. Пожидаев, В. Г. Чигринов

Исследован модулятор оптического излучения, основанный на явлении полного внутреннего отражения на границе сегнетоэлектрический жидкий кристалл — стекло.

Пространственный модулятор света является одним из важнейших элементов в системах оптической обработки изображений. Использование сегнетоэлектрических жидких кристаллов (СЖК) в качестве модулирующей среды позволяет значительно повысить их быстродействие. В данной работе исследована новая схема модуляции, осуществляемая на основе электрически управляемого нарушения полного внутреннего отражения (ПВО) света на границе СЖК — стеклянная призма.

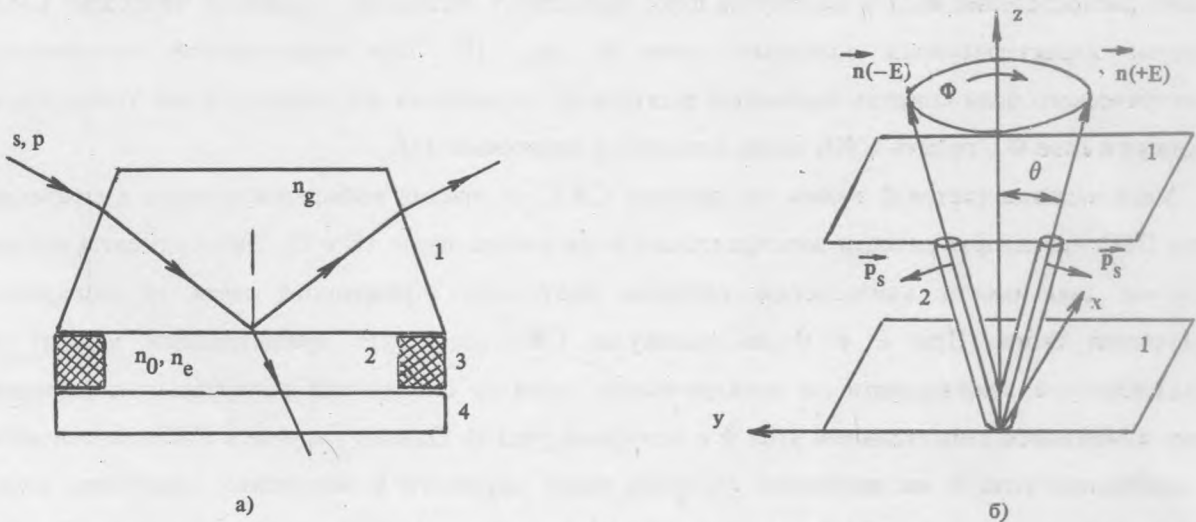


Рис. 1. а) Устройство модулятора: 1 — стеклянная призма, 2 — слой СЖК (n_0 и n_e — показатели преломления для обыкновенного и необыкновенного лучей), 3 — прокладки, задающие толщину слоя СЖК, 4 — стеклянная подложка со встречно-штыревой системой электродов; б) Схема линейного электрооптического эффекта для разных полярностей электрического поля: 1 — смектические слои, 2 — молекула СЖК, n — директор молекулы СЖК.

Модулятор был изготовлен на стеклянной подложке, на поверхность которой наносили встречно-штыревую систему электродов размером 5×5 мм, с шагом 25 мкм и зазором между электродами 16 мкм. В качестве второй подложки использовали призму с показателем преломления

$n_g = 1,735$ (рис. 1 а). Использовали СЖК с шагом спирали $p_0 = 0,38$ мкм и высокой величиной спонтанной поляризации $P_s = 70$ нКл/см². При таком шаге спирали в слое СЖК толщиной до 5 мкм геликоидальная структура сохраняется, так как толщина слоя СЖК $d_s \gg p_0$. Температурный интервал существования смектической фазы C^* у используемого СЖК составлял 5 — 58 °С, угол наклона молекул в слое $\Theta_1 = 22^\circ$, анизотропия показателя преломления $\Delta n = 0,19$, на длине волны 633 нм. Для модуляции использовалось излучение гелий-неонового лазера.

Использовалась гомеотропная ориентация молекул СЖК (ось геликоида перпендикулярна подложкам), которая создавалась с помощью пленки хромолана, нанесенной на обе подложки. Такая геометрия позволяет использовать поперечный электрооптический эффект.

При приложении электрического поля (перпендикулярно оси геликоида) спиральная структура СЖК деформируется, диполи молекул переориентируются вдоль поля. Если в отсутствие поля существовала усредненная по ориентации оптическая ось, совпадающая по направлению с осью геликоида, то в случае деформированной спирали у слоя СЖК появляется двуосность, связанная с нарушением синусоидального распределения по толщине слоя СЖК проекции директора на плоскость смектического слоя: $n(Z) = \sin \Phi(Z) = \sin (2\pi Z/p_0)$. Чем выше напряженность поля, тем ближе распределение $n(Z)$ к одному из двух однородных состояний, в которые переходит СЖК и которые характеризуются полярным углом Θ (рис. 1б). При определенной напряженности электрического поля спираль полностью раскручена, оптическая ось находится под углом наклона молекул в слое Θ_1 , то есть СЖК вновь становится одноосным [1].

Угол падения световой волны на границу СЖК — призма выбирался равным критическому углу ПВО при напряженности электрического поля равной нулю ($E = 0$). Эксперименты показали наличие зависимости анизотропии глубины модуляции отраженного света от поляризации падающего света. При $E \neq 0$ на молекулы СЖК действует вращательный момент сил, обусловленный взаимодействием электрического поля со спонтанной поляризацией. Вследствие этого изменяются азимутальный угол Φ и полярный угол Θ . Однако упругость СЖК по отношению к изменению угла Θ на несколько порядков выше упругости в отношении изменения угла Φ , поэтому в данном случае электрооптический эффект определяется изменением угла Φ . Как видно из рис. 1 б, направления E и P_s должны совпадать, и при перемене полярности электрического поля директор СЖК поворачивается по конусу на угол $\Phi = 180^\circ$. При этом угол Θ изменяется от $-\Theta_1$ до $+\Theta_1$, и анизотропия показателя преломления определяется выражением

$$\Delta n = \frac{n_o n_e}{(n_e^2 \cos^2 \Theta' + n_o^2 \sin^2 \Theta')^{1/2}} - n_o, \quad (1)$$

где $\sin \Theta' = \sin \Theta_1 \sin \Phi$. Для полностью раскрученного геликоида при падении света под углом ПВО

показатель преломления n_e изменяется от 1,62 до 1,73 для разных полярностей электрического поля. Зная шаг геликоида, можно определить усредненную по толщине слоя оптическую анизотропию (1). В данном случае она составила 0,135 при толщине слоя 5 мкм.

Если на границу СЖК — призма падает Р-поляризованная волна, являющаяся для гомеотропно ориентированного СЖК необыкновенной волной, то при одной из полярностей электрического поля она проходит через слой СЖК (при $n_e = n_g$), не испытывая ПВО. При другой полярности поля и в выключенном состоянии Р-волна испытывает ПВО от границы раздела. Напротив, S-поляризованная волна, электрический вектор которой перпендикулярен оптической оси СЖК, испытывает ПВО при обеих полярностях электрического поля и в выключенном состоянии ячейки.

Мощность выходного излучения для Р-поляризации $P_{out} = P_{in} R_e^k$, где P_{in} — мощность падающего излучения, k — число отражений от границы СЖК — призма, R_e — коэффициент отражения для Р-волны:

$$R_e = \left[\frac{1 - \left(\frac{[(n_e - \Delta n_e)^2 - n_e^2]}{(n_g^2 - n_e^2)} \right)^{1/2}}{1 + \left(\frac{[(n_e - \Delta n_e)^2 - n_e^2]}{(n_g^2 - n_e^2)} \right)^{1/2}} \right]^2,$$

Δn_e — изменение показателя преломления для необыкновенной волны.

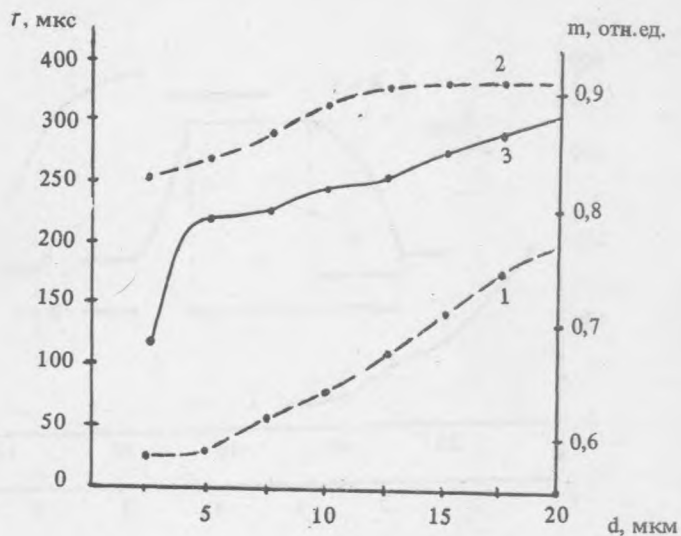


Рис. 2. Зависимость времени нарастания фронта оптического отклика t от толщины слоя СЖК: 1 — линейная часть; 2 — нелинейная часть; 3 — зависимость глубины модуляции τ от толщины слоя СЖК. Управляющее напряжение 45 В (3 В/мкм).

Глубина модуляции излучения при нарушении ПВО экспериментально определялась из соотношения $(R_{\max} - R_{\min}) / (R_{\max} + R_{\min})$, где R_{\max} и R_{\min} — максимальный и минимальный коэффициенты отражения от границы СЖК — стекло, реализуемые на опыте (с учетом рассеяния и т.д.). Толщина слоя СЖК выбиралась из условий достижения максимальной глубины модуляции и минимального времени переключения. Для этого использовалась клиновидная ячейка с толщиной слоя СЖК, изменяющейся от 2 до 20 мкм.

При напряженности электрического поля порядка 2,5 В/мкм, соответствующей области упругой раскрутки спирали СЖК, наблюдался медленный рост глубины модуляции от 0,65 до 0,9 с ростом толщины ячейки (рис. 2). Это, возможно, объясняется тем, что с ростом толщины слоя СЖК улучшается качество текстуры.

На этой же ячейке изучалась динамика оптического отклика, в частности, зависимость времени нарастания фронта оптического отклика от толщины слоя СЖК. При напряжениях, которые приводят к полной раскрутке спирали (80 В, $E = 5$ В/мкм), передний фронт оптического отклика делится на две части: быстрая, почти линейная часть, соответствует упругой раскрутке спирали, вторая более медленная нелинейная часть, ответственная за движение дефектов дехирализации, соответствует замене упругой деформации на пластическую. Для быстрой части фронта зависимость времени оптического отклика от толщины слоя СЖК почти линейная (рис. 3, кривая 1), для медленной части — более пологая (рис. 3, кривая 2).

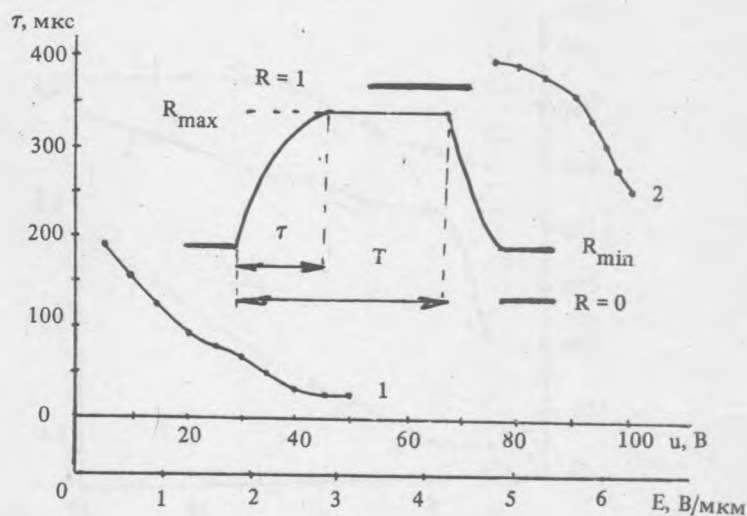


Рис. 3. Зависимость времени нарастания фронта оптического отклика от величины управляющего напряжения: 1 — линейная часть, 2 — нелинейная часть; контраст 5:1. На вставке — форма импульса электрооптического отклика: τ — время включения отклика, T — длительность возбуждающего электрического импульса, R — коэффициент отражения.

При приложении поперечного электрического поля дипольные моменты молекул СЖК начинают переориентироваться вдоль той компоненты электрического поля E , которая лежит в плоскости смектического слоя, то есть происходит искажение молекулярной ориентации, и, соответственно, шаг спирали p начинает увеличиваться по сравнению с равновесным шагом p_0 . Образуются области, где дипольные моменты молекул направлены вдоль поля, но остаются области с противоположной ориентацией дипольных моментов. Эта ситуация соответствует неполной раскрутке спирали (линейная часть оптического отклика). Поляризация слоя СЖК в целом происходит, а двулучепреломление слоя изменяется, как за счет переориентации диполей молекул, так и за счет выталкивания областей с противоположной ориентацией дипольных моментов ($P_s \uparrow \downarrow E$) из объема ячейки. Движение областей с $P_s \uparrow \downarrow E$ (дефектов дехирализации) происходит вдоль оси геликоида. При этом шаг спирали увеличивается, она становится неидеальной. Когда исчезает последний участок с $P_s \uparrow \downarrow E$, то спираль оказывается полностью раскрученной, а оптическая ось располагается под углом наклона молекул в смектических слоях Θ_1 . Движение областей с $P_s \uparrow \downarrow E$ соответствует нелинейной части оптического отклика, их скорость движения зависит от напряженности электрического поля. С увеличением напряженности электрического поля скорость движения дефектов возрастает (рис. 3). Вместе с тем, увеличение толщины слоя СЖК приводит к возрастанию времени оптического отклика и увеличению глубины модуляции (рис. 2).

Как следует из проведенных экспериментов, оптимальная толщина слоя СЖК составляет 5 мкм. При такой толщине слоя СЖК и управляющем напряжении 45 В ($E = 2,5$ В/мкм) модулятор позволяет достичь глубины модуляции порядка 0,85 при времени переключения 25 мкс. В рассматриваемой геометрии (гомеотропная ориентация молекул СЖК) подложки оказывают слабое влияние на упругую энергию, запасенную в деформированной спирали СЖК, что позволяет получить беспороговое переключение. Преимущество данной схемы состоит также в возможности использовать слабые, по сравнению с [2], электрические поля (от 0,1 до 3 В/мкм), получать амплитудную модуляцию без поляроида на выходе и использовать электроды на одной из подложек, что позволяет уменьшить оптические потери.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chigrinov V. G. et al. *Ferroelectrics*, **85**, 302 (1988).
2. Clark N. A., Lagerwall S. T. *Mol. Cryst. & Liq. Cryst.*, **94**, 213 (1983).

Поступила в редакцию 6 декабря 1991 г.