

УДК 532.783

УПРАВЛЯЕМОЕ ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ ДВУЛУЧЕПРЕЛОМЛЕНИЕ В НЕГЕЛИКОИДАЛЬНЫХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

Т. Б. Федосенкова, А. Л. Андреев, Е. П. Пожидаев, И. Н. Компанец

Пространственно-периодические деформации смектических слоев сегнетоэлектрических жидких кристаллов (СЖК) с компенсированным геликоидом являются причиной изменения двулучепреломления и частотной зависимости времени электрооптического отклика СЖК.

Характерный признак любой смектической фазы ЖК – периодичность плотности вдоль направления директора с периодом длины молекулы. Это трактуется как возникновение слоистой упаковки. Если ЖК состоит из хиральных молекул, то в наклонной смектической C^* фазе существует единственный элемент симметрии – полярная ось второго порядка. Вдоль этой оси возможно существование спонтанной поляризации смектического слоя, если молекулы обладают дипольными моментами, перпендикулярными их длинным осям. В отсутствие внешних воздействий полярные оси различных смектических слоев развернуты друг относительно друга (геликоидальная закрутка директора СЖК). При напряженности внешнего электрического поля, меньшего поля раскрутки геликоида, структура слабо деформируется, что приводит к изменению двулучепреломления геликоидального СЖК [1].

В СЖК с компенсированным геликоидом (компенсация достигается введением в ЖК хиральных добавок с противоположными знаками оптической активности) физической причиной изменения показателя двулучепреломления и частотной зависимости времени переориентации директора являются только периодические деформации смектических слоев. Они приводят к периодическим изменениям положения директора в каждом смектическом слое СЖК вдоль направления, ортогонального подложкам (оси y рисунка 1).

Предположим, что в середине смектического слоя молекула, исходно наклоненная на угол θ относительно нормали к слою в данной точке, дополнительно отклоняется

на некоторый угол ψ относительно оси z . Благодаря такой деформации слоя проекция директора на плоскость xy изменяется, и, как следствие этого, изменяется положение эллипсоида показателей преломления. Толщина изогнутого смектического слоя $l = l_0 \cos \theta / \cos \psi$, где l_0 – толщина смектического слоя в параэлектрической фазе.

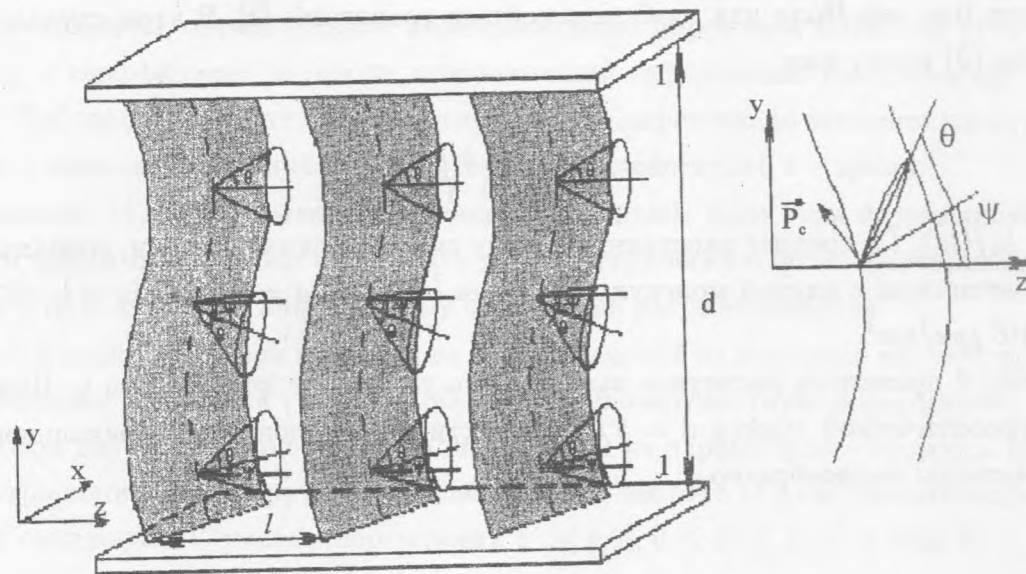


Рис. 1. Структура СЖК с компенсированным геликоидом в электрооптической ячейке. l – толщина смектического слоя, d – толщина СЖК ячейки, P_c – вектор спонтанной поляризации, l – ограничивающие поверхности.

Объемную плотность свободной энергии, связанную с такой деформацией, можно записать как:

$$F = \frac{1}{2}k_0 \left(\frac{d\psi}{dy} \right)^2 - \frac{1}{2}B \left(\frac{l-l_0}{l_0} \right)^2, \quad (1)$$

где k_0 – коэффициент упругости, описывающий деформацию директора по углу ψ ; B – энергия изгиба смектических слоев на единицу объема; $(l-l_0)/l_0$ – относительное изменение толщины смектического слоя. Положение директора СЖК, характеризующееся углом ψ , зависит от координаты y ($0 \leq y \leq d$, где d – толщина СЖК в электрооптической ячейке), причем предполагается, что $\psi(y=0) = \theta$. Минимизируя функционал (1) и произведя нормировку по координате y ($y' = y/d$, $0 \leq y' \leq 1$), с учетом малости углов $\psi \ll 1$, $\theta \ll 1$, получаем

$$\frac{d^2\psi}{dy'^2} + \frac{Bd^2\theta^2}{4k_0}\psi = \frac{Bd^2}{4k_0}\psi^3. \quad (2)$$

Точное решение уравнения (2) записывается через эллиптические функции. Для нахождения решения уравнения (2) в элементарных функциях использовался приближенный метод Ван дер Поля для слабонелинейных уравнений [2]. В этом случае решение уравнения (2) имеет вид:

$$\psi = \theta \cos\left(\frac{5}{16}\theta\sqrt{\frac{B}{k_0}}y\right), \quad (3)$$

где $B = k_0/(\bar{l}d)$, \bar{l} – среднее расстояние между смектическими слоями, совпадающее по порядку величины с длиной молекулы [3]. Если $\bar{l} = 20 \text{ \AA}$, $d = 2 \text{ мкм}$, $k_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Н}$, то $B = 1 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^3$.

На рис. 2 приведена расчетная зависимость угла ψ от координаты y . При толщине электрооптической ячейки $d = 5 \text{ мкм}$ смектические слои негеликоидального СЖК деформированы волнообразно.

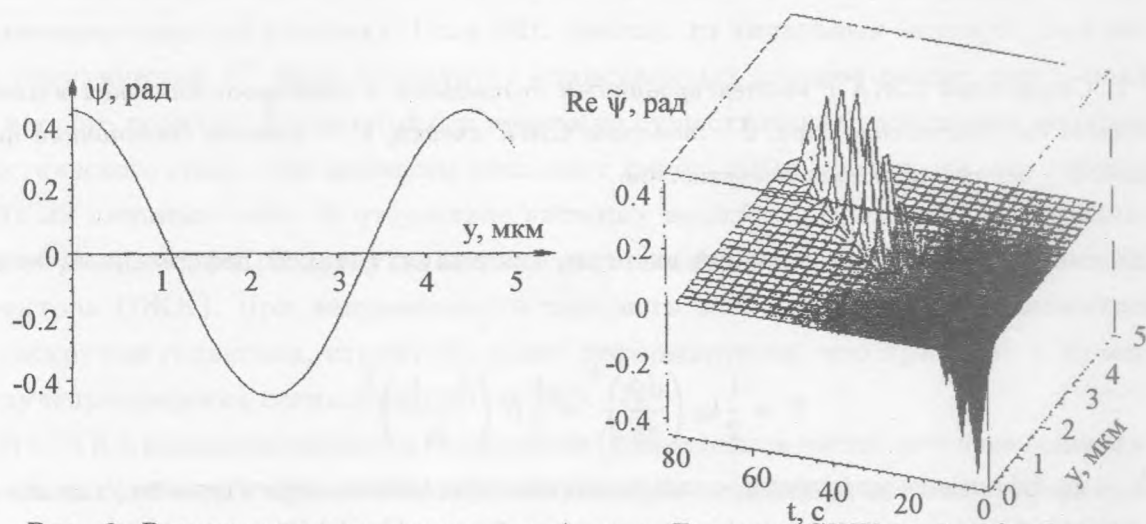


Рис. 2. Расчетная зависимость угла ψ от y . Толщина СЖК ячейки $d = 5 \text{ мкм}$.

Рис. 3. Графическое решение уравнения, описывающего выпрямление смектических слоев СЖК под действием электрического поля при толщине ячейки $d = 5 \text{ мкм}$.

При приложении к ячейке электрического поля смектические слои выпрямляются. Тогда угол ψ определяется из уравнения баланса моментов:

$$\gamma_\psi \frac{\partial \tilde{\psi}}{\partial t} = \frac{k_0}{2} \frac{\partial^2 \tilde{\psi}}{\partial y^2} + \frac{(P_c E \cos \varphi_0 - B)}{8} \tilde{\psi}(\theta^2 - \tilde{\psi}^2), \quad (4)$$

где $\tilde{\psi} = \psi_0 \exp(-i\varphi t)$ – комплексная волновая функция, описывающая состояние некоторого двухкомпонентного поля, причем $\psi = \text{Re}(\tilde{\psi})$; $k_0(\partial^2 \tilde{\psi}/\partial y^2)/2$ и $\gamma_\psi(\partial \tilde{\psi}/\partial t)$ – упругий и вязкий моменты, определяющие переориентацию директора СЖК по углу ψ вдоль оси y ; γ_ψ – коэффициент вязкости, описывающий деформацию смектических слоев по углу ψ ; $P_c E \cos \varphi_0$ – момент сил, действующих на директор во внешнем электрическом поле; φ_0 – начальный азимутальный угол подвеса молекулы; t – время.

Уравнение (4) не учитывает изменение во внешнем поле угла θ , что является корректным вдали от фазового перехода в параэлектрическую фазу. Переориентация директора СЖК по азимутальному углу φ также не рассматривается.

Пусть в момент времени $t = 0$, когда $E = 0$, на одной из подложек $\tilde{\psi}(t = 0, y = 0) = \theta$. Тогда решение уравнения (4), описывающее приповерхностную деформацию, представляет собой двухпараметрический солитон. Один из параметров – скорость перемещения центра солитона V , другой – его собственная частота Ω в системе отсчета, движущейся с солитоном. С учетом нормировки $y' = y/d$, $0 \leq y' \leq 1$; $t' = t/t_0$, $t_0 = 2\gamma_\psi d^2/k_0$ решение уравнения (4) имеет вид:

$$\tilde{\psi} = \frac{\theta}{ch\left(\theta\sqrt{\frac{g}{2}}(y' = Vt')\right)} \exp(i(ky' - \omega t')), \quad (5)$$

где $k = V/2$, $\omega = k^2 + g\theta^2/2$, $g = d^2(P_c E \cos \varphi_0 - B)/4k_0$.

Решение (5) можно рассматривать как периодическую волну с волновым числом k и частотой ω (в лабораторной системе), локализованную в солитоне и являющуюся его "заполнением". График $\text{Re}\tilde{\psi}$ имеет вид волнового пакета (рис. 3). Смектические слои в середине ячейки быстро выпрямляются, но остаются изогнутыми на расстоянии порядка 0.15 мкм от подложки. Движение солитона через слой СЖК приводит к окончательному выпрямлению смектических слоев. В реальной ситуации при изменении частоты управляющего напряжения амплитуда тока переполаризации I_p (ток смещения, возникающий при переориентации вектора \mathbf{P}_c в поле \mathbf{E}) растет в течение нескольких десятков секунд.

Случаю $\Omega = 0$ соответствует нелинейная локализованная волна стационарного профиля, движущаяся со скоростью $V_0 = \theta\sqrt{k_0(P_c E \cos \varphi_0 - B)}/2\gamma_\psi$.

Характерное время выпрямления смектических слоев СЖК:

$$\tau_c = \gamma_\psi / (P_c E \cos \varphi_0 - B) \theta^2. \quad (6)$$

Из (6) следует, что электрическое поле выпрямляет смектические слои СЖК только в случае, если оно больше критического значения:

$$E_c = B / P_c \cos \varphi_0. \quad (7)$$

При $\varphi_0 = 30^\circ$, $P_c = 100 \text{ нКл/см}^2$ и $B = 1 \cdot 10^3 \text{ эрг/см}^3$ получаем $E_c \approx 0.1 \text{ В/мкм}$, а характерное время $\tau_c \approx 60 \text{ мкс}$ при $\theta = 25^\circ$, $\gamma_\psi = 1 \text{ Пуаз}$, $E = 5 \text{ В/мкм}$.

Изменение канала диссипации энергии в процессе переориентации директора при взаимодействии переменного электрического поля со спонтанной поляризацией является причиной частотной зависимости времени электрооптического отклика (времени переориентации директора τ_R) СЖК с компенсированным геликоидом. Если электрическое поле переориентирует директор по образующим конуса с раствором 2θ , то есть изменяется азимутальный угол ориентации директора φ , то время τ_R не зависит от частоты изменения электрического поля f , и СЖК ведет себя как жидкость с вязкостью γ_φ , которая является диссипативным коэффициентом. В этом случае время переориентации директора СЖК $\tau_R \sim \gamma_\varphi / P_c E$ [4]. Все величины, входящие в уравнение для τ_R , частотно независимы, поэтому время τ_R постоянно, когда $f < 200 \text{ Гц}$ ($E = 3 \text{ В/мкм}$) и $f < 600 \text{ Гц}$ ($E = 5 \text{ В/мкм}$).

Экспериментально измерялись значения τ_R при воздействии напряжения, подаваемого на прозрачные электроды, нанесенные на ограничивающие поверхности ячейки. Напряжение имело во времени форму биполярного миандра частотой f с амплитудой U_{pp} .

Результаты измерения зависимости τ_R от частоты f приведены на рис. 4.

При увеличении частоты изменения электрического поля СЖК с большой вязкостью может вести себя как аморфное твердое тело, то есть упруго деформироваться. Такой СЖК можно характеризовать одновременно вязкостью γ_φ и вязкостью γ_ψ [5]. Появление нового канала диссипации энергии, связанного с выпрямлением смектических слоев (диссипативный коэффициент – вязкость γ_ψ), приводит к раздвоению импульса тока переполаризации и, как следствие этого, к резкому увеличению времени τ_R (рис. 4). Дальнейшее увеличение частоты f приводит к исчезновению канала диссипации, связанного с изменением азимутального угла φ , и время τ_R уменьшается. В этом случае время переориентации директора τ_R определяется соотношением (6). Увеличение напряженности поля приводит к сдвигу максимума зависимости $\tau_R(f)$ в сторону больших

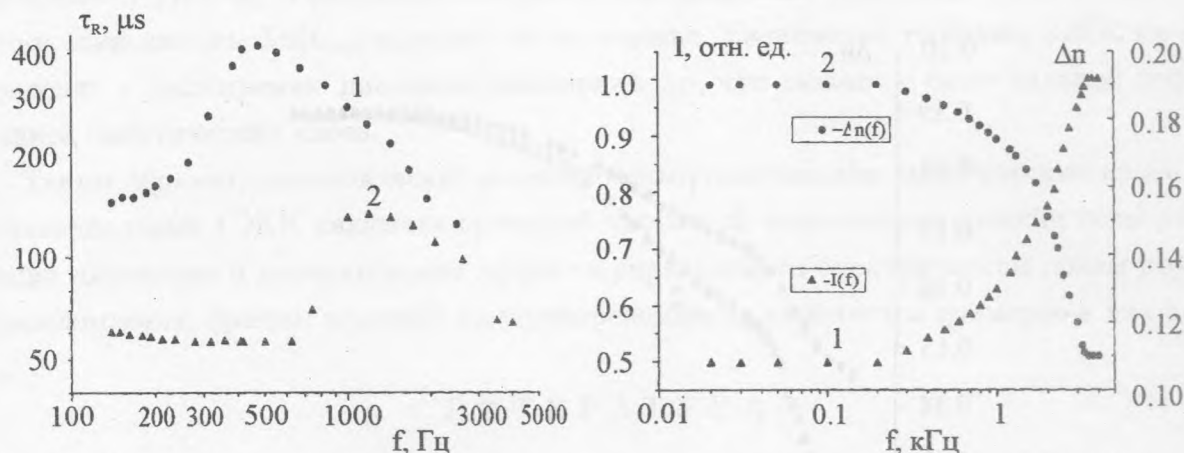


Рис. 4. Частотные зависимости времени переориентации директора ЖКС-370 при напряженности электрического поля $E = 3 \text{ В/мкм}$ (кривая 1) и $E = 5 \text{ В/мкм}$ (кривая 2); толщина ячейки 5 мкм .

Рис. 5. Частотные зависимости светопропускания (кривая 1) и показателя двулучепреломления (кривая 2) ЖКС-370. Толщина ячейки $d = 3.85 \text{ мкм}$, $U_{pp} = 12 \text{ В}$.

частот, так как поле замедляет процесс изменения канала диссипации энергии. Уменьшение толщины СЖК ячейки до 1.5 мкм приводит к изменению частотной зависимости τ_R . Исчезает возрастающий участок зависимости $\tau_R(f)$ и время τ_R уменьшается в 2 – 3 раза при увеличении частоты f .

Изменять двулучепреломление Δn (и, как следствие этого, светопропускание СЖК ячейки в скрещенных поляризаторах) можно, меняя частоту изменения электрического поля f при постоянной амплитуде управляющего напряжения (рис. 5). Статический участок зависимости $\Delta n(f)$ при частотах $f < 200 \text{ Гц}$ соответствует повороту эллипсоида показателя преломления на 180° , то есть движению директора по образующей конуса с раствором 2θ , с характерным временем $\tau_R \sim \gamma_\varphi / P_c E$. При таком типе движения азимутальный угол ориентации директора φ во всех смектических слоях в электрическом поле, напряженность которого превышает пороговое значение, изменяется на 180° . Как следствие этого, двулучепреломление и светопропускание СЖК не зависят от частоты приложенного напряжения.

Увеличение частоты изменения электрического поля приводит к возбуждению моды, связанной с выпрямлением волнообразно деформированных смектических слоев: изменяется угол наклона директора ψ в каждой точке смектического слоя, и, как следствие этого, изменяется положение эллипсоида показателей преломления вдоль смек-

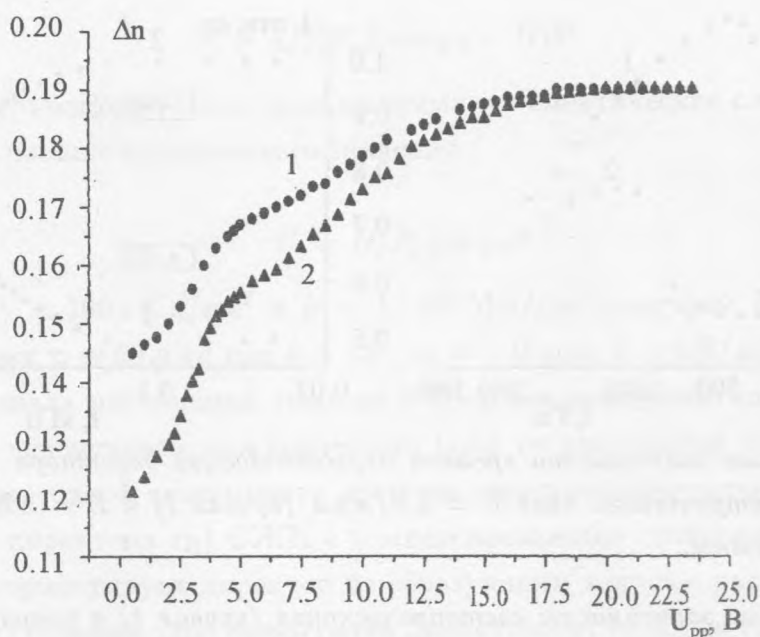


Рис. 6. Полевые зависимости показателя двулучепреломления ЖКС-370. Толщина ячейки $d = 1.5 \text{ мкм}$ (кривая 1) и $d = 3.85 \text{ мкм}$ (кривая 2), $f = 50 \text{ Гц}$.

тического слоя, что и приводит к изменению двулучепреломления СЖК. Максимальные изменения Δn и светопропускания наблюдаются, когда одновременно существуют две моды, связанные как с переориентацией директора по образующей конуса, так и с изменением ориентации директора в результате выпрямления смектических слоев ($20 \text{ Гц} < f < 2 \text{ кГц}$). Увеличение частоты f на порядок дает уменьшение Δn в 1.7 раза (рис. 5, кривая 2).

Высокочастотная ($f > 2 \text{ кГц}$) статическая ветвь зависимости $\Delta n(f)$ соответствует преобладающему влиянию моды, связанной с выпрямлением смектических слоев. При этом светопропускание слоя СЖК максимально (рис. 5).

В то же время изменение амплитуды управляющего напряжения при постоянной частоте f также приводит к изменению двулучепреломления (рис. 6). Максимальное изменение Δn происходит в слабых полях, когда электрическое поле, выпрямляя смектические слои, меняет направление директора СЖК и, как следствие этого, положение эллипсоида показателей преломления вдоль смектического слоя. Возрастание напряженности поля приводит к постепенному исчезновению моды, связанной с выпрямлением смектических слоев, и появлению моды, связанной с переориентацией директора по ази-

мутальному углу φ . В результате скорость изменения Δn уменьшается, и, в конечном итоге, зависимость $\Delta n(U_{pp})$ выходит на насыщение. Увеличение толщины СЖК ячейки приводит к расширению диапазона изменения Δn , что связано с более сильной деформацией смектических слоев.

Таким образом, периодические волнообразные деформации смектических слоев негеликоидальных СЖК являются причиной частотной зависимости времени переориентации директора и возникновения эффекта управляемого электрическим полем двулучепреломления, причем значение двулучепреломления изменяется примерно в два раза.

Л И Т Е Р А Т У Р А

- [1] Островский Б. И., Чигринов В. Г. Кристаллография, **25**, N 2, 560 (1980).
- [2] Косевич А. М., Ковалев А. С. Введение в нелинейную физическую механику, Киев, Наукова Думка, 1988.
- [3] Де Жен П. Физика жидких кристаллов, М., Мир, 341 (1977).
- [4] Пожидаев Е. П., Осипов М. А., Чигринов В. Г. и др. ЖЭТФ, **94**, N 2, 125 (1988).
- [5] Andreev A. L., Pozhidaev E. P., Fedosenkova T. B., et al. Frequency dependence electrooptical response time of helix free FLC and polymer dispersed FLC, Proc. 7th Intern. Conf. on FLC's, Darmstadt, Germany, 274 (1999).

Поступила в редакцию 19 марта 2002 г.