

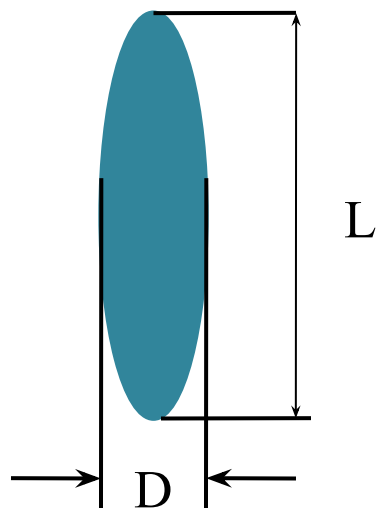
Спектральные характеристики одномерных и трехмерных жидкокристаллических фотонных кристаллов

П.В. Долганов¹, К.Д. Бакланова^{1,2}, В.К. Долганов¹

*1. Институт физики твердого тела Российской академии наук,
Черноголовка, Россия*

*2. Национальный исследовательский университет Высшая школа
экономики, Москва, Россия*

Холестерический жидкий кристалл

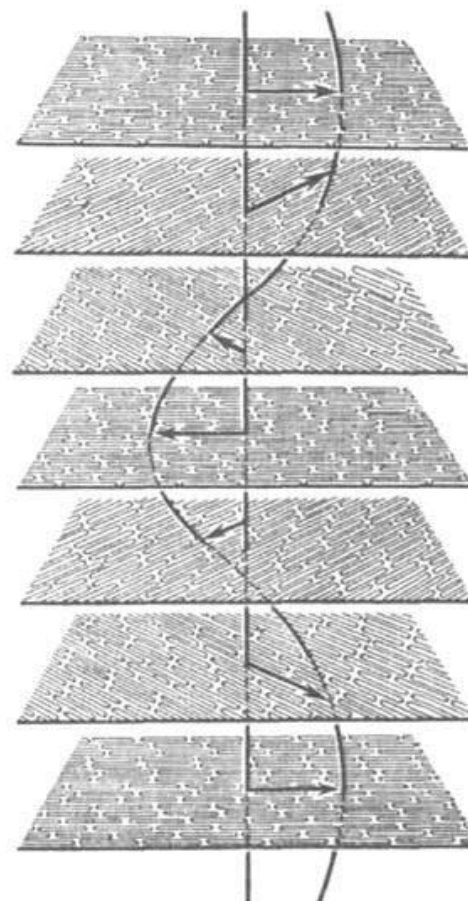
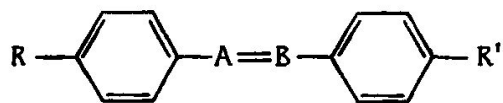


$D \sim 0.5 \text{ nm}$

$L \sim 2.5 \text{ nm}$



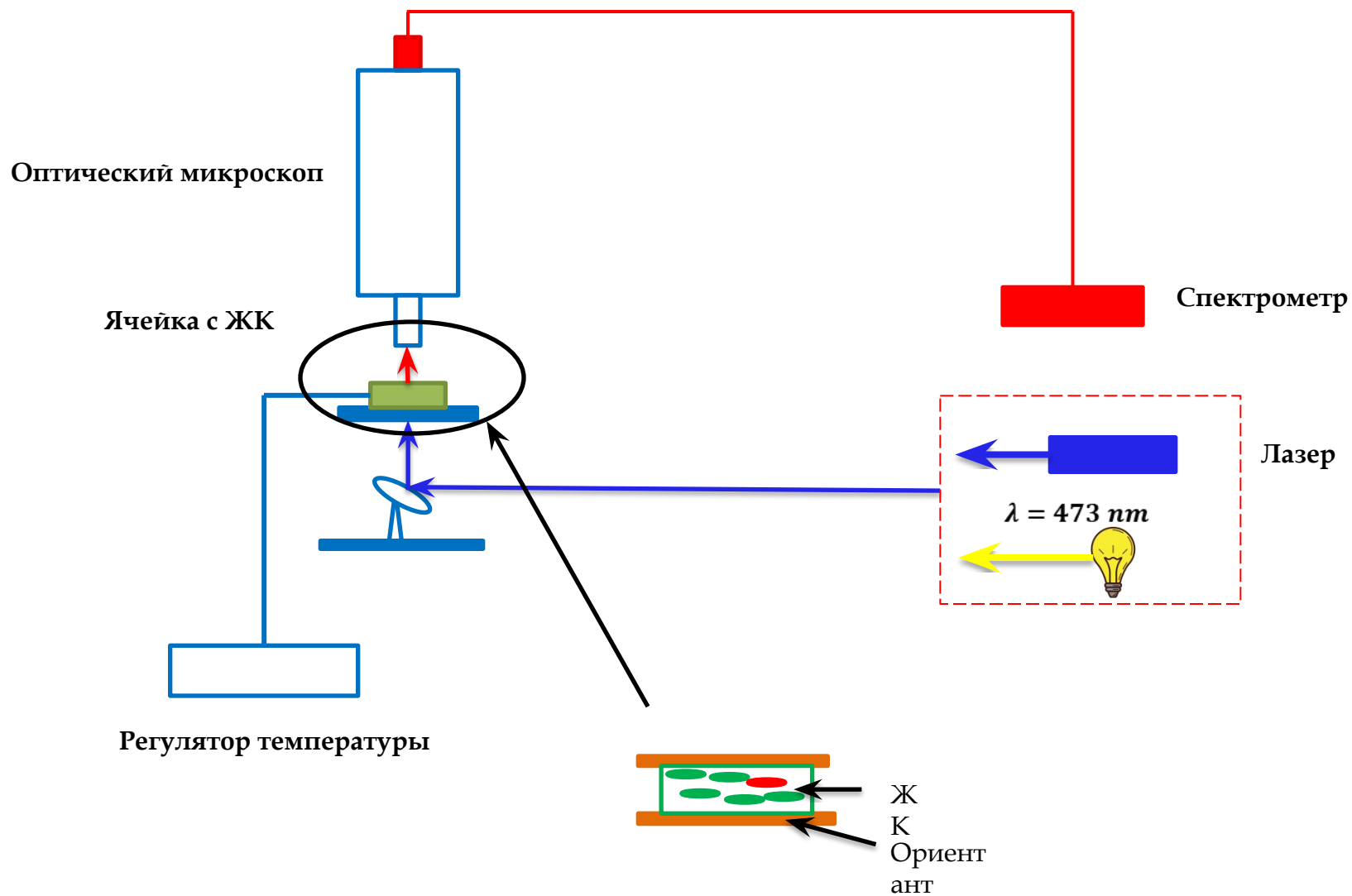
Структура нематического ЖК



Структура холестерического ЖК

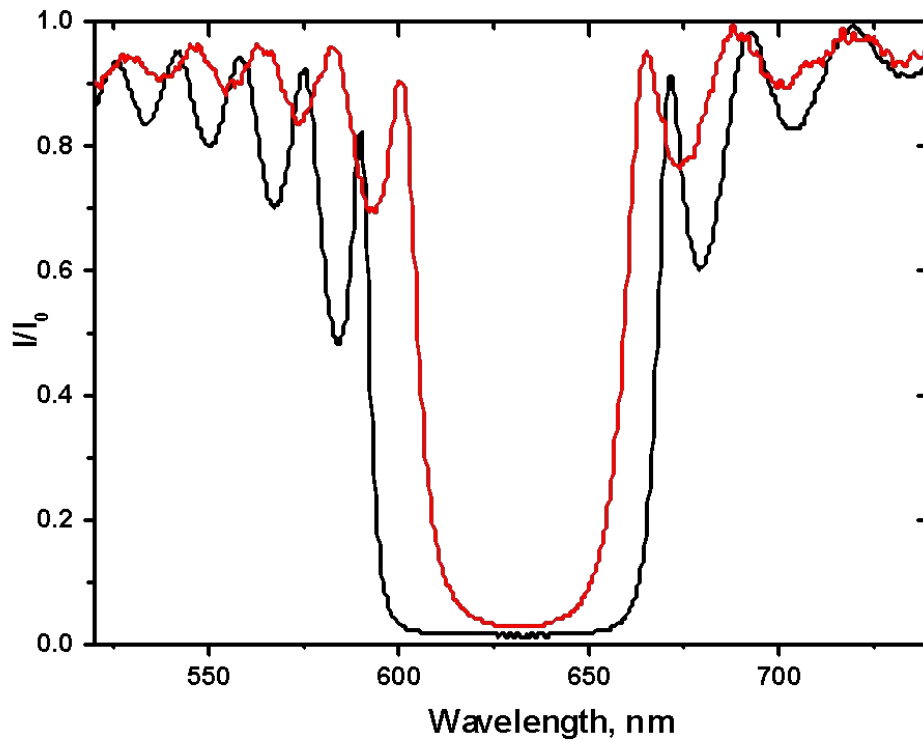


Установка на базе микроскопа

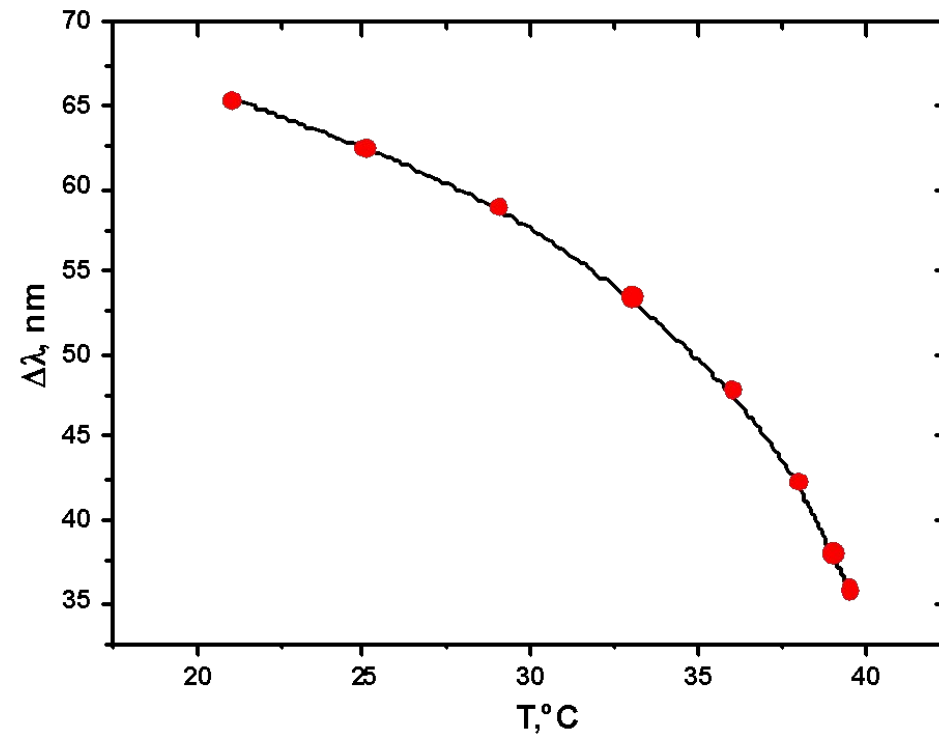


Схематическое изображение
ячейки с ЖК

Селективное отражение и фотонная зона

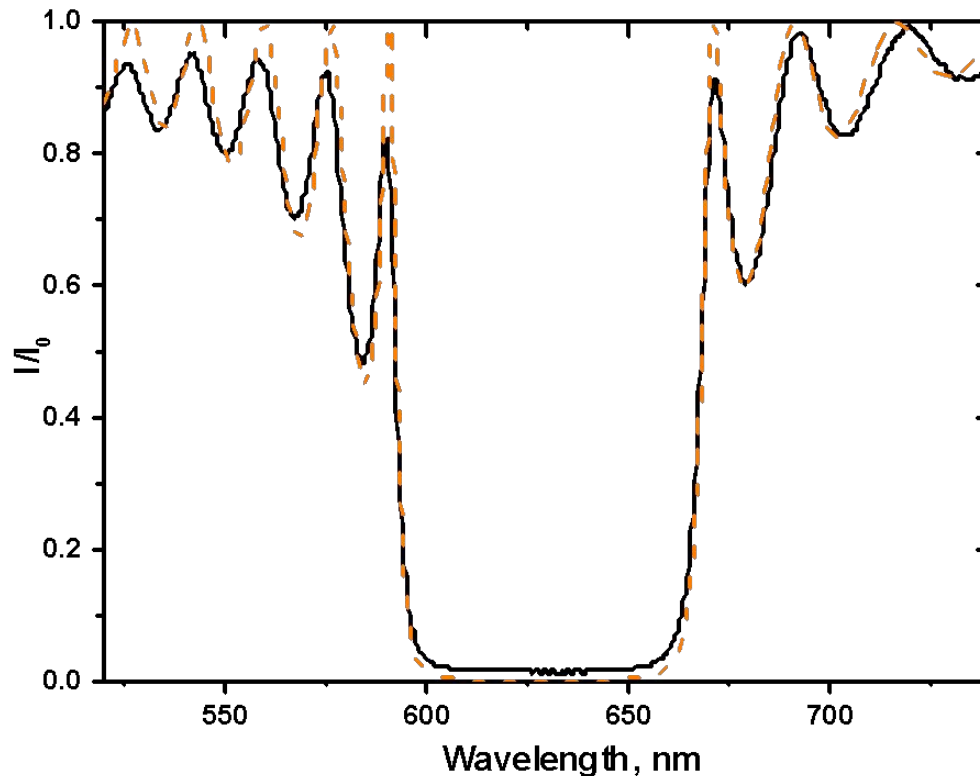


Изменение спектра поглощения ХЖК с температурой



Зависимость ширины фотонной зоны
ХЖК от температуры

Теоретически рассчитанный спектр



Селективное отражение и фотонная зона для собственной круговой поляризации; сплошная кривая – экспериментальный спектр, пунктирная – рассчитанный теоретически.

Формулы для расчета теоретической зависимости селективного отражения [1]

$$T = \left| \frac{E^t}{E^i} \right|^2 = \frac{\tau^2 \beta^2}{\tau^2 \beta^2 + \kappa^4 \delta^2 (\sin \beta L)^2};$$

$$\beta^2 = \kappa^2 + (\tau^2/4) - \kappa \sqrt{\tau^2 + \tau^2 \delta^2};$$

$$\kappa^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2}; \quad \delta = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2};$$

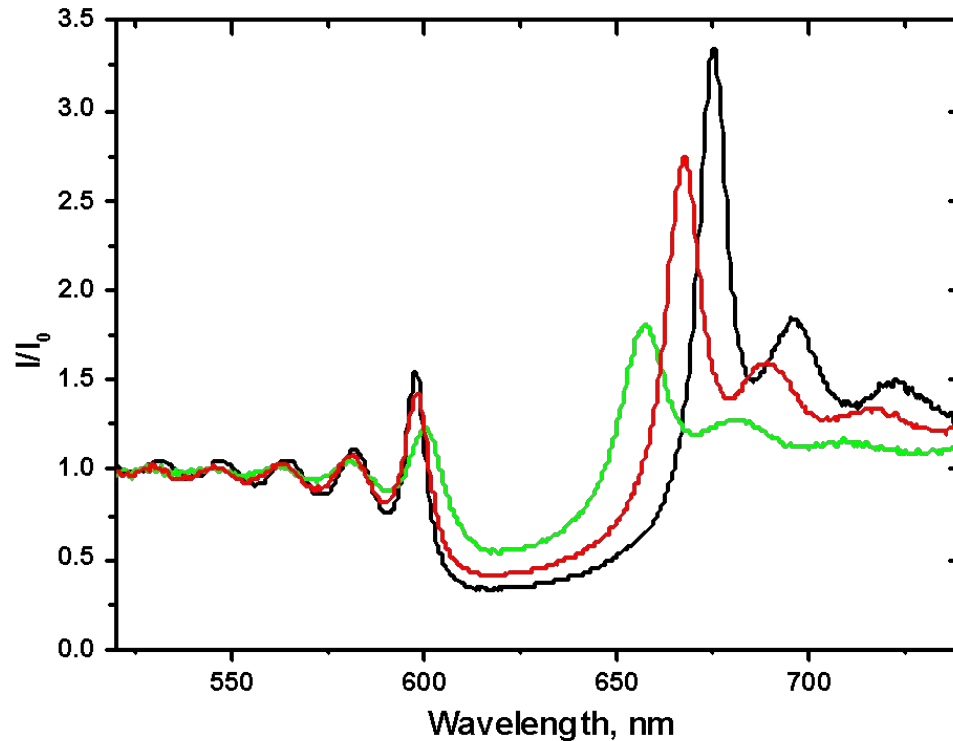
$$\tau = 4\pi/p;$$

ε – диэлектрическая проницаемость;

L – толщина образца;

p – шаг спирали;

Относительная люминесценция ХЖК



Относительная люминесценция в ХЖК при разных температурах

Золотое правило Ферми $\omega \sim \rho |\langle f | \mu \cdot \alpha | i \rangle|^2$

μ – оператор дипольного момента;

α – единичный вектор электромагнитного поля;

f, i – конечное и начальное состояния соответственно

$$\omega \sim \rho |\vec{E} \cdot \vec{d}|^2 \quad \begin{array}{l} E - \text{напряженность поля;} \\ d - \text{дипольный момент} \end{array}$$

$$\rho_0 = \frac{n}{c}$$

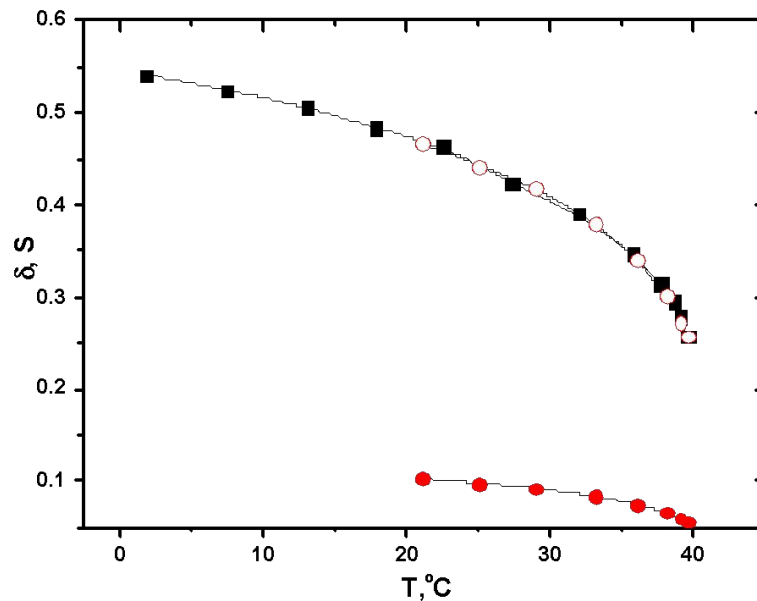
$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{I_R}{I_L} \cdot \frac{\langle d_{iso}^2 \rangle}{\langle d_i^2 \rangle_{clc}} \quad [2]$$

[2] J. Schmidtke and W. Stille Fluorescence of a dye-doped cholesteric liquid crystal film in the region of the stop band: theory and experiment, Eur. Phys. J. B31, 179-194 (2003)

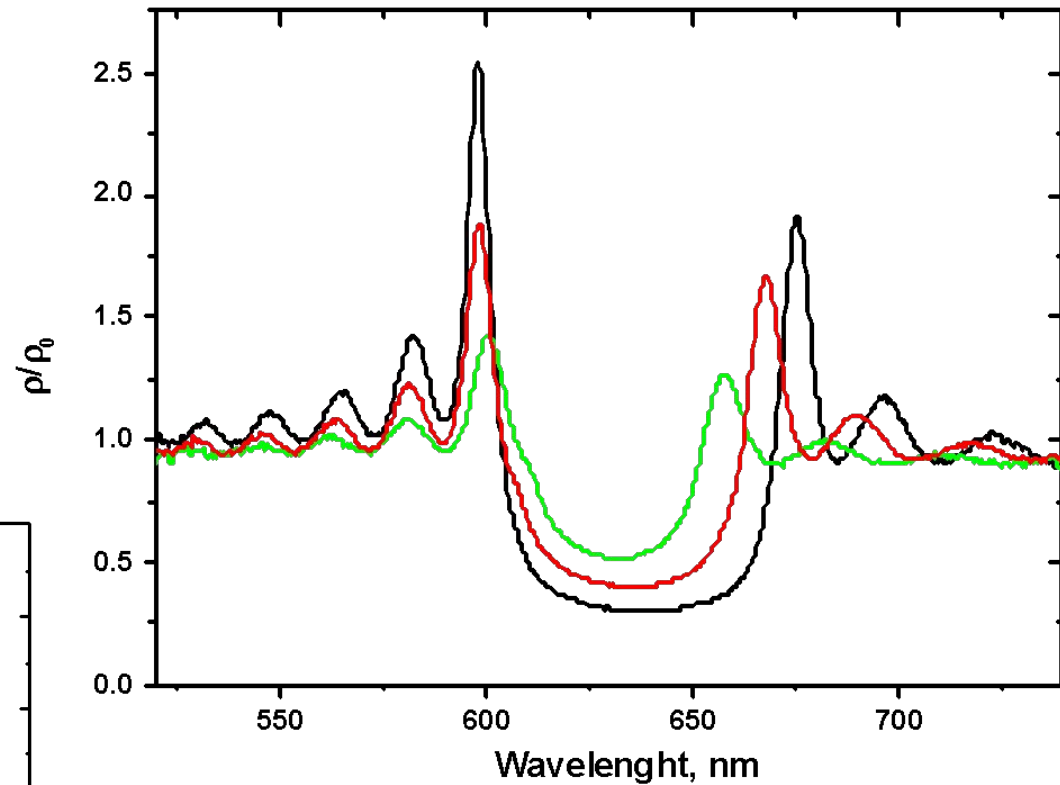
Плотность фотонных состояний ХЖК

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{I_R}{I_L} \cdot \frac{\langle d_{iso}^2 \rangle}{\langle d_i^2 \rangle_{clc}}$$

$$\langle d_{iso}^2 \rangle = \frac{1}{3} \quad \langle d_i^2 \rangle = \frac{2}{3} \cdot \frac{f_i^2 - 1}{f_i^2 + 1} 2S + \frac{1}{3}$$

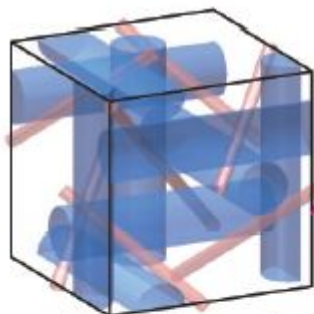
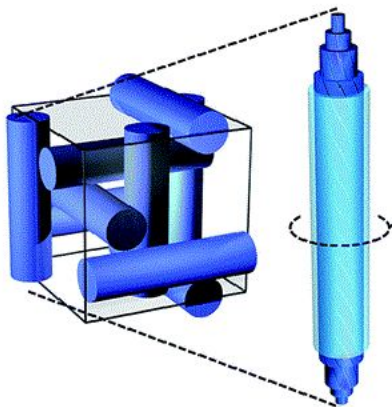


Температурная зависимость параметра порядка для нематика (черные квадраты). Зависимость δ (красные круги) и она же умноженная на $k=4.5$ (полые красные круги).



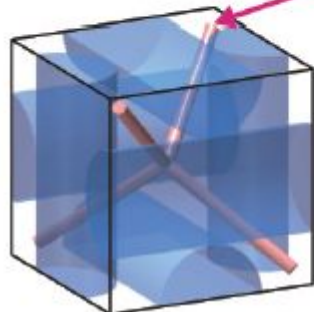
Плотность фотонных состояний при разных температурах

Голубые фазы

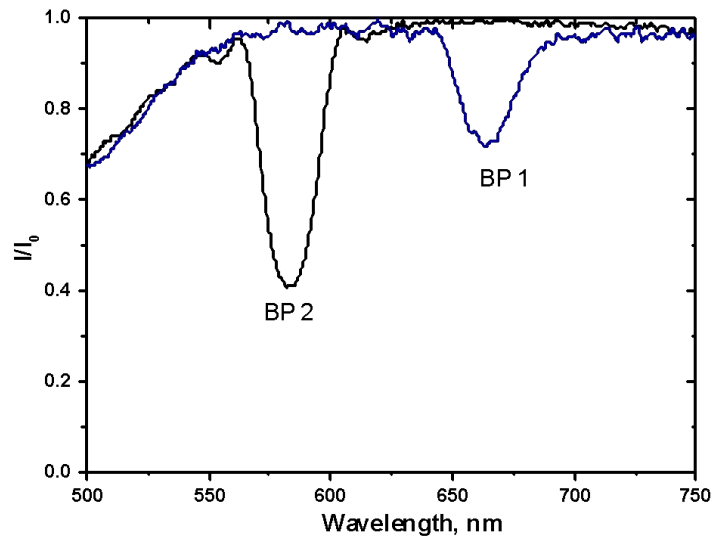


Blue Phase I

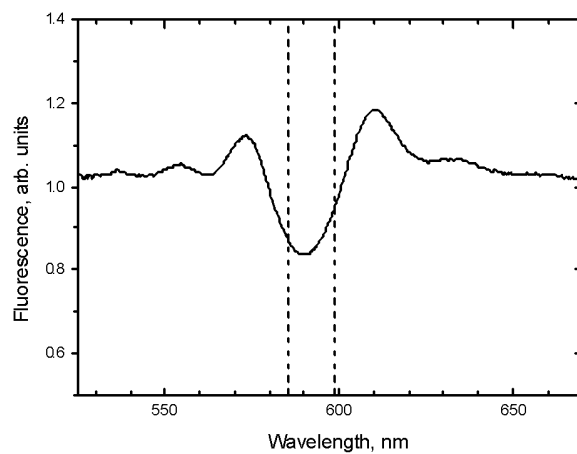
Disclination Lines



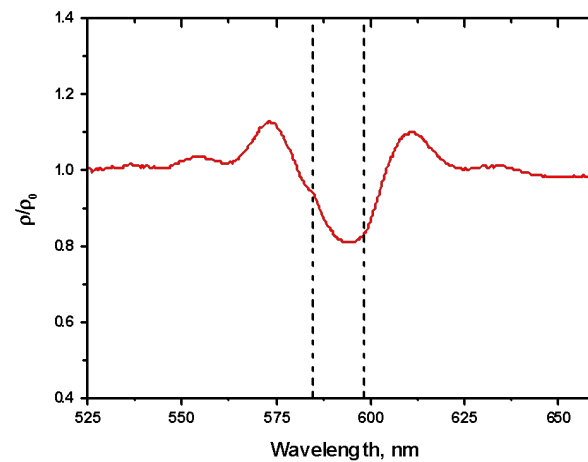
Blue Phase II



Спектр пропускания ХЖК в голубой фазе



Люминесценция ХЖК в фазе BP2



Рассчитанная ПФС ХЖК в фазе BP2

Выводы

1. Периодическая структура и наличие фотонной зоны существенно изменяет оптические свойства ЖК. В спектральной области фотонной зоны плотность состояний существенно уменьшается по сравнению со структурой без ФЗЗ. Вблизи границ зоны плотность фотонных состояний имеет резкие максимумы.
2. Проанализирована зависимость спектров люминесценции от ориентационного параметра порядка ЖК.
3. Сопоставлены результаты измерений на фотонных кристаллах с одномерным и трехмерным упорядочением.
4. Наблюдается существенная трансформация спектров люминесценции и плотности фотонных состояний при изменении температуры.

Спасибо за внимание.

Дисперсионное соотношение [2]

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial z^2} = \frac{\hat{\varepsilon}}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2};$$

Поле в кристалле – суперпозиция 2-х волн:

$$\vec{E} = n_+ E_+ \exp[i(\beta + \tau/2)z + i\omega t] + n_- E_- \exp[i(\beta - \tau/2)z - i\omega t]$$

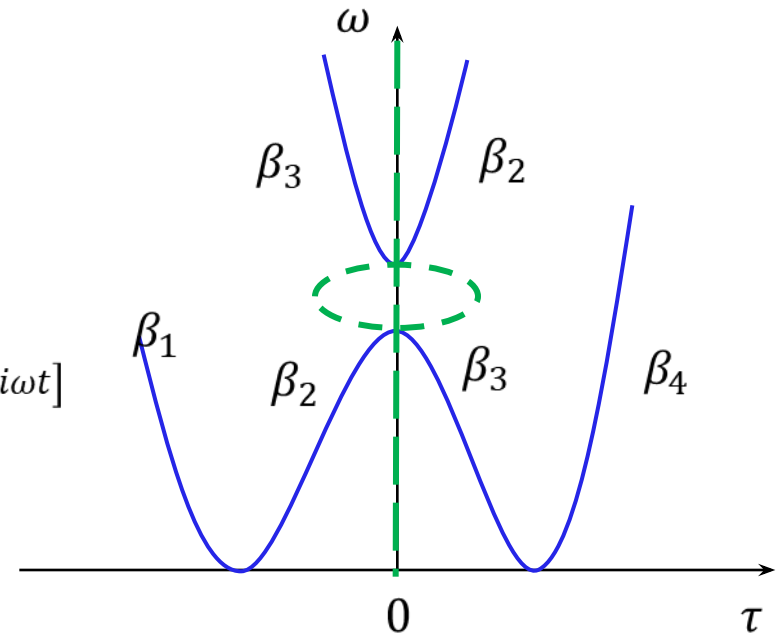
$n_{\pm}$ – орты круговых поляризаций; ω – частота света

$$\begin{cases} \left[\kappa^2 - \left(\beta + \frac{\tau}{2} \right)^2 \right] E_+ + \kappa^2 \delta E_- = 0, \\ \kappa^2 \delta E_+ + \left[\kappa^2 - \left(\beta - \frac{\tau}{2} \right)^2 \right] E_- = 0, \end{cases} \quad \kappa^2 = \frac{\omega^2 \varepsilon}{c^2};$$

$$\Delta = 0, \quad \left[\kappa^2 - \left(\beta + \frac{\tau}{2} \right)^2 \right] \left[\kappa^2 - \left(\beta - \frac{\tau}{2} \right)^2 \right] - \kappa^4 \delta^2 = 0;$$

$$\boxed{\beta_j = \pm \sqrt{\kappa^2 + (\tau^2/4) \pm \kappa \sqrt{\tau^2 + \tau^2 \delta^2}}; \quad j = \overline{1,4}}$$

Решения определяют 4 возможных суперпозиции волн при данной частоте



$$\beta_j = \pm \sqrt{\kappa^2 + (\tau^2/4) \pm \kappa \sqrt{\tau^2 + \tau^2 \delta^2}};$$

$$\text{Вблизи } \omega_B = \tau c / 2\sqrt{\varepsilon}$$

решения становятся мнимыми.

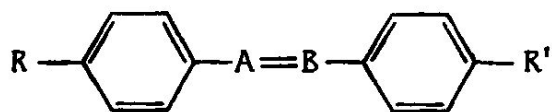
Волны не могут распространяться в кристалле, т. е. имеется «запрещенная зона».

Определение параметра порядка [1]



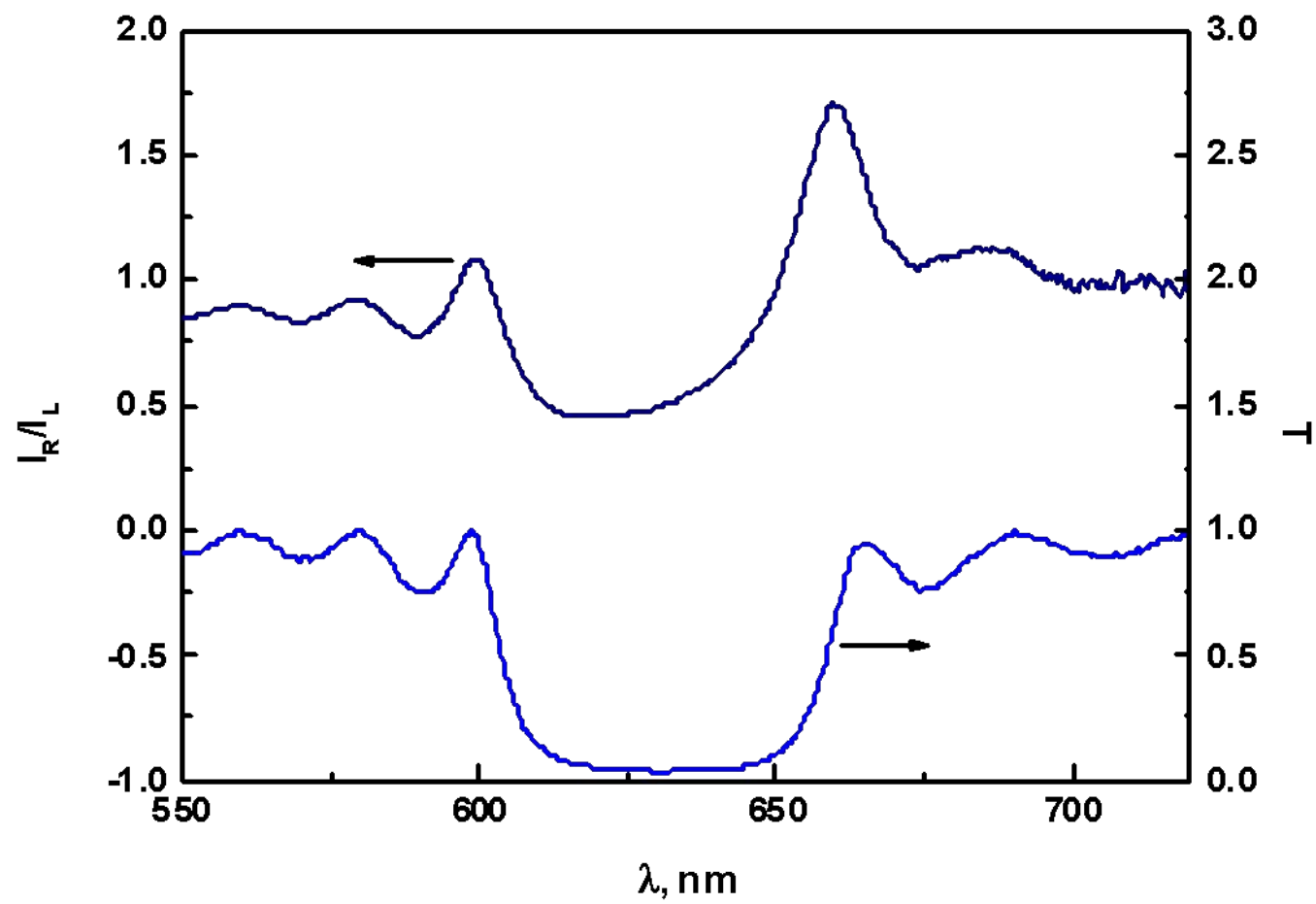
$$S = \frac{1}{2} \langle (3(\cos \Theta)^2 - 1) \rangle$$

$$\langle \cos \Theta \rangle = \int f(\Theta) \cos \Theta d\Omega$$



$S = 0$ жидкость

$S = 1$ полное упорядочение



ПЛОТНОСТЬ ФОТОННЫХ СОСТОЯНИЙ

$$\frac{I_R}{I_L} = \frac{\rho}{\rho_0} f$$

Относительная
интенсивность
излученного света

$$\rho_0 = \frac{n}{c}$$

$$|d_i|^2 = d^2 \frac{1+(\tilde{f}^2 - 1) \cos \psi^2}{1+f^2}$$

Для E_1 (внутри
33):

$$|d_i|^2 = d^2 \frac{1+(\tilde{f}^2 - 1) \cos \psi^2}{1+f^2} - \frac{2\tilde{f}}{1+\tilde{f}^2} d^2 \sin \psi \cos \psi$$

Необходимо выразить d_i через параметр
порядка

$$S_d = \frac{3}{2} \langle (\cos \theta)^2 \rangle - 1/2$$

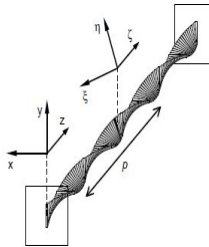
$$f = \frac{\langle |d_i|^2 \rangle_{clc}}{\langle |d_{iso}|^2 \rangle_{iso}}$$

d-дипольный
момент

$$\langle |d_i|^2 \rangle = \frac{1}{1+f_i^2} \left[\left(f_i^2 - \frac{1}{2} \right) \langle \cos^2 \theta \rangle_\theta + \frac{1}{2} \right]$$

$$\langle |d_i|^2 \rangle = \frac{2}{3} \frac{f_i^2 - \frac{1}{2}}{f_i^2 + 1} S_d + \frac{1}{3}$$

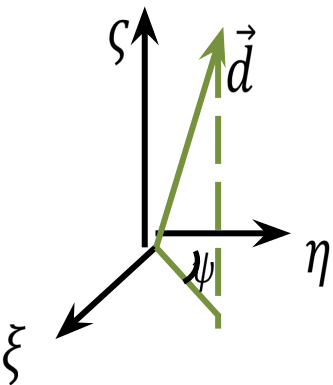
$$\langle |d_{iso}^2| \rangle_{iso} = \frac{1}{3}$$



$$\cos \psi = \frac{d\eta}{d\xi\eta}$$

$$\sin \psi = \frac{d\xi}{d\xi\eta}$$

$$\vec{d}_{\xi\eta} = d_{\xi\eta} (\sin \psi \hat{\xi} + \cos \psi \hat{\eta})$$



ПЛОТНОСТЬ СОСТОЯНИЙ

$$\rho = \left| \frac{d}{d\omega} \text{Re}(k) \right|,$$

$$k'_i = k_i p.$$

$$\rho_i^{(\infty)} = p^{-1} \frac{dk'_i}{d\lambda'} \frac{d\lambda'}{d\omega}.$$

$$\rho_i = p^{-1} \frac{dk'_{\text{eff},i}}{d\omega} = \frac{1}{Np} \frac{X_i(dY_i/d\omega) - Y_i(dX_i/d\omega)}{X_i^2 + Y_i^2}$$

$$\frac{dX_i}{d\omega} = \frac{dX_i}{d\lambda'} \frac{d\lambda'}{d\omega} \quad \text{and} \quad \frac{dY_i}{d\omega} = \frac{dY_i}{d\lambda'} \frac{d\lambda'}{d\omega}.$$

$$X_i = (1 - r_i^2) \cos(k'_i N),$$

$$Y_i = (1 + r_i^2) \sin(k'_i N).$$