

ЭФФЕКТ НЕСОИЗМЕРИМОСТИ В НЕМАТИЧЕСКОМ ЖИДКОМ КРИСТАЛЛЕ С ИНДУЦИРОВАННОЙ ГИРОТРОПИЕЙ

*Е.Д.Белоцкий, И.П.Ильчишин, Б.И.Лев,
А.В.Голмачев¹⁾, П.М.Томчук, М.Т.Шнак*

Теоретически предсказано и экспериментально обнаружено наличие двух несоизмеримых периодов в распределении директора в нематическом жидком кристалле с индуцированной гиротропией.

Отличие собственных и индуцированных холестериков обусловлено механизмом возникновения спиральной надмолекулярной структуры. Характер плотной упаковки индивидуально-киральных молекул в мезофазе при ориентационном упорядочении определяется диссиметрией и ангармонизмом сил взаимодействия.

При индуцировании гиротропии в нематике, заданное дисперсионными силами, ориентационное упорядочение локально нарушается при введении киральных добавок. Большие размеры внедренных молекул или их существование в матрице только в виде комплексов, приводят к искажению ориентационного упорядочения на значительном расстоянии. Суперпозиция локальных деформаций, рассмотренная ранее в одноконстантном приближении¹ при учете различия в упругих константах, как будет показано ниже, приводит к искажению идеальной спиральной структуры, а точнее, к появлению двух несоизмеримых периодов. Последнее состояние соответствует минимальной свободной энергии жидкого кристалла (ЖК).

Теоретическое рассмотрение основано на свободной энергии нематика с индуцированной спиральной структурой¹:

$$F_d = \frac{1}{2} \{ K_{11}(\operatorname{div} \mathbf{n})^2 + K_{22}(q_0 + \mathbf{n} \cdot \operatorname{rot} \mathbf{n})^2 + K_{33}[\mathbf{n} \times \operatorname{rot} \mathbf{n}]^2 \}, \quad (1)$$

где K_{11} , K_{22} , K_{33} — константы упругости Франка, q_0 — волновой вектор спиральной структуры, зависящий от концентрации киральной добавки, полученный при равенстве упругих констант в работах^{1,2}.

Распределение директора будем искать в виде:

$$\mathbf{n} = (\cos \theta(z) \cos \varphi(z), \cos \theta(z) \sin \varphi(z), \sin \theta(z)). \quad (2)$$

Ось спиральной структуры направлена вдоль z , и примем, что $\varphi = qz$, где q — волновой вектор истинной деформированной спирали, который будем считать неизвестным параметром задачи. Вводя обозначения $\alpha = 1 - K_{11}/K_{33}$ и $\beta = 1 - K_{22}/K_{33}$ свободную энергию можно записать следующим образом:

$$F_d = \frac{K_{33}}{2} \left\{ (1 - \alpha \cos^2 \theta) \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 - \beta (q_0 - q \cos^2 \theta)^2 + q_0^2 + (q^2 - 2qq_0) \cos^2 \theta \right\}, \quad (3)$$

которая принципиально не отличается от свободной энергии, используемой при исследовании эффектов несоизмеримости^{3,4}.

При $\alpha = \beta = 0$ экстремум функционала (3) реализуется на нелинейном решении уравнения синус-Гордона³:

$$\frac{\theta}{2\pi} = C + \frac{1}{2\pi} \operatorname{am}[\pm 4K(\kappa)z/l], \quad (4)$$

¹⁾ Институт монокристаллов Академии наук Украинской ССР.

где $amf(z)$ – эллиптическая амплитуда Якоби, $K(\kappa)$ – полный эллиптический интеграл первого рода. Незвестный параметр κ , который связан с первым интегралом соответствующего (3) уравнения Эйлера (C), так же как и q будет находиться из минимума свободной энергии (3) (теперь уже при $\alpha \neq 0$ и $\beta \neq 0$), в которую подставлено решение (4) в качестве пробной функции. Определяя неизвестные параметры κ и q из минимума свободной энергии, мы полностью решаем поставленную задачу об определении истинной структуры нематика с индуцированной гиротропией. Решение (4) соответствует вращениям θ на углы, кратные 2π с периодом:

$$l = 4\kappa K(\kappa)/(q^2 - 2qq_0)^{1/2}, \quad (5)$$

который при условии $K_{33} > 2K_{22}(1 - K_{33}/2(K_{33} + K_{11} - K_{22}))$ принимает значение $l = 4[2 \times (2 - \alpha)(1 - \beta)/(3 - 4\beta)]^{1/2} q_0^{-1}$, а волновой вектор спиральной структуры $q = q_0(1 - 2\beta)/(1 - \beta)$. Такому решению соответствует периодическое размещение статических солитонов в ориентации директора при сохранении спиральной структуры.

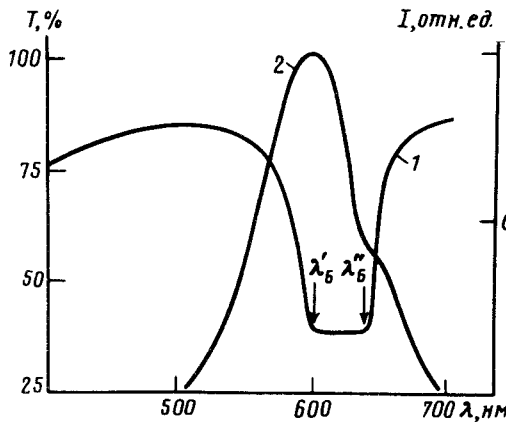


Рис. 1. 1 – Спектр пропускания смеси ЖК-654 + 36% холестерилолеата для линейной поляризации света; 2 – спектр флуоресценции примесного красителя. Толщина слоя 30 мкм

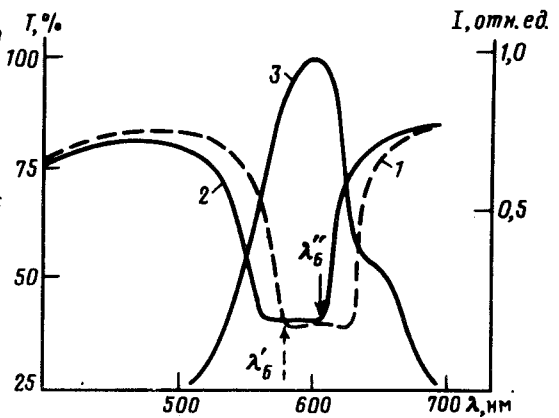


Рис. 2. Спектр пропускания МББА при различной концентрации ОАД; 1 – $c = 6,4\%$, 2 – $c = 7,2\%$, линейная поляризация света; 3 – спектр флуоресценции примесного красителя. Толщина слоя 15 мкм

Экспериментально это проявляется в наличии двухполосной генерации лазера с распределенной обратной связью (РОС) на основе нематика с индуцированной гиротропией.

Лазер такого типа представляет собой ориентированный слой (толщина 15–30 мкм) жидкого кристалла планарной текстуры, активированный генерирующим красителем из класса феноленовых с концентрацией 0,5% по весу. Как матрицы использовались однокомпонентные МББА, 5ЦБ и многокомпонентный ЖК-654. В однокомпонентных нематиках гиротропия создавалась введением немезогенной оптически активной добавки (ОАД) для ЖК-654 добавлением холестерилолеата. Ориентированные слои примесных ЖК возбуждались II гармоникой лазера на стекле с Nd^{3+} ($\lambda = 0,53$ мкм), работающего в режиме одиночных импульсов ($\tau_{и} = 30$ нс). Максимальная интенсивность возбуждения составляла 8 МВт/см^2 , диаметр пучка в плоскости ЖК-слоя 0,5 мм.

Отличительной особенностью спектров генерации РОС-лазера на индуцированной спиральной структуре является различие длин волн Брэгга (λ_B) от λ_B , определенных из спектров

селективного отражения (СО). В РОС-лазере на основе холестерических мезогенов, как известно ⁵ λ_B в генерации и в спектре СО совпадают с точностью эксперимента.

На рис. 1 представлен спектр пропускания смеси ЖК-654 + 36% холестерилолеата (кривая 1). При таком расположении спектра СО в пределах полосы флуоресценции примесного красителя (кривая 2) генерация происходит одновременно в двух полосах и λ_B (центральные более интенсивные линии полосы генерации) составляют 599,2 и 640 нм. Соответственно λ_B , определенная из спектра СО, как средняя на уровне половины интенсивности ⁶, составляет 620 нм.

В индуцированной спиральной структуре, обусловленной немезогенной ОАД, содержание последней для достижения такого же шага спирали гораздо ниже, что обуславливает большую ширину спектра СО и ухудшает условия для одновременной генерации двух полос. На рис. 2 представлены спектры СО при варьировании концентрации ОАД. При содержании ОАД 6,4% λ_B в спектре генерации РОС-лазера на основе МББА составляет 577,2 нм, что соответствует коротковолновому краю плато полосы СО. Увеличение ОАД до 7,2% приводит к генерации с $\lambda_B = 594,7$ нм, что соответствует уже длинноволновому краю полосы СО для этой концентрации. Аналогичная ситуация и в нематике 5ЦБ с той же ОАД.

Таким образом, генерация в РОС-лазере происходит в двух полосах, соответствующих краям плато в спектре СО. Исходя из принципа работы РОС-лазера генерация возможна только на периодической структуре, брэгговская частота которой попадает в область усиления генерирующей примеси. Любые искажения аperiodического характера (градиент шага, разброс осей спирали по толщине, нагрев вещества возбуждающим излучением) приводят лишь к уширению линии генерации. Появление двух линий на краях полосы СО свидетельствует о новой модуляции спиральной структуры.

Учитывая неизменность ширины плато в спектре СО смеси МББА + ОАД в указанном интервале концентраций (рис. 2), $\Delta\lambda_B = 52$ нм, при $\lambda'_B = 577,2$ нм, что соответствует $\lambda'_B/\lambda''_B \approx 0,917$.

Оценки величины $lq \approx 0,925$ при значении упругих констант МББА ⁷ $K_{11} = 6 \cdot 10^{-7}$ дин, $K_{22} = 4 \cdot 10^{-7}$ дин, $K_{33} = 7,5 \cdot 10^{-7}$ дин, дают хорошее совпадение с экспериментом.

Литература

1. Де Жен П. Физика жидких кристаллов, М.: Мир, 1977, с. 284.
2. Кац Е.И. ЖЭТФ, 1978, 74, 2320.
3. Булаевский Л.И., Хомский Д.И. ЖЭТФ, 1978, 74, 1863.
4. Покровский В.Л., Таланов А.П. ЖЭТФ, 1978, 75, 1151.
5. Ильчишин И.П. и др. Письма в ЖЭТФ, 1980, 32, 27.
6. Fedak J, et al. Mol. Cryst. Liq. Cryst. Lett., 1980, 64, 69.
7. Блинов Л.М. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978, с. 400.

Институт физики
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию
24 января 1990 г.