

Светоиндуцированный термомеханический эффект в однородных нематиках

Р.С.Акопян, Р.Б.Алавердян, Э.А.Сантросян, Ю.С.Чилингарян

Теоретически предсказан и экспериментально зарегистрирован лазерно-индуцированный термомеханический гидродинамический поток в горизонтальном слое нематического жидкого кристалла с однородным распределением директора в присутствии вертикального градиента температуры. Указанный эффект обусловлен созданием градиента распределения директора, необходимого для обычного термомеханического эффекта, световым полем за счет светоиндуцированного перехода Фредерикса.

Ключевые слова: нематические жидкие кристаллы, термомеханический эффект, лазерное воздействие.

Термомеханический эффект в нематических жидких кристаллах (НЖК) с неоднородным распределением директора в настоящее время хорошо изучен как теоретически, так и экспериментально [1–4]. Эффект заключается в появлении гидродинамического потока вещества в горизонтальном слое НЖК в присутствии вертикального градиента температуры. Было показано, что этот эффект специфически связан с неоднородностью распределения директора НЖК и отсутствует в планарно или гомеотропно ориентированных ячейках.

В настоящей работе обнаружен термомеханический гидродинамический поток в гомеотропно ориентированном горизонтальном слое НЖК, индуцированный световым полем. Эффект объясняется тем, что выше порога светоиндуцированного перехода Фредерикса происходит неоднородная переориентация директора НЖК. Последняя обуславливает гидродинамический поток в присутствии вертикального градиента температуры.

В эксперименте использовалась ячейка гомеотропно ориентированного НЖК 5ЦБ (рис.1). На нижней подложке задавалось гомеотропное граничное условие, а для верхней подложки граничное условие было свободным. В результате, при небольших толщинах имела место однородная гомеотропная ориентация молекул НЖК во всем объеме. Использовались стеклянные подложки толщиной 1 мм.

Вертикальный температурный градиент был создан с помощью циркулирующей воды с двумя регулируемыми температурами. Теплопроводность подложек ячейки в два-три раза превышала теплопроводность НЖК-пленки. Это необходимое условие обеспечивало постоянство граничных условий для температуры. Визуализация гидродинамических движений производилась путем добавки в НЖК алюминиевого порошка с весовой концентрацией порядка 10^{-3} %. Разность температур на подложках устанавливалась в пределах $0-10^\circ\text{C}$ с погрешностью 0.1°C .

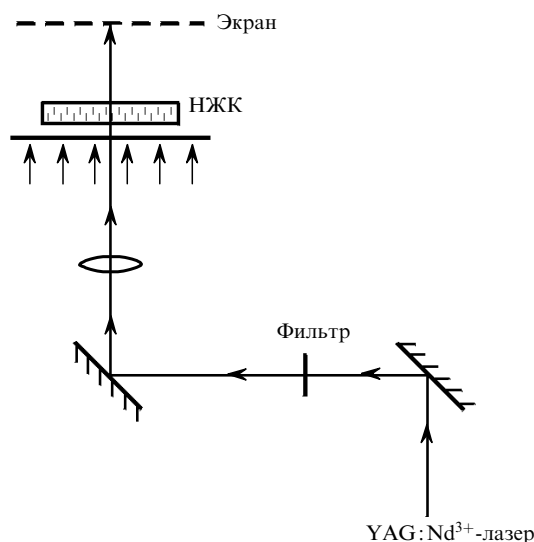


Рис.1. Схема эксперимента.

Линейно поляризованное излучение второй гармоники лазера на YAG:Nd^{3+} ($\lambda = 0.53$ мкм) падало перпендикулярно на слой НЖК, длительность импульсов составляла 20 пс с частотой повторения 50 Гц. Излучение фокусировалось на ячейку линзой с фокусным расстоянием 25 см. При интенсивностях излучения лазера, меньших некоторого порогового значения, термомеханический гидродинамический поток отсутствовал.

При толщине ячейки 110 мкм пороговая мощность светоиндуцированного перехода Фредерикса составляла примерно 15 мВт. При мощности выше этого порога директор переориентировался. В соответствии с граничными условиями угол переориентации у нижней подложки был равен нулю, а у верхней подложки достигал максимального значения, прямо пропорционального интенсивности излучения.

Таким образом, лазерное излучение создавало своеобразное гибридное распределение директора. В такой ячейке в присутствии перепада температур $\Delta T = 5.2^\circ\text{C}$ возникал гидродинамический поток. При увеличении мощности лазерного излучения скорость потока (метод измерения гидродинамической скорости описан в работе [2])

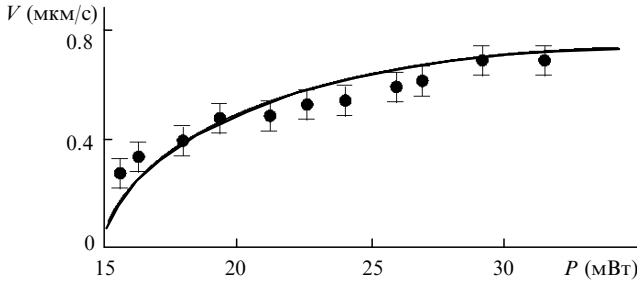


Рис.2. Зависимость скорости потока НЖК V от мощности лазерного излучения P при перепаде температур на стенках ячейки $\Delta T = 5.2^\circ\text{C}$.

увеличивалась, стремясь к насыщению (рис. 2). Это увеличение связано с возрастанием градиента угла ориентации директора НЖК. При мощности лазера 32 мВт скорость потока достигла максимума и составила ~ 0.62 мкм/с. Дальнейшее увеличение мощности лазерного излучения привело бы к уменьшению градиента угла ориентации директора и резкому падению до нуля скорости термомеханического гидродинамического потока. Однако при больших интенсивностях из-за существенного поглощения в НЖК возникает пузырьковая кавитация, которая мешает наблюдаемому эффекту.

В эксперименте измерялась также зависимость максимальной скорости гидродинамического потока от перепада температур на стенках ячейки при фиксированной мощности лазерного излучения $P = 21.5$ мВт (рис.3).

Для теоретических оценок сначала рассмотрим термомеханический эффект в плоскоориентированном нематике с директором $\mathbf{n} = \{n_x = \sin \theta, n_y = 0, n_z = \cos \theta\}$ в случае гибридной ориентации, когда $\theta = \pm \pi z/2L$ (L – толщина ячейки). Пусть для температур, поддерживаемых на подложках НЖК-ячейки, выполняется условие $T(z=0) > T(z=L)$. Тогда в присутствии градиента угла ориентации директора по координате z возникнет термомеханический гидродинамический поток, движущийся в направлении оси x со скоростью $V(z) = e_x V_x(z)$. Рассмотрим стационарную ($\partial/\partial t = 0$) и однородную в плоскости xy ($\partial/\partial x = \partial/\partial y = 0$) задачу. В термомеханическом одноконстантном приближении ($\xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_{12} = \xi$) уравнение Навье – Стокса получим в виде [1]

$$\begin{aligned}
 & (\eta_1 n_x^2 + \eta_2 n_z^2) \frac{d^2 V_x}{dz^2} + 2(\eta_1 - \eta_2) n_x n_z \frac{d\theta}{dz} \frac{dV_x}{dz} \\
 & = \frac{1}{4} \xi \nabla T \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 (3 - n_x n_z - 15n_x^2 + 16n_x^3 n_z + 12n_x^4) \quad (1) \\
 & + \frac{1}{4} \xi \nabla T \frac{d^2 \theta}{dz^2} (3 + 3n_x n_z - n_x^2 - 3n_x^3 n_z + 4n_x^4).
 \end{aligned}$$

Здесь $\nabla T = dT/dz$ – градиент температуры; η_1, η_2 – коэффициенты вязкости Мессовича.

Для конкретного вида распределения $\theta(z)$ надо численно решить уравнение (1) с граничными условиями $V_x(z=0) = V_x(z=L) = 0$ и получить распределение скорости $V_x(z)$. Последнее имеет вид, близкий к параболическому, с максимумом в центре ячейки. В случае гибрид-

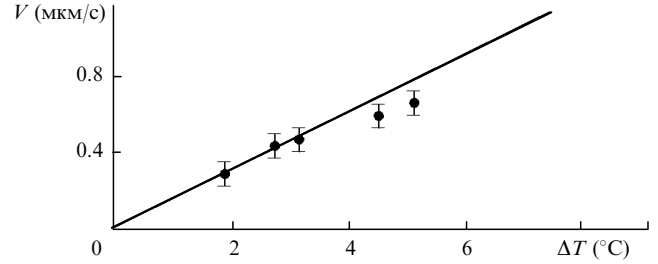


Рис.3. Зависимость скорости потока НЖК V от перепада температур на стенках ячейки ΔT при мощности лазерного излучения $P = 21.5$ мВт.

ной ориентации ячейки этот максимум описывается выражением

$$V_{\max} \approx 0.148 \frac{\Delta T}{L \xi (\eta_2 - \eta_1)}. \quad (2)$$

Теперь рассмотрим НЖК с исходно однородным распределением директора. В такой ячейке в отсутствие градиента директора термомеханический гидродинамический поток отсутствует. Однако при падении на ячейку линейно поляризованного лазерного излучения происходит светоиндуцированный переход Фредерикса, сущность которого заключается в том, что при мощности излучения выше некоторой пороговой мощности P_{th} директор НЖК переориентируется на угол

$$\theta = \theta_m \sin \frac{\pi z}{2L}, \quad \theta_m = 2 \left(\frac{P - P_{th}}{P_{th}} \right)^{1/2}. \quad (3)$$

Подставив распределение (3) в уравнение (1) и проинтегрировав его, получим, что максимальная скорость потока

$$V_{\max} = \frac{\pi \Delta T}{64 L \eta_2} \xi \theta_m. \quad (4)$$

Найденные зависимости скорости гидродинамического потока от перепада температур ΔT и мощности лазерного излучения P хорошо согласуются с экспериментальными результатами (рис.2, 3).

Таким образом, мы показали, что в однородно-гомеотропно ориентированной ячейке НЖК можно индуцировать термомеханический эффект световым полем. Этот эффект является еще одним примером превращения световой энергии в гидродинамическую.

Работа была поддержана INTAS (грант № 97-1672).

1. Акопян Р.С., Зельдович Б.Я. *ЖЭТФ*, **87**, 1660 (1984).
2. Лаврентович О.Д., Настишин Ю.А. *УФЖ*, **32**, 710 (1987).
3. Акопян Р.С., Алавердян Р.Б., Сантросян Э.А., Чилингарян Ю.С. *Письма в ЖТФ*, **23**, № 17, 77 (1997).
4. Акопян Р.С., Алавердян Р.Б., Сантросян Э.А., Нерсисян С.Ц., Чилингарян Ю.С. *Письма в ЖТФ*, **25**, № 6, 71 (1999).

R.S.Akopyan, R.B.Alaverdyan, E.A.Santrosyan, Yu.S.Chilingaryan. Hysteresis upon light-induced hydrodynamic reorientation of the director of a nematic liquid crystal.

The oscillations and hysteresis of the director of a nematic liquid crystal were observed upon its light-induced hydrodynamic reorientation caused by direct volume expansion. The light propagated through the liquid crystal placed between crossed polarisers provides the feedback. This light falls back on the liquid crystal and is absorbed by producing the volume expansion. A theory is suggested that describes the observed behaviour of the director of the nematic liquid crystal.