

## ФЛЕКСОЭЛЕКТРИЧЕСТВО КАПЕЛЬ НЕМАТИКА

О.Д. Лаврентович

Флексоэлектрический эффект в нематическом жидком кристалле (НЖК) заключается в возникновении макроскопической поляризации  $\vec{P}$  областей с неоднородным распределением директора  $\vec{n}$  [1]:

$$\vec{P} = e_1 \vec{n} \operatorname{div} \vec{n} + e_3 \operatorname{rot} \vec{n} \times \vec{n}, \quad (1)$$

где  $e_1$  и  $e_3$  — флексоэлектрические коэффициенты. Такие области в виде, например, отдельных капель НЖК, должны были бы проявлять кулоновское взаимодействие. Однако это предположение [1] подверглось критике [2], и исследований флексоэффекта в каплях не последовало. Изучению указанной задачи и посвящена настоящая работа.

Причиной поляризации капель НЖК является конечная кривизна их поверхности и неоднородное распределение  $\vec{n}$  [3]. Ниже рассмотрены три основные геометрии, которые приводят к поляризации соответственно монополярного, дипольного и квадрупольного типов.

1. Пусть в простейшей ситуации равновесному состоянию сферической капли НЖК радиуса  $R$  отвечает распределение директора в виде радиального ежа, записываемое в сферической системе координат  $(\vec{r}, \vec{\theta}, \vec{\varphi})$  как

$$n_r = 1, \quad n_\theta = n_\varphi = 0. \quad (2)$$

Поляризация (1) такой капли,  $\vec{P} = 2e_1 \vec{r}/r$  вызывает на ее поверхности заряд  $q_s = 8\pi e_1 R$ , который скомпенсирован зарядом  $q_v = -8\pi e_3 R$ , распределенным по объему капли с плотностью  $\rho = -2e_3/r^2$ . Для типичных значений  $|e_{r,3}| = 10^{-11}$  Кл/м [4] и  $R = 5 \cdot 10^{-6}$  м (которые будут использоваться и далее) получаем оценку  $q_{s,v} = 1.3 \cdot 10^{-15}$  Кл. Прежде всего следует выяснить, не экранированы ли эти заряды зарядом примесей, всегда присутствующих в НЖК:  $q_i = 4\pi R^3 \sigma / 3 \alpha$  где  $\sigma$  — удельная электропроводность НЖК,  $\alpha$  — подвижность носителей заряда. Условие  $q_{s,v}/q_i > 1$  будет выполняться для капель радиуса  $R$ , меньших некоторого критического  $R_c = (6e_3 \alpha / \sigma)^{1/2}$ . При  $\sigma = 6 \cdot 10^{-11}$  Ом $^{-1}$  м $^{-1}$  и  $\alpha = 10^{-10}$  м $^2$ /В·с [5] находим  $R_c = 10^{-5}$  м. Следовательно, даже не для рекордно чистых НЖК экспериментальное наблюдение следствий флексоэффекта вполне доступно. Одним из таких следствий может быть повышение стабильности коллоида капель НЖК по отношению к коагуляции, однако далее нас будут больше интересовать эффекты ориентационного упорядочения, связанные с дипольной и квадрупольной поляризациями.

2. Дипольную поляризацию проще всего реализовать в уплощенных каплях, расположенных на изотропной подложке. Пусть для опре-

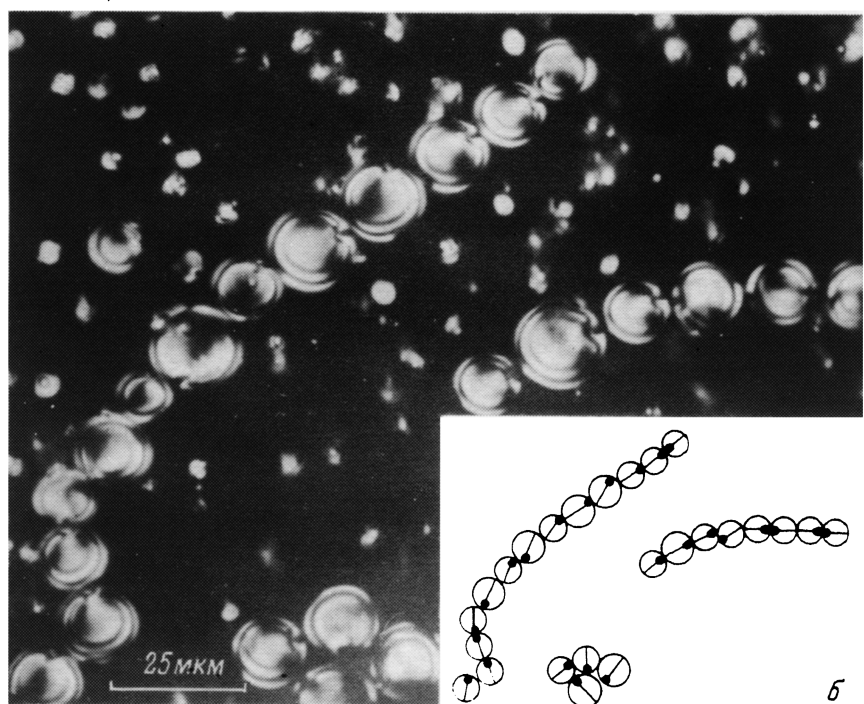
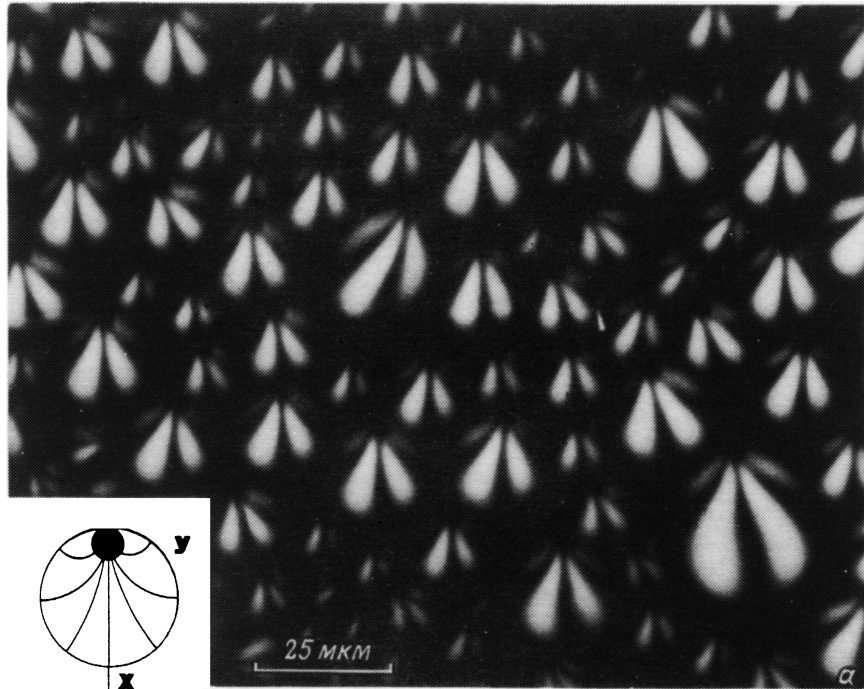


Рис. 1. Микрофотографии упорядоченных систем капель НЖК на жесткой (а) и жидкой (б) подложках. Поляризованный свет.

деленности капли имеют форму шайб радиусом  $R$  и высотой  $h$ , а распределение  $\vec{n}$  согласующееся с экспериментально наблюдаемыми структурами (рис. 1), удовлетворяет нормальным граничным условиям на боковой цилиндрической поверхности и тангенциальным - на верхней и нижней и в декартовых координатах  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  имеет вид

$$n_x = \cos 2\eta(x, y), \quad n_y = \sin 2\eta(x, y), \quad n_z = 0, \quad (3)$$

где  $\eta$  - угол между радиусом-вектором  $\vec{r}$  и осью  $x$ . Распределение директора обладает сингулярностью, расположенной в начале координат.

Используя выражения (1) и (3), находим полный дипольный момент капли  $\vec{\mu} = \int \vec{P} dV$ , который направлен вдоль оси симметрии структуры (ось  $x$ ):

$$\vec{\mu} = \pi(e_1 - e_3) R h \hat{x}. \quad (4)$$

Для оценки эффективности диполь-дипольного взаимодействия капель положим  $e_1 = -e_3$  и введем безразмерную константу  $\lambda = \mu^2 / 4\pi \epsilon_0 a^3 k_B T$ , где  $a$  - расстояние между каплями,  $T$  - абсолютная температура,  $k_B$  - постоянная Больцмана,  $\epsilon_0$  - электрическая постоянная. При комнатных температурах  $k_B T = 4 \cdot 10^{-21}$  Дж и размерах  $R = 5 \cdot 10^{-6}$  м,  $h = 2 \cdot 10^{-6}$  м константа  $\lambda$  больше 1, начиная с расстояний  $a = 10^{-4}$  м (и меньших). Как свидетельствуют численные расчеты для аналогичных систем [6], при  $\lambda \geq 60$  возможно образование упорядоченной фазы диполей. В рассматриваемой ситуации точке фазового перехода соответствуют расстояния между каплями в  $2.4 \cdot 10^{-5}$  м.

Примеры упорядоченных фаз капель НЖК (вещество ЖК-440), каждая из которых обладает структурой дипольной симметрии, представлены на рис. 1, а, б. Капли размещались на подложках, задающих вырожденные тангенциальные условия ориентации директора на границе. В первом случае - на жесткой полиизобутиленовой пленке, во втором - на жидкой поверхности  $\alpha, \omega$ -акрил-бил-(пропилгликоль)-2,4-толуиленидиоритана, по которой капли могли перемещаться, образуя в результате протяженные или замкнутые цепочки. Цепочки содержат домены с чередующимися направлениями дипольных моментов, которые всюду остаются коллинеарными оси цепочки. Домены возникают и в двумерных массивах; один из них изображен на рис. 1, а.

3. Сферические капли НЖК, взвешенные в матрице, которая вынуждает молекулы располагаться параллельно границе раздела, приобретают биполярную структуру (рис. 2, вставка) [3]. В биполярной системе координат  $(\hat{\delta}, \hat{r}, \hat{\varphi})$  [7]

$$n_\delta = n_\varphi = 0, \quad n_r = 1 \quad (5)$$

и для поляризации находим из (1)

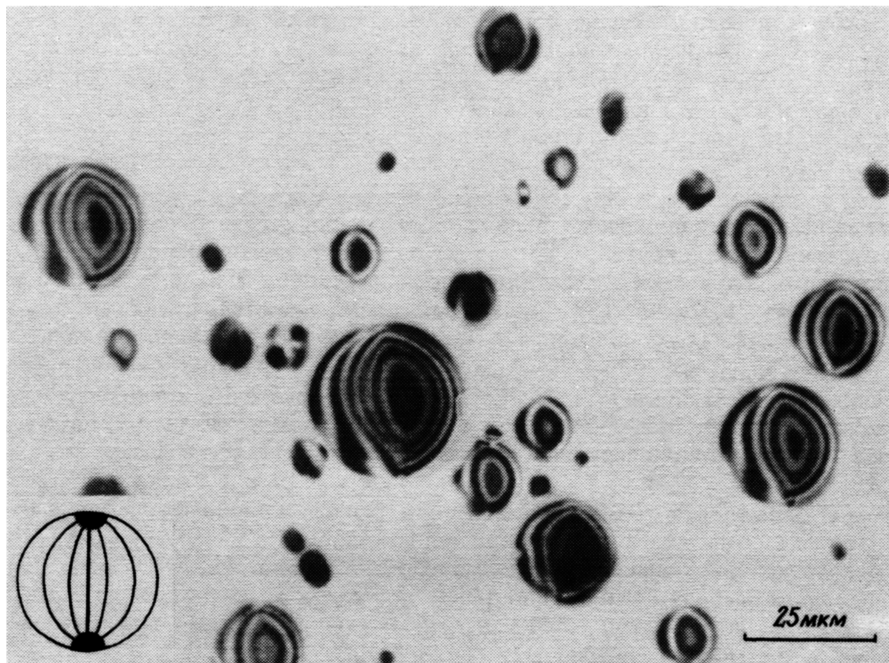


Рис. 2. Микрофотография сферических капель НЖК (бутоксифениловый эфир нонилоксибензойной кислоты), свободно взвешенные в глицерине. Поляризованный свет, негативное изображение.

$$\vec{p} = (e_3 \vec{\sigma} \sin \sigma - 2e_1 \vec{\tau} \operatorname{sh} \tau) / R, \quad (6)$$

а для плотности заряда

$$\rho = 2[e_1(t - \operatorname{ch} \tau \cos \sigma - \operatorname{sh}^2 \tau) + e_3(t - \operatorname{ch} \tau \cos \sigma)] / R^2. \quad (7)$$

Выражения (6) и (7) описывают конфигурации квадрупольного типа ( $\int \vec{p} dV = 0$ ): максимальная плотность заряда сосредоточена на полюсах капли ( $\tau = \pm \infty$ ) и в ее центре ( $\tau = 0, \sigma = \pi$ ), причем заряды на полюсах одноименны. Последнее обстоятельство, не учтенное в [1], и послужило основанием критики [2] трактовки наблюдавшегося Мейером [1] притяжения полюсов близко расположенных капель как следствия флексоэлектрического эффекта.

Квадруполь-квадрупольное взаимодействие также способно приводить к образованию упорядоченной фазы капель (рис. 2): константа этого взаимодействия  $\lambda_{QQ} = Q^2 / 4\pi \epsilon_0 a^5 k_B T > 1$ , если  $a < 6 \cdot 10^{-5}$  м ( $Q$  оценено как  $4\pi \epsilon R$ ).

Отметим также возможность дипольной поляризации сферических капель, которая, вероятно, объясняет упомянутое выше взаимопритя-

тяжение полюсов. Если ориентация молекул НЖК на поверхности не является строго тангенциальной или нормальной, то распределение  $\vec{\pi}$  приобретает симметрию  $C_{\infty}$ , полюса - неодинаковые заряды, а сама капля - дипольный момент

$$\mu = 2\pi k R^2, \quad (8)$$

зависящий от конкретного вида поля  $\vec{\pi}$ , что учтено в (8) путем введения коэффициента  $k$ . В соответствии с теорией Борна [5], предложенной в свое время для описания самого НЖК, при условии  $\mu > \mu_c = (9k_B T a^3 \epsilon_0)^{1/2}$  трехмерный ансамбль подобных капель должен быть ориентационно-упорядоченным. Указанное условие действительно реализуемо: при комнатных температурах и расстояниях между каплями в  $2 \cdot 10^{-5}$  м находим борновский критический момент  $\mu_c = 5 \cdot 10^{-23}$  Кл·м, в то время как достижимые значения  $\mu$  из (8) значительно больше:  $\mu = 1.5 \cdot 10^{-21}$  Кл·м при  $k = 1$ .

В заключение уместно сравнить энергию взаимодействия, вызванного флексоэффектом (например, диполь-дипольного,  $U_{\mu\mu} = \mu^2 / 4\pi\epsilon_0 a^3$ ), с энергией дисперсионного взаимодействия капель [2, 8]. Оценкой последней выберем выражение [8]  $U_{dd} = AR / 12a$ , где  $A = 10^{-19}$  Дж - постоянная Гамакера. Легко видеть, что при сделанных выше оценках параметров  $U_{\mu\mu} / U_{dd} > 1$ , если  $a < 7 \cdot 10^{-4}$  м. Иными словами, на тех масштабах, на которых ожидается „когерентное“ поведение капель, превалирующим оказывается флексоэлектрическое взаимодействие.

Как следует из вышеизложенного, электрическая поляризация капель НЖК, вызванная флексоэффектом, способна играть важную роль в их коллективном поведении, что в дальнейшем было бы интересно изучить более детально экспериментально. Описанные эффекты могут проявляться и в других системах - коллоидных, лиотропных и биологического происхождения.

Искренне признателен Э.С. Гюльназарову за предоставление полимерного вещества для исследований.

## Л и т е р а т у р а

- [1] M e y e r R.B. - Phys. Rev. Lett., 1969, v. 22, No 18, p. 918-921.
- [2] D e G e n n e s P.G. - C.R. Acad. Sc. Paris, 1970, v. 271, Sér. B, No 9, p. 469-471.
- [3] В о л о в и к Г.Е., Л а в р е н т о в и ч О.Д. - ЖЭТФ, 1983, т. 85, в. 6(12), с. 1997-2010.
- [4] D o z o v L, M a r t i n o t - L a g a r d e Ph., D u r a n d G. - J. Phys. Lett., 1983, v. 44, No 19, p. L-817-L-822.
- [5] Б л и н о в Л.И. Электро- и магнитооптика жидких кристаллов. М.: Наука, 1978. 384 с.

- [6] В е д а н о в V.M., G a d i y a k G.V.,  
L o z o v i k Yu.E. - Phys. Lett., 1982, v. 92A,  
No 8, p. 400-402.
- [7] К о р н Г., К о р н Т. Справочник по математике. М.:  
Наука, 1978, с. 195.
- [8] Д е р я г и н Б.В. Теория устойчивости коллоидов и тонких  
пленок. М.: Наука, 1986. 208 с.

Институт физики  
АН УССР, Киев

Поступило в Редакцию  
18 октября 1987 г.

Письма в ЖТФ, том 14, вып. 2

26 января 1988 г.

### ЖИДКОФАЗНЫЕ $AlGaAs$ - СТРУКТУРЫ С КВАНТОВО-РАЗМЕРНЫМИ СЛОЯМИ ТОЛЩИНОЙ ДО $\sim 20 \text{ \AA}$

Ж.И. А л ф е р о в, В.М. А н д р е е в,  
С.Г. К о н н и к о в, В.Р. Л а р и о н о в,  
К.Ю. П о г р е б и ц к и й, Н.Н. Ф а л е е в,  
В.П. Х в о с т и к о в

В работах [1-4] нами было показано, что при снижении температуры кристаллизации из раствора-расплава возможно получение  $AlGaAs$  - структур с толщинами слоев менее  $100 \text{ \AA}$ . Из исследований фотолюминесценции  $AlGaAs$  -структур со слоями толщиной  $50-100 \text{ \AA}$  было найдено [3, 4], что флуктуация толщины квантово-размерных слоев, получаемых методом низкотемпературной ЖФЭ, не превышает  $\pm 1$  монослой, а внутренний квантовый выход излучательной рекомбинации в этих слоях близок 100% при 300 К.

В лазерах на основе таких структур с узкозонными слоями толщиной  $100-150 \text{ \AA}$  и расширенной волноводной полостью были достигнуты пороговые плотности тока  $j_n = 200 \text{ А/см}^2$  (300 К) при длине резонатора 500 мкм, сравнимые с минимальными  $j_n$  в  $AlGaAs - GaAs$  лазерах, изготовленных методами молекулярной и МОС-гидридной эпитаксии и в  $GaAs - GaInPAs$  лазерах, полученных модифицированным методом ЖФЭ при минимальном времени контакта расплава с подложкой [5, 6].

В данной работе приводятся результаты исследования концентрационных профилей  $AlGaAs$  -структур, полученных методом низкотемпературной ЖФЭ, толщина узкозонных слоев в которых составляет от  $\sim 100 \text{ \AA}$  до  $15-20 \text{ \AA}$ .

Послойный анализ состава проводился методом, основанным на определении разностей фотоэмиссии электронов на скачках рентгеновского поглощения (методом ОРФЭС) [3, 7]. Метод обладает разрешением  $10-20 \text{ \AA}$ . При этом максимальное разрешение реализуется при анализе участков структур, расположенных на расстоянии  $200-1000 \text{ \AA}$  от поверхности.