

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЕРЕОРИЕНТАЦИИ БИПОЛЯРНЫХ КАПЕЛЬ НЕМАТИКА С ЖЕСТКО ФИКСИРОВАННЫМИ ПОЛЮСАМИ

А.В.Шабанов, В.В.Пресняков, В.Я.Зырянов¹⁾, С.Я.Ветров

Институт физики им. Л.В.Киренского Сибирского отделения РАН
660036 Красноярск, Россия

Поступила в редакцию 7 апреля 1998 г.

Проведен расчет конфигурации директора в биполярной капле нематика с жестко фиксированными полюсами в зависимости от величины электрического поля, направленного перпендикулярно оси симметрии капли. Показан двойственный характер процесса переориентации капли: пороговый в области, где исходная ориентация директора была ортогональна электрическому полю, и беспороговый для остального объема капли. Получено соотношение для определения критического значения поля. Экспериментальные исследования характеристик рассеянного света для пленки капсулированных полимером жидких кристаллов подтвердили результаты расчетов.

PACS: 61.30.-v

Из экспериментальных и теоретических исследований [1–3] эффекта переориентации биполярных капель нематического жидкого кристалла (ЖК) под действием электрического поля, направленного перпендикулярно оси симметрии, следует, что данный процесс является пороговым и проходит в три стадии. При малом напряжении изменение ориентационной структуры капли не наблюдалось. После достижения порогового поля полюса капли начинали передвигаться, и биполярная конфигурация директора поворачивалась так, что ось симметрии ориентировалась вдоль по полю, если анизотропия диэлектрической проницаемости ЖК положительна. Дальнейшее увеличение напряжения приводило к вытягиванию линий директора во всем объеме капли вдоль поля [1, 3]. В то же время авторы [1] не исключили возможности жесткого закрепления обоих полюсов капли, которое, по их предположению, обусловит также пороговый характер переориентации капли с зарождением на каждом из полюсов линейной дисклинации. Жесткая фиксация обоих полюсов была обнаружена экспериментально [4] в ансамбле биполярных капель нематического ЖК 5ЦБ, диспергированных в поливинилбутирале. В настоящей работе проводится теоретический расчет ориентационной структуры таких капель в зависимости от величины электрического поля. Результаты расчета анализируются в сопоставлении с экспериментально измеренными характеристиками света, рассеянного пленкой капсулированных полимером жидких кристаллов (КПЖК).

Для расчета конфигурации директора в капле нематика под действием электрического поля использовалась стандартная процедура [3] минимизации свободной энергии, записанной в одноконстантном приближении:

$$F = \frac{1}{2} \int \{ K[(\operatorname{divn})^2 + (\operatorname{rotn})^2] - \epsilon_0 \Delta \epsilon (\mathbf{nE})^2 \} dV, \quad (1)$$

¹⁾ e-mail: mspec@iph.krasnoyarsk.su

где \mathbf{n} – директор ЖК, K – модуль упругости, $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, ϵ_{\parallel} , ϵ_{\perp} – компоненты диэлектрической проницаемости, \mathbf{E} – вектор напряженности электрического поля. Предполагаем жесткое сцепление молекул ЖК с поверхностью полимерной матрицы, а электрическое поле внутри капли – однородным. Ориентация директора на границе раздела планарная. В отличие от [3], в двух диаметрально противоположных точках на поверхности капли (на оси Z , рис.1) задается гомеотропная ориентация директора, а вектор \mathbf{E} направлен вдоль оси X .

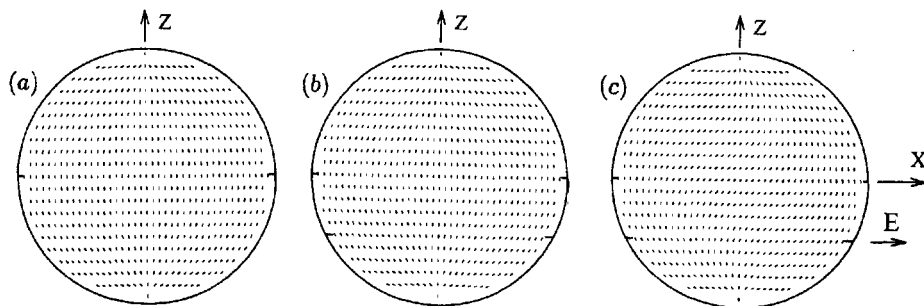


Рис.1. Ориентационная структура биполярной капли нематика в плоскости XZ при: а) $E_n = 0$; б) $E_n = 3.2$; в) $E_n = 3.7$

На рис.1 показаны результаты расчета ориентационной структуры сферической капли нематика в сечении ZX для трех значений нормированного электрического поля:

$$E_n = E/E_0; \quad E_0 = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{K}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}}. \quad (2)$$

Здесь R – радиус капли. При $E = 0$ (рис.1а), как и в [3], реализуется биполярная конфигурация директора с осью симметрии, направленной по оси Z . Точечные дефекты (буджумы [5]) совпадают с точками гомеотропной ориентации директора.

Под действием поля конфигурация директора начинает изменяться. Вначале отмечается изменение ориентации только в тех областях, где векторы \mathbf{E} и \mathbf{n} не ортогональны, при этом симметрия упорядочения директора в плоскости XZ остается прежней, но увеличивается угол наклона \mathbf{n} по отношению к оси Z (рис.1б). Директор ЖК в точках, расположенных на оси Z и в плоскости XY остается неподвижным. Более наглядно данный процесс представлен на рис.2 для центральной точки капли и для точки, смещенной вправо и вверх от центра на $R/2$ по координатам Z и X .

Ситуация существенно изменяется для $E_n > 3.3$ (рис.1с и рис.2). Директор в центре капли и в других точках, расположенных на оси Z и в плоскости XY , начинает поворачиваться. Линии директора образуют характерный S -образный изгиб. Начало поворота в одну или в другую сторону равновероятно, а результирующие картины будут зеркально симметричны относительно плоскости XY . Дальнейшее увеличение поля приводит к все более однородной ориентации директора в объеме капли вдоль по полю. Следует отметить, что значение поля

$$E_c = 3.3 \frac{1}{R} \sqrt{\frac{K}{\epsilon_0 \Delta\epsilon}} \quad (3)$$

является критической величиной для всего объема капли. Для точек с исходной ортогональностью векторов \mathbf{E} и \mathbf{n} оно имеет смысл порогового поля, для остального

объема капли проявляется резким изломом зависимости ориентации директора от величины поля (рис.2).

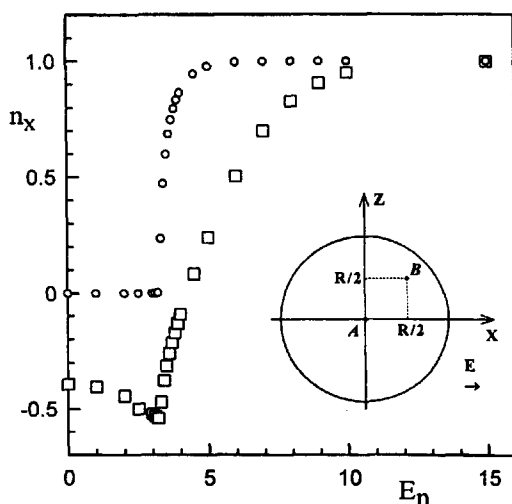


Рис.2. Зависимость проекции директора ЖК на ось X от величины электрического поля для точек A(o) и B(\square), расположение которых внутри капли показано на вставке

Исследуемые экспериментально образцы КПЖК, приготовленные аналогично [4], представляли собой пленку поливинилбутираля толщиной 15 мкм с диспергированными в ней каплями нематического жидкого кристалла 5ЦБ. Капли ЖК круглой формы имели максимальный диаметр в плоскости пленки 19 мкм и располагались в один слой, что позволяло проводить визуальные наблюдения процесса переориентации с использованием поляризационного микроскопа. В отсутствие поля в скрещенных поляризаторах капли проявляли характерную для биполярной конфигурации директора текстуру [5], причем полюса располагались так, что связывающая их ось во всех каплях лежала в плоскости пленки. Образец помещался между двумя стеклянными подложками с прозрачными электродами на внутренних сторонах. Таким образом, в эксперименте выполнялось условие ортогональности направления электрического поля и исходной оси симметрии капель. Интенсивность света, рассеянного КПЖК пленкой под углом α к направлению нормально падающего луча гелий-неонового лазера, в зависимости от приложенного напряжения регистрировалась с использованием двухкоординатного графопостроителя.

Из теоретического анализа в приближении геометрической оптики [6] характеристик рассеяния света ансамблем капель ЖК, размеры которых превышают длину волны света, следует, что основной вклад в интенсивность прямо проходящего излучения обусловлен лучом, траектория которого проходит по оси X через центр капли. Следовательно, в нашем случае зависимость интенсивности прямо проходящего излучения от приложенного поля должна иметь пороговый характер. Траектории лучей, проходящих через боковые области капли, искривляются вследствие градиента показателя преломления на границе раздела "полимер - ЖК" и его плавного изменения внутри капли [6]. Поэтому свет, рассеянный под углом $\alpha \neq 0$, несет в себе информацию об ориентации директора в боковых областях капли, и зависимость его интенсивности от поля должна иметь беспороговый вид.

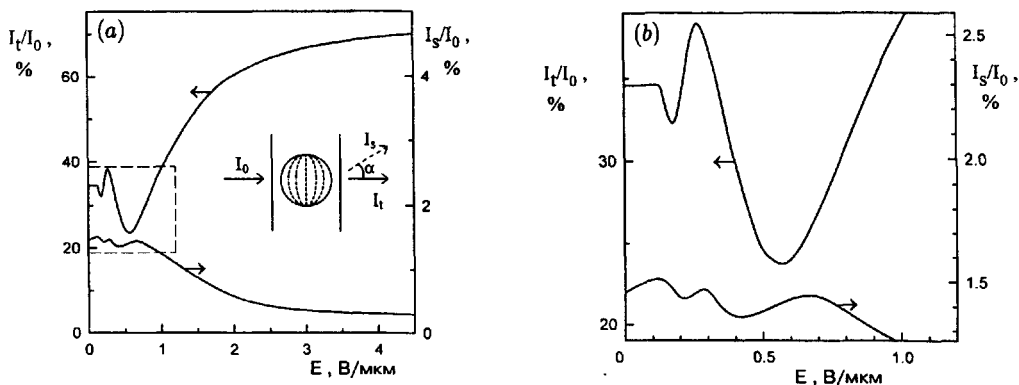


Рис.3. а) Зависимость интенсивности прямо проходящего излучения I_t и рассеянного под углом $\alpha \approx 7^\circ$ I_s от приложенного поля. б) Выделенный фрагмент (см. рис. а) в увеличенном масштабе

Экспериментальные данные (рис.3) подтверждают эти выводы. Здесь измерялась интенсивность проходящего излучения в пределах угла $0 \leq \alpha \leq 0.5^\circ$ и излучения, выделенного кольцевой диафрагмой в пределах угла рассеяния $6.8 \leq \alpha \leq 8.5^\circ$. Осцилляции на кривых прямо проходящего излучения выше порога были обнаружены и обсуждались ранее в [4]. Как видно, кривая светорассеяния имеет беспороговый характер и также осциллирует.

Измеренная величина критического поля E_c для исследуемого образца составляет 0.13 В/мкм. Оценка по формуле (3) с использованием параметров: $K = (K_{11} + K_{22} + K_{33})/3$, $K_{11} = 6.2 \cdot 10^{-12}$ Н, $K_{22} = 3.1 \cdot 10^{-12}$ Н, $K_{33} = 8.3 \cdot 10^{-12}$ Н [7], $\Delta\epsilon = 11.8$ [8], $R = 9.5$ мкм дает значение критического поля $E_c = 0.08$ В/мкм. В расчетах использовался радиус капле максимальной величины; так как пороговое поле для них минимально, следовательно, они определяют величину E_c для ансамбля капле разного размера. Расхождение между расчетным и экспериментально измеренными значениями E_c в основном обусловлено двумя факторами. Во-первых, реальная форма капле ЖК в таких образцах представляет собой сплюснутый в плоскости пленки эллипсоид с соотношением осей около 1.7 [9]. Вследствие этого необходима модификация расчетной модели для учета эллипсоидальности капле. Понятно, что уменьшение размера капле хотя бы по одной из координат приведет к увеличению расчетного значения E_c . Вторым фактором является перераспределение приложенного электрического поля в структуре "полимер – ЖК". Так как диэлектрическая проницаемость у ЖК 5ЦБ больше, чем у поливинилбутиральной матрицы ($\epsilon_{\perp}/\epsilon_p = 1.46$ [4]), то критическое значение действующего внутри капле поля будет составлять величину, меньшую, чем приложенное поле $E_c = 0.13$ В/мкм.

Таким образом, из результатов работы следует, что процесс переориентации биполярных капле нематика в общем смысле является беспороговым. Причем этот вывод должен касаться и капле с подвижными полюсами. Говорить о пороговом характере можно лишь в отношении отдельных аспектов процесса, а именно: о начале передвижения полюсов капле в случае их нежесткого закрепления либо о начале локального поворота области капле с исходной ортогональностью векторов \mathbf{E} и \mathbf{p} в случае жесткой фиксации полюсов. Нельзя исключить возможность комбинации двух типов переориентации биполярных капле, когда вначале конфигурация директора

будет изменяться так, как показано на рис.1, а при дальнейшем увеличении поля начнется передвижение полюсов. По-видимому, начало изменений в конфигурации директора (рис.1а, б) не удалось обнаружить посредством визуальных наблюдений [1, 2, 4] вследствие малых отклонений \mathbf{n} и недостаточной чувствительности глаза. Следует отметить, что, вопреки предположению [1], начало поворота центральной части капли (рис.1с) не сопровождается образованием линейных дисклинаций.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки РФ (программа "Физика квантовых и волновых процессов", грант 2.3) и Министерства образования РФ (программа "Фундаментальное естествознание").

-
1. А.В.Ковальчук, М.В.Курик, О.Д.Лаврентович, В.В.Серган, ЖЭТФ **94**, 350 (1988).
 2. А.В.Ковальчук, О.Д.Лаврентович, В.В.Серган, Письма в ЖТФ **14**, 197 (1988).
 3. S.Zumer and J.W.Doane, Phys. Rev. A **34**, 3373 (1986).
 4. В.Я.Зырянов, В.В.Пресняков, В.Ф.Шабанов, Письма в ЖТФ **22**, 22 (1996).
 5. Г.Е.Воловик, О.Д.Лаврентович, ЖЭТФ **85**, 1997 (1983).
 6. R.D.Sherman, Phys. Rev. A **40**, 1591 (1989).
 7. J.D.Bunning, T.E.Faber, and P.L.Sherrell, J. Physique **42**, 1175 (1981).
 8. С.Чандрасекар, *Жидкие кристаллы*, М.: Мир, 1980. (S.Chandrasekhar, *Liquid Crystals*, Cambridge University Press, 1977).
 9. P.S.Drzaic and A.Muller, Liq. Cryst. **5**, 1467 (1989).