

КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Жидкие кристаллы"

(28 февраля 2005 г.)

28 февраля 2005 г. в конференц-зале Физического института им. П.Н. Лебедева РАН состоялась Объединенная научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединенного физического общества Российской Федерации "Жидкие кристаллы". На сессии были заслушаны доклады:

1. **Долганов В.К.** (Институт физики твердого тела РАН, Черноголовка, Московская обл.). *Структуры и фазовые переходы в тонких жидкокристаллических пленках.*

2. **Палто С.П.** (Институт кристаллографии им. А.В. Шубникова РАН, Москва). *Электрооптика и фотоника жидких кристаллов.*

Краткое содержание докладов публикуется ниже.

PACS numbers: 61.30. – v, 64.70.Md

Структуры и фазовые переходы в тонких жидкокристаллических пленках

В.К. Долганов

1. Введение

Жидкие кристаллы уже не одно десятилетие привлекают к себе внимание исследователей с точки зрения как фундаментальной физики, так и технических приложений. Можно выделить следующие направления в изучении жидких кристаллов.

1. Поиск и исследования новых типов жидкокристаллических структур. Несмотря на более чем столетнюю историю жидких кристаллов, круг молекулярных структур, которые образуют жидкокристаллическое состояние, продолжает расширяться, при этом зачастую вновь синтезированные вещества имеют необычные, не имеющие аналогов структуры. Свежим примером могут служить структуры, образованные изогнутыми (banana-like) молекулами.

2. Исследования, направленные на создание нового поколения систем отображения информации, в частности, с использованием полярных жидких кристаллов и эффектов бистабильности.

3. Изучение биологических объектов, обладающих элементами жидкокристаллического упорядочения.

4. Фундаментальные исследования жидких кристаллов.

Большинство этих исследований представляет общефизический интерес. Примером могут служить изучение влияния поверхности и ограниченных размеров образцов на структуру, фазовые переходы и физические свойства, взаимодействие и самоорганизация частиц больших размеров (микрон, десятки микрон) в жидкокристаллических пленках, о которых будет идти речь в настоящей статье. У всех этих исследований общий объект — тонкие жидкокристаллические пленки.

Смектические жидкие кристаллы имеют слоистую структуру с толщиной слоя порядка длины органических молекул (~ 3 нм), образующих жидкий кристалл [1]. В наиболее простом смектическом жидком кристалле, смектике A ($Sm A$), длинные оси молекул перпендикулярны плоскости смектических слоев. В смектиках C молекулы наклонены на угол θ относительно нормали смектического слоя. Многообразие смектических C -структур связано с возможностью различной азимутальной ориентации молекул (угол ϕ) в слоях: $Sm C$ (молекулы наклонены в одну сторону, синклинная структура); сегнетоэлектрическая фаза $Sm C^*$ (хиральность молекул, образующих эту фазу, приводит к закрученной структуре в направлении нормали смектического слоя); антисегнетоэлектрическая фаза $Sm C_A^*$ (в соседних слоях молекулы наклонены в противоположные стороны, антиклинная структура); структура $Sm B$ с ориентационно упорядоченными связями в плоскости смектических слоев.

Из смектических жидких кристаллов могут быть приготовлены тонкие свободно подвешенные пленки толщиной от двух до сотен молекулярных слоев. Две поверхности пленок граничат с воздухом, что существенно отличает их от пленок на подложке, которая иногда искажает структуру поверхностных слоев. Можно приготовить пленки высокого качества — без дефектов поверхности (ступенек и т.п.), дислокаций, ориентационных дефектов. Высокое совершенство свободно подвешенных пленок делает их очень удобными объектами для исследований.

2. Влияние поверхности и ограниченных размеров жидкокристаллических пленок на структуру, фазовые переходы и физические свойства

Можно выделить три эффекта, связанных с существованием поверхности.

1. Чисто геометрический фактор: поверхностные слои взаимодействуют со смектическими слоями только с одной стороны от поверхности.

2. Поверхность представляет собой физическую границу раздела между двумя средами. Поверхностное натяжение подавляет флуктуации смектических слоев у поверхности, их амплитуда заметно меньше, чем в объеме смектика. В частности, поверхностные слои оказываются более упорядоченными (с большей величиной параметра порядка), чем в объеме. В пленках эти два эффекта могут конкурировать между собой.

3. В тонкой пленке существенными становятся эффекты пространственного ограничения и взаимодействия между поверхностями пленки.

Одним из наиболее ярких экспериментальных эффектов, в котором проявляется конкуренция между объемными и поверхностными свойствами смектиков, является послойное утоньшение смектических пленок [2–5]. Тонкие смектические пленки не плавятся при температуре фазового перехода в объемном образце T_C . Плавление заменяется серией переходов, при которых толщина пленки уменьшается на один слой. Утоньшение пленок начинается при температуре несколько выше T_C и заканчивается, когда толщина пленки становится равной двум молекулярным слоям. Двухслойная пленка при температуре $T \approx T_C + 30$ К разрушается (лопается). При каждом переходе утоньшения вещество одного молекулярного слоя уходит на границу пленки (в мениск) и находится там в расплавленном состоянии. Температурная зависимость переходов утоньшения близка к температурной зависимости корреляционной длины смектического упорядочения, которое локально существует в объемном образце выше температуры плавления. Плоская поверхность пленки стабилизирует слоистую структуру в поверхностном слое выше температуры объемного фазового перехода. Если корреляционная длина поверхностного упорядочения ξ_S достаточно большая, слоевое упорядочение, индуцированное двумя поверхностями, эффективно перекрывается, и пленка трансляционно упорядочена. Уменьшение ξ_S с температурой уменьшает параметр трансляционного порядка в центре пленки и приводит к структурной неустойчивости. Стабилизация трансляционного упорядочения в пленке происходит за счет уменьшения ее толщины (через рождение и увеличение в размерах дислокационной петли). Таким образом, температура плавления T_C заменяется в тонкой пленке температурой структурной неустойчивости T_N , которая зависит от толщины пленки. Число слоев в пленке N , по существу, становится дискретным свободным параметром, изменение которого позволяет пленке не плавиться, а оставаться трансляционно упорядоченной.

Послойное утоньшение смектических пленок наглядно демонстрирует, как сильно может трансформироваться фазовый переход в образцах малых размеров. Этот пример также показывает, как может измениться поверхность. В данном случае структура на поверхности остается той же, что и в объеме. Трансформация фазового перехода происходит из-за различия в величине

параметра порядка на поверхности и в объеме пленки. В высокотемпературной фазе образца больших размеров возникают области скоррелированного расположения молекул, которые являются предвестниками фазового перехода и характеризуются корреляционной длиной. В пленках температурное изменение корреляционной длины напрямую проявляется в температурном изменении толщины пленки. Вблизи T_N наблюдаются и другие эффекты, связанные со структурной нестабильностью пленки, в частности, образование сетки линейных дефектов с разрывом двумерного поля ориентационного упорядочения молекул [5].

Неоднородность профиля параметра порядка в тонких пленках приводит к существенным изменениям их физических характеристик по сравнению с объемным образцом. Примером может служить трансформация полярных характеристик. В сегнетоэлектрическом жидком кристалле $Sm C^*$ (полярная группа симметрии C_2) объемная поляризация непосредственно связана с хиральностью молекул [6]. Хиральность приводит к возникновению спиральной структуры и поляризации P_T , перпендикулярной локальной плоскости наклона молекул (поперечная поляризация). Поперечная флексоэлектрическая поляризация P_T^f пропорциональна $\partial\varphi/\partial z$. Однако возникновение поляризации, вообще говоря, не обязательно должно быть связано с хиральностью (с изменением φ , т.е. с деформацией кручения). Ориентационный порядок в наклонных смектических фазах характеризуется двухкомпонентным параметром порядка $\psi = \theta \exp(i\varphi)$. В пленках модуль параметра порядка (угол наклона молекул θ) у поверхности превосходит его величину в середине пленки (рис. 1а). Возникающая вследствие этого флексоэлектрическая поляризация P_L^f пропорциональна $\partial\theta/\partial z$ и лежит в плоскости наклона молекул (продольная поляризация) [7]. Изменение угла наклона молекул в соседних слоях (деформация изгиба) может быть больше деформации, вызванной хиральностью. Оценки показывают, что величина продольной поляризации может быть порядка 10^{-4} Кл m^{-2} , т.е. при высокой температуре она сопоставима по величине или больше поперечной поляризации. При низкой температуре, когда угол наклона молекул в центре пленки большой, пленка обладает поперечной поляризацией P_T , поскольку продольная поляризация в верхней и нижней частях пленки направ-

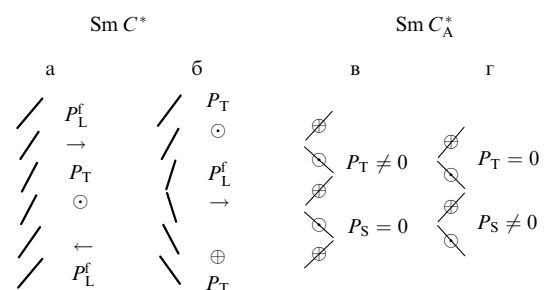


Рис. 1. Ориентация длинных осей молекул в пленках $Sm C^*$ с поперечной (перпендикулярной плоскости наклона молекул) P_T (а) и продольной (параллельной плоскости наклона молекул) P_L^f (б) электрической поляризацией [7]. Смектические слои расположены горизонтально. В тонких пленках $Sm C_A^*$ [8] с нечетным числом молекулярных слоев поляризация поперечная P_T (в), в пленках с четным числом слоев поляризация продольная P_S (г).

лены в противоположные стороны и взаимно компенсируются (рис. 1а). При высокой температуре (выше температуры объемного фазового перехода $\text{Sm } C^* - \text{Sm } A$) угол наклона молекул θ в центре пленки небольшой. Происходит переход пленки в конфигурацию, в которой молекулы наклонены в разные стороны в нижней и в верхней частях пленки (рис. 1б). В этой структуре поперечная поляризация P_T в двух половинах пленки компенсируется, а продольная поляризация P_L^1 во всей пленке направлена в одну сторону. Этот механизм возникновения поляризации не связан с хиральностью, поэтому он реализуется также в смектических пленках нехиральных ($\text{Sm } C$) жидких кристаллов [7].

В антиклинной структуре антисегнетоэлектрических жидких кристаллов ($\text{Sm } C_A^*$) поляризация соседних слоев направлена в противоположные стороны, и объемный образец не обладает электрической поляризацией. Тонкие пленки, в отличие от объемных образцов, обладают электрической поляризацией [8]. Симметрия тонких пленок разрешает существование поперечной поляризации в пленках с нечетным числом слоев и продольной поляризации в пленках с четным числом слоев [8]. Происхождение этих поляризаций различно. В пленках с нечетным числом слоев поперечная слоевая поляризация P_T нескомпенсирована (рис. 1в, поляризация трех слоев направлена в плоскость рисунка, а в двух слоях из плоскости рисунка). В пленках с четным числом слоев поперечная поляризация нулевая (пленки имеют равное число слоев, в которых молекулы наклонены в противоположные стороны, рис. 1г). Продольная поляризация этих пленок P_S связана с модификацией поверхностных слоев. Ее величина составляет порядка 0,2 от величины слоевой поляризации [9]. Ориентация молекул в электрическом поле различна для пленок с четным и нечетным числом слоев [8]. На рисунке 2, взятом из работы [10], приведено отношение интенсивностей света, поляризованного перпендикулярно (I_1) и параллельно (I_2) направлению электрического поля. У пленок с нечетным числом слоев $I_1/I_2 > 1$ (плоскость наклона молекул перпендикулярна электрическому полю), в пленках с четным числом слоев $I_1/I_2 < 1$ (плоскость наклона молекул параллельна

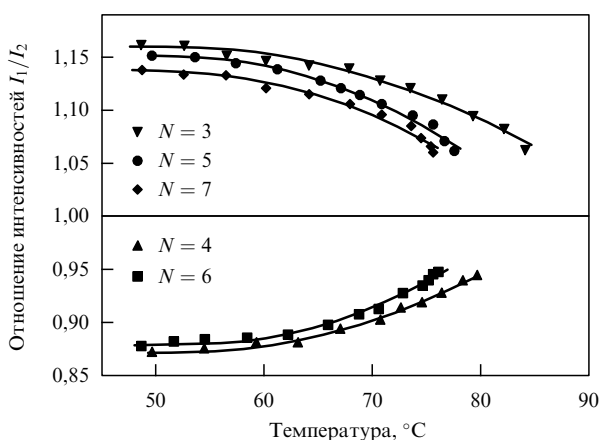


Рис. 2. Отношение оптического отражения, поляризованного перпендикулярно (I_1) и параллельно (I_2) электрическому полю в фазе $\text{Sm } C_A^*$ в тонких пленках с четным и нечетным числом слоев (из работы [10]). В пленках с нечетным числом молекулярных слоев электрическая поляризация поперечная, в пленках с четным числом слоев — продольная. N — число молекулярных слоев в пленке.

электрическому полю). Из приведенных примеров видно, как существенно меняются полярные характеристики тонких пленок по сравнению с объемными образцами: появляется электрическая поляризация в пленках неполярных жидких кристаллов ($\text{Sm } C$), возникает продольная поляризация в пленках сегнетоэлектриков ($\text{Sm } C^*$), тонкие пленки антисегнетоэлектриков ($\text{Sm } C_A^*$) имеют поперечную или продольную поляризацию.

Для описания структур и фазовых переходов в пленках $\text{Sm } C$ типа жидких кристаллов может быть использована дискретная феноменологическая модель Ландау фазовых переходов [11–14]. Структура пленки описывается двухкомпонентным (2D) вектором ξ_i , где i — номер слоя в пленке. Свободная энергия смектического жидкого кристалла может быть представлена в виде разложения по степеням структурного ξ и полярного \mathbf{P} параметров порядка. Минимизация энергии по отношению к поляризации дает соотношения между ξ и \mathbf{P} . Таким образом, энергия может быть записана как функция только ξ с перенормированными коэффициентами разложения [12, 13]:

$$F = \sum_i \left[\frac{1}{2} a_0 \xi_i^2 + \frac{1}{4} b_0 \xi_i^4 + \frac{1}{2} a_1 \xi_i \xi_{i+1} + b_1 \xi_i^2 (\xi_{i-1} \xi_i + \xi_i \xi_{i+1}) + f[\xi_i \times \xi_{i+1}]_z \right], \quad (1)$$

где $a_0 = \alpha(T - T^*)$. Первые два члена описывают переход $\text{Sm } A - \text{Sm } C$ в изолированных слоях, третий и четвертый члены — взаимодействия между соседними слоями. Взаимодействие, связанное с хиральностью молекул, описывается последним членом разложения (так называемый член Лифшица). Величина коэффициентов a_0 , b_0 и T^* для поверхностных слоев отличается от объемных, что отражает подавление флуктуаций вблизи поверхности и высокотемпературный сдвиг температуры перехода в пленках. Структуры и фазовые переходы рассчитываются путем численной минимизации свободной энергии по фазе и модулю параметра порядка во всех слоях пленки. Межслоевые взаимодействия стабилизируют синклинную структуру ($\text{Sm } C$, $\text{Sm } C^*$) при отрицательном a_1 и антиклинную структуру ($\text{Sm } C_A^*$) при положительном b_1 . Вклад в энергию межслоевых взаимодействий члена четвертой степени ξ становится доминирующим при низкой температуре, что приводит к фазовому переходу в антиклинную структуру. Свободная энергия в виде (1) позволяет описать структуру и фазовые переходы в пленках различных толщин сегнетоэлектрических и антисегнетоэлектрических жидких кристаллов. Для описания более сложных структур, в которых чередуются синклинная и антиклинная ориентации в соседних слоях, или структур с короткошаговой спиралью $\text{Sm } C_\alpha^*$ необходимо введение в энергию дополнительных членов: фрустрационного межслоевого взаимодействия

$$F_1 = \frac{1}{8} a_2 \sum_i \xi_i \xi_{i+2}$$

и энергетического барьера между синклинной и антиклинной ориентациями молекул

$$F_2 = a_3 \sum_i [\xi_i \times \xi_{i+1}]^2.$$

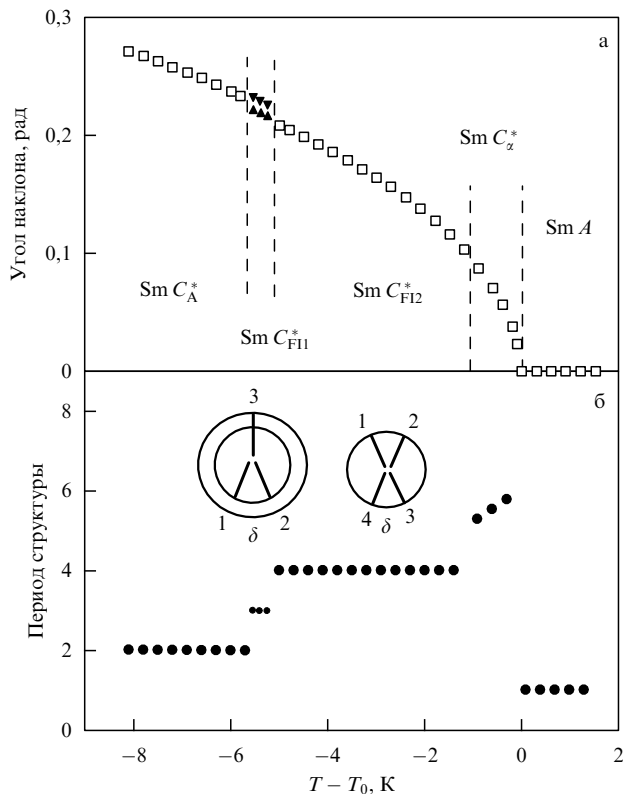


Рис. 3. Угол наклона в радианах (а) и период слоевого упорядочения, выраженный в числе слоев, (б) в зависимости от температуры для фазы $Sm C_A^*$, промежуточных фаз $Sm C_{F11}^*$, $Sm C_{F12}^*$ и структуры $Sm C_z^*$ (короткошаговая спираль с периодом, несоизмеримым со слоевым упорядочением). T_0 — температура перехода в фазу $Sm A$. Азимутальная ориентация молекул в непланарных структурах $Sm C_{F11}^*$ и $Sm C_{F12}^*$ показана в верхней части рис. б. Угол δ разориентации наклона молекул в слоях возникает из-за хиральности. Прямые и перевернутые треугольники на рис. а соответствуют слоям 3 и 1 (2) на рис. б (из работы [14]).

Пример расчета структур с наблюдающейся в эксперименте последовательностью фаз по температуре приведен на рис. 3, взятом из работы [14]. В настоящее время считается, что во всех смектических жидких кристаллах с полярным упорядочением слоев только фаза параметра порядка изменяется от слоя к слою, а модуль параметра порядка во всех слоях объемных образцов одинаков. В тонких пленках большая величина модуля параметра порядка у поверхности, взаимодействие фазы и модуля параметра порядка приводят к образованию сложных структур с изменяющимися от слоя к слою фазой и модулем параметра порядка. Существенным результатом расчетов [13, 14] является предсказание существования смектических фаз, в которых и в объемных образцах модуль параметра порядка не одинаков в различных слоях.

Фазовые переходы второго рода или слабые фазовые переходы первого рода (например, $Sm A - Sm C (Sm C^*)$) и фазовые переходы первого рода по-разному трансформируются в тонких пленках. Температура перехода $Sm A - Sm C^*$ существенно зависит от толщины пленки [15], переход в наклонную структуру ($Sm C^*$) в поверхностном слое индуцирует переход в эту же структуру во всей пленке. При переходе первого рода между двумя структурами с наклонной ориентацией молекул (например, $Sm C^* - Sm C_A^*$ или $Sm C^* - Sm C_{F11}^* - Sm C_A^*$) поверх-

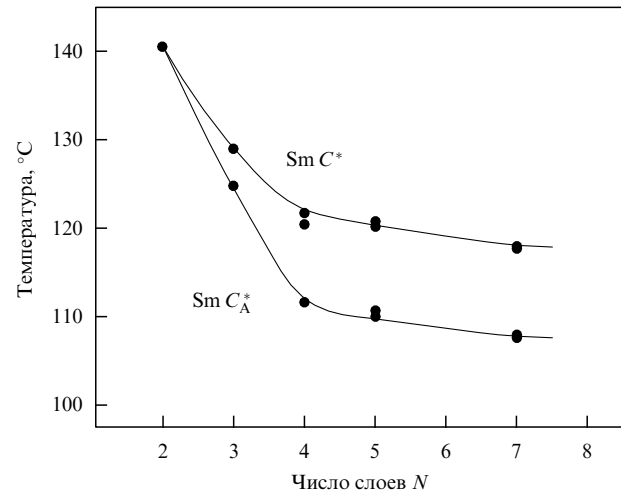


Рис. 4. Переходы в тонких пленках смектического жидкого кристалла с последовательностью фазовых переходов в объемном образце $Sm C_A^* - Sm C_{F11}^* - Sm C^*$ (из работы [17]). N — число молекулярных слоев в пленке. Высокотемпературная ветвь — переходы у поверхности пленки, низкотемпературная — в глубине пленки.

ностный переход происходит путем изменения ориентации молекул в поверхностном слое по отношению к слою, ближайшему к поверхности [16, 17]. Температура перехода в двухслойной пленке сдвинута в высокотемпературную область примерно на 30 К по сравнению с объемным образцом (рис. 4) [17]. Число переходов зависит от толщины пленки. В пленках с числом молекулярных слоев $N > 4$ переходы разделяются на две ветви: высокотемпературную (переходы у поверхности) и низкотемпературную (переходы во внутренних слоях пленки). В промежуточной области температур межслоевое упорядочение внутренних слоев пленки синклинное, у двух поверхностных слоев — антиклинное. Фазовые переходы в пленках из $Sm A$ в структуру с ориентационно упорядоченными связями в плоскости смектических слоев ($Sm B$) или в кристаллическую структуру ($Cr B$), как правило, происходят послойно [18]. При температуре примерно на 10 К выше температуры объемного фазового перехода происходит переход в $Sm B$ (или в $Cr B$) только в одном поверхностном слое. При понижении температуры может наблюдаться серия дискретных переходов в молекулярных слоях, ближайших к поверхности. Подобные структуры являются удобными объектами для изучения двумерной кристаллизации.

3. Взаимодействие и самоорганизация топологических включений в смектических пленках

Жидкие кристаллы являются удобной средой для проведения экспериментальных исследований и теоретического описания взаимодействия и самоупорядочения микрочастиц в анизотропных средах [19–27]. Взаимодействие возникает вследствие того, что частицы упруго деформируют поле молекулярного упорядочения жидкого кристалла. Экспериментально наблюдалось самоупорядочение частиц с образованием линейных цепочек [19, 21, 23–25], кластеров [21, 25], двумерных упорядоченных структур [25–27]. Притяжение частиц на больших расстояниях и отталкивание на малых связано с образованием в жидкокристаллической среде или на поверхности частиц топологических дефектов. В зависи-

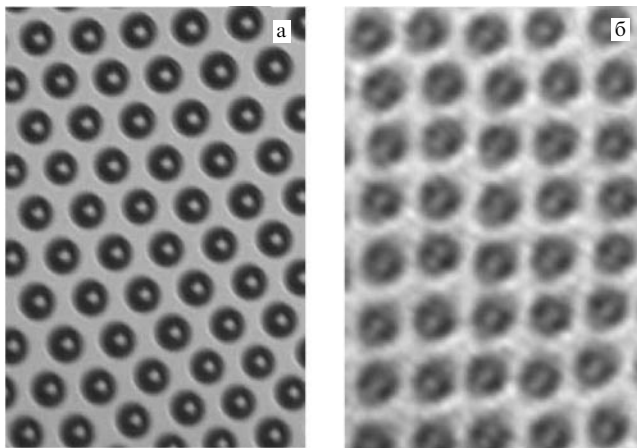


Рис. 5. Двумерные структуры — гексагональная (а) и квадратная (б) — из капель нематика в смектической пленке (из работы [27]). Горизонтальный размер фотографий 115 мкм (а) и 40 мкм (б).

мости от граничных условий на поверхности частиц и размера частиц межчастичное взаимодействие может быть диполь-дипольным, квадруполь-квадрупольным или более сложным, в том числе связанным с деформацией смектических слоев. На рисунке 5 в качестве примера приведена фотография смектических пленок с частицами, которые трансляционно упорядочились в двумерную гексагональную и квадратную решетку [27].

В смектических *S*-типах жидких кристаллов проекции длинных осей молекул на плоскость пленки (так называемый *c*-директор) образуют 2D поле молекулярного упорядочения [1]. Жесткая ориентация молекул на поверхности частиц приводит к деформации поля *c*-директора в пленке. Наиболее проста для рассмотрения ситуация, когда *c*-директор ориентируется радиально (перпендикулярно поверхности частиц) или планарно (параллельно поверхности частиц). Такая ориентация для твердых частиц может быть получена нанесением на поверхность частиц тонкого слоя ориентанта. Частицы другой фазы (жидкости, нематика, холестерика), как правило, сами ориентируют *c*-директор радиально или планарно. Поле молекулярного упорядочения пленки, содержащей частицу с радиальными или планарными граничными условиями аналогично полю, создаваемому точечным топологическим дефектом с топологическим зарядом $S = +1$. Необходимость сохранения топологического заряда в системе накладывает ограничения на деформацию поля молекулярного упорядочения в пленке. Если частица помещена в пленку или она родилась в пленке (например, капля жидкости при нагреве пленки), рядом с частицей или на ее поверхности должен образоваться топологический дефект или дефекты с суммарным топологическим зарядом $S = -1$ [22]. Частица и связанный с ней топологический дефект (дефекты) образуют топологический диполь (квадруполь).

На рисунке 6 приведена фотография частиц в пленке *SmC* жидкого кристалла с планарной ориентацией *c*-директора на границе частиц. У частицы а один точечный топологический дефект с силой $S = -1$ находится с левой стороны на границе частицы и пленки. У частицы б два точечных топологических дефекта с силой $S = -1/2$ находятся на границе частицы (сверху и снизу).

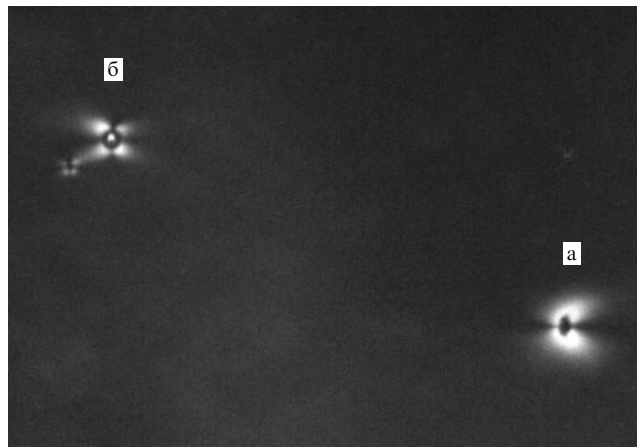


Рис. 6. Включения в смектической пленке из капель нематика с одним точечным топологическим дефектом ($S = -1$) (а) и двумя топологическими дефектами ($S = -1/2$) (б) на поверхности включений. Горизонтальный размер фотографии 680 мкм. Ориентация *c*-директора вдали от включений однородная (вертикальное направление). На границе капель *c*-директор ориентирован параллельно границе.

Суммарный топологический заряд каждой частицы нулевой. Частица а является топологическим диполем, частица б — топологическим квадруполем. Для описания конфигурации поля молекулярного упорядочения вблизи частиц и межчастичных взаимодействий может быть использована электромагнитная аналогия [22]. Ориентация *c*-директора в пленке, описываемая решением уравнения Лапласа $\Delta\varphi = 0$, может быть представлена в виде суммы деформаций φ_i , создаваемых реальными (физическими) и виртуальными топологическими дефектами. Притяжение между частицами дипольного типа (а) приводит к образованию линейных цепочек из частиц с дипольным моментом, параллельным цепочке [23, 24]. Более сложные структуры образуются из частиц (б) с квадруполь-квадрупольным взаимодействием. Частицы располагаются друг относительно друга таким образом, чтобы минимизировать упругую энергию деформации поля *c*-директора. Для частиц с квадрупольной симметрией четыре направления (светлые области на рис. 6б) отвечают минимуму энергии. Экспериментально наблюдалось образование разветвленных цепочек, кластеров, трансляционно упорядоченных структур [25, 26]. Ближайшая задача — использование самоорганизации для получения различного типа структур из микро- и наночастиц, их перестройка с использованием внешних электрических и магнитных полей или светового воздействия.

Проводимые в настоящее время исследования тонких смектических пленок охватывают широкий спектр вопросов, относящихся к различным разделам физики конденсированного состояния (физика тонких пленок, поверхности, низкоразмерных 2D и 1D систем и т.д.). Более того, многие исследования в настоящее время удастся провести только на смектических пленках, поскольку сверхтонкие неорганические пленки аналогичного качества получить не удастся. Что касается непосредственно жидких кристаллов, исследования тонких пленок стали важной составной частью изучения новых жидкокристаллических материалов. Более того, структуру многих из них удалось определить только при исследовании тонких свободно подвешенных пленок.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 05-02-16675) и ОФН РАН.

Список литературы

1. De Gennes P G, Prost J *The Physics of Liquid Crystals* 2nd ed. (New York: Oxford Univ. Press, 1993)
2. Stoebe T, Mach P, Huang C C *Phys. Rev. Lett.* **73** 1384 (1994)
3. Demikhov E I, Dolganov V K, Meletov K P *Phys. Rev. E* **52** R1285 (1995)
4. Pankratz S et al. *Phys. Rev. E* **60** R2456 (1999)
5. Cluzeau P et al. *Phys. Rev. E* **62** R5899 (2000)
6. Meyer R B et al. *J. Phys. Lett. (France)* **36** L69 (1975)
7. Andreeva P O et al. *Phys. Rev. E* **59** 4143 (1999)
8. Link D R, Maclennan J E, Clark N A *Phys. Rev. Lett.* **77** 2237 (1996)
9. Dolganov P V, Bolotin B M, Fukuda A *Phys. Rev. E* **70** 041708 (2004)
10. Dolganov P V, Suzuki Y, Fukuda A *Phys. Rev. E* **65** 031702 (2002)
11. Čepič M, Žekš B *Mol. Cryst. Liq. Cryst. Sci. Technol. A* **268** 61 (1995)
12. Rovsek B, Čepič M, Žekš B *Phys. Rev. E* **62** 3758 (2000)
13. Dolganov P V et al. *Письма в ЖЭТФ* **76** 579 (2002)
14. Dolganov P V et al. *Phys. Rev. E* **67** 041716 (2003)
15. Heinekamp S et al. *Phys. Rev. Lett.* **52** 1017 (1984)
16. Chao C Y et al. *Phys. Rev. Lett.* **86** 4048 (2001)
17. Dolganov P V et al. *Письма в ЖЭТФ* **80** 311 (2004)
18. Stoebe T, Huang C C *Int. J. Mod. Phys. B* **9** 2285 (1995)
19. Poulin P et al. *Science* **275** 1770 (1997)
20. Lubensky T C et al. *Phys. Rev. E* **57** 610 (1998)
21. Poulin P, Weitz D A *Phys. Rev. E* **57** 626 (1998)
22. Pettey D, Lubensky T C, Link D R *Liq. Cryst.* **25** 579 (1998)
23. Cluzeau P et al. *Phys. Rev. E* **63** 031702 (2001)
24. Cluzeau P et al. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* **364** 381 (2001)
25. Cluzeau P et al. *Письма в ЖЭТФ* **75** 573 (2002)
26. Cluzeau P et al. *Письма в ЖЭТФ* **76** 411 (2002)
27. Dolganov P V et al. *Eur. Phys. J. E* **12** 593 (2003)

PACS numbers: 42.70.Df, 42.70.Qs, 42.79.Kr, **61.30.** – v

Электрооптика и фотоника жидких кристаллов

С.П. Палто

1. Введение

В докладе кратко рассматриваются некоторые перспективные направления исследований в области электрооптики и фотоники нематических жидких кристаллов. В частности, обсуждаются эффекты бистабильного переключения и лазерной генерации в хиральных нематиках.

Физика жидких кристаллов (ЖК) относится к области знаний, которая, претерпев стремительное развитие на протяжении полувека, привела к широкому применению жидких кристаллов в различных электрооптических устройствах и высокотехнологичных продуктах, таких как информационные дисплеи и плоские телевизионные экраны. Следует заметить, что прогресс в науке о жидких кристаллах обусловлен достижениями в различных областях. Развитие математических моделей жидкокристаллического состояния (в первую очередь это теория упругости Франка–Озеена [1, 2] и теория гидродинамики Лесли для нематической фазы [3]), описание структуры и свойств различных жидкокристаллических фаз на основе симметричных представлений [4], синтез огромного количества новых химических соединений (фирмы Merck в Германии, Roche в Швейцарии, ВДН в Англии, НИОПиК в России и др.), существующих в жидкокристаллическом состоянии, стали для экспериментальной

физики той основой, которая позволила обнаружить и понять множество новых физических эффектов.

В данной работе не ставится задача обзора всех значимых результатов в области оптики и электрооптики ЖК (заинтересованному читателю можно порекомендовать монографии [5, 6]). В этой статье мы ограничимся обсуждением отдельных направлений в электрооптике и фотонике нематических жидких кристаллов. Это лишь небольшая часть всего спектра проводимых исследований, но, на мой взгляд, эти направления динамично развиваются в последнее время, привлекая к себе все большее внимание. Здесь кратко обсуждаются достижения различных исследовательских групп. В первую очередь, мне хотелось продемонстрировать некоторые результаты коллектива лаборатории жидких кристаллов Института кристаллографии РАН, к которому я принадлежу. Так, недавно нами были обнаружены и исследованы различные моды бистабильного переключения в двухчастотных нематических жидких кристаллах [7]. Это очень красивый электрооптический эффект. Мультистабильные или бистабильные состояния, которые можно переключать, используя короткие импульсы электрического поля, интересны не только с физической, но и с прикладной точки зрения для создания новых типов дисплеев, обладающих, например, свойствами "электронной бумаги" [8]. Привлекательность таких устройств заключается в значительном снижении потребляемой энергии, которая расходуется лишь в процессе переключения между различными состояниями и не требуется для поддержания определенного состояния. Кроме того, пороговый характер переключения снимает ограничения на количество адресуемых элементов в случае матричных дисплеев без активных элементов (тонкопленочных транзисторов).

К сожалению, из-за ограниченного объема этой статьи, пришлось опустить отдельные результаты, относящиеся к фотоориентированным пространственно-периодическим структурам ЖК [9]. Дифракция света на таких пространственно-периодических структурах оказывается чувствительной к поляризации состоянию света и может управляться внешним электрическим полем. Подобные структуры перспективны для создания поляризационных приборов, а также для исследований новых лазерных эффектов в ЖК.

Обсуждаемые эффекты иллюстрируются результатами численного моделирования. Эти результаты получены мною с использованием специально созданного программного обеспечения. Достоверность результатов такого моделирования подтверждена как в нашей лаборатории, так и другими зарубежными коллективами. Например, рассматриваемый здесь эффект бистабильного двухчастотного переключения сначала был рассчитан (предсказан). Последующее его наблюдение и экспериментальные исследования в деталях подтвердили результаты моделирования.

Здесь рассматриваются исключительно нематические ЖК. Оптика и электрооптика сегнетоэлектрических жидких кристаллов не обсуждается, хотя в данной области также имеются значимые достижения [10–12].

2. Некоторые основные определения и свойства нематических ЖК

Для облегчения понимания обсуждаемых проблем специалистами, работающими вне области ЖК, здесь