

УДК 532.783

А. М. Паршин, В. А. Гуняков, В. Я. Зырянов, В. Ф. Шабанов

**ОРИЕНТАЦИОННЫЕ ПЕРЕХОДЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
ИЛИ МАГНИТНОМ ПОЛЕ В ДВУХСЛОЙНЫХ СТРУКТУРАХ НЕМАТИКА,
ИНДУЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЬЮ ПОЛИМЕРА**

**ORIENTATIONAL TRANSITIONS IN ELECTRIC OR MAGNETIC FIELD IN
TWO-LAYER NEMATIC STRUCTURES INDUCED BY POLYMER SURFACE**

Институт физики им. Л. В. Киренского КИЦ СО РАН,
660036 Красноярск, Академгородок, 50. E-mail: parshin@iph.krasn.ru

Экспериментально исследованы двухслойные структуры нематического жидкого кристалла в ячейках с ограничивающими поверхностями поликарбоната при ориентационных переходах из планарно- и гомеотропно-доменных конфигураций в однородное гомеотропное состояние. Переориентация директора осуществлялась с помощью электрического или магнитного полей. Упорядочение жидкого кристалла в двухслойной структуре описано с использованием эффективного параметра порядка. Проведено сопоставление с моделью, следующей из теории упругости жидких кристаллов.

Ключевые слова: нематик, поликарбонат, двухслойная структура, электрическое поле, магнитное поле, домен.

Two-layer structures of a nematic liquid crystal were experimentally studied in cells with interfacial polycarbonate surfaces under orientational transitions from planar- and homeotropic-domain configurations to the homogeneous homeotropic state. Director reorientation was initiated by electric or magnetic fields. The effective order parameter was used to describe the liquid crystal alignment in two-layer structure. Comparison with a model based on the elasticity theory of liquid crystals was carried out.

Key words: nematic, polycarbonate, two-layer structure, electric field, magnetic field, domain.

Введение

Благодаря наличию дальнедействующих межмолекулярных сил, ориентация молекул в объеме жидкокристаллических (ЖК) ячеек находится в соответствии с ориентацией на ограничивающих поверхностях [1]. В простейшем случае связь между поверхностными и объемными слоями ЖК описывается упругими взаимодействиями [2]. Ось легкого ориентирования на твердой поверхности проявляется в результате прямого взаимодействия между анизотропной поверхностью и ЖК-молекулами. Зачастую ситуация оказывается сложнее. Как только ЖК вступает в контакт с твердым телом, на границе возникает поверхностный слой, энергия которого выше энергии объемного слоя [3]. В свою очередь этот поверхностный слой разделяется на два: образуется локализованный упорядоченный слой, жестко сцепленный с поверхностью, и переходный слой между ним и объемным слоем. При этом ориентация локализованного слоя определяет ориентацию в объеме ЖК [3]. Поверхностный слой имеет более высокий параметр порядка, чем в объеме. Избыточный параметр порядка в поверхностном слое был обнаружен при исследовании нематика 5ЦБ между слюдяными пластинками [4]. Со-

гласно экспериментальным данным, в пределах корреляционной длины происходит модификация параметра порядка, при которой локальная вариация упорядочения молекул в нематической фазе продолжает существовать, пока она не достигнет объемного значения. При этом корреляционная длина не связана с изменением ориентации локального директора нематика. То есть ориентация от локализованного у поверхности слоя ЖК передается независимо от вариации параметра порядка в переходном слое. Исследование нематика МББА, ориентированного на профилированных и гладких очищенных стеклянных поверхностях в присутствии магнитного поля, также показало несоответствие его поведения модели, следующей из теории упругости. [5]. Было показано, что при повороте одной из подложек ячейки и при приложении к ней магнитного поля локализованный слой практически не изменяется. По интерпретации авторов, упорядочение нематика обусловлено адсорбцией его молекул, вызванной анизотропным взаимодействием между электрическими диполями, возникшими в результате поляризуемости ЖК, и поверхностными диполями подложки. Позднее интерпретация была расширена: слой адсорбированных молекул был рассмотрен как мобильная система, в которой обмен молекулами между объемом и поверхностью происходит посредством процессов адсорбции и десорбции молекул ЖК [6]. Тем не менее, несмотря на сложные физико-химические процессы, происходящие внутри слоя адсорбированных молекул, ориентация директора в объеме ячейки следует адиабатически за граничными условиями. В связи с этим деформированную пленку ЖК в ячейке можно описывать с помощью модифицированной модели, основанной на теории упругости, с введением межфазной граничной энергии, и выражение для свободной энергии с граничными условиями адекватно описывает упорядочение.

Особый интерес представляют пленки ЖК на полимерных поверхностях. Так, адсорбированные молекулы нематика на пленке поливинилового спирта взаимодействуют с полимером, создавая ось легкого ориентирования [7]. Суперпозиция молекулярных взаимодействий определяет сцепление с легкой осью, параллельной средней ориентации адсорбированных молекул. То есть адсорбированные нематические молекулы приспособляются к цепям полимера, а директор объемного слоя ЖК устанавливается параллельно директору локализованного у поверхности слоя. В дальнейшем идет непрерывный процесс адсорбции и десорбции в переходном слое, который вызывает изменение силы сцепления и положения легкой оси. Ориентация директора ЖК в ячейке определяется балансом между упругим моментом объема и моментом, вызванным сцеплением с поверхностью. Тем не менее поведение нематиков 5СБ и МББА в ячейках с поверхностями поликарбоната (ПК) [8, 9] не может быть рассмотрено в рамках описанного процесса. В ячейках ЖК/ПК в локализованном у поверхности слое возникают появляющиеся в процессе роста домены с радиальным распределением директора. Объемный слой ЖК может иметь однородную планарную ориентацию, в то время как локализованный у поверхности доменный слой имеет неоднородное распределение поля директора. Кроме того, температурный переход, обнаруженный в ЖК/ПК структуре [8], показал необходимость рассмотрения при анализе ориентационных структур в нематиках, граничащих с полимерными поверхностями, дальнедействующих дисперсионных сил подложки, способных привести к локальному переходу Фредерикса в ЖК-пленках [10].

В данной работе проводятся электро- и магнитооптические исследования ориентационных переходов нематиков в ячейках с доменами на поверхности ПК. Рассматривается влияние дальнедействующих дисперсионных сил на структуру нематика.

Эксперимент

Для электро- и магнитооптических исследований формировались ЖК-ячейки трех типов. Для всех типов ячеек нижняя подложка представляла собой стеклянную пластинку, покрытую токопроводящим слоем ИТО, на которую в центрифуге наносился двухпроцентный раствор ПК в дихлорметане. На образовавшуюся в течение нескольких десятков секунд полимерную пленку укладывались две тефлоновые прокладки, на которые помещалась верхняя стеклянная пластинка с ИТО покрытием. Ячейка первого типа имела зазор $\delta = 30$ мкм и ее верхняя пластинка подвергалась химической очистке. В ячейке второго типа с зазором $\delta = 6$ мкм верхняя пластинка покрывалась однопроцентным раствором лецитина для получения гомеотропного упорядочения. Ячейка третьего типа с толщиной зазора $\delta = 30$ мкм имела симметричные подложки, покрытые пленкой ПК. В качестве исследуемого материала был выбран нематический ЖК 4-*n*-пентил-4'-цианобифенил (5ЦБ) с положительной диэлектрической анизотропией. Заполнение ячеек ЖК проводилось с торца через капиллярный промежуток между нижней и верхней подложками. ЖК вводился в нематической фазе. В течение нескольких минут на поверхности ПК в ячейках в процессе роста возникала сетка доменов с радиальным распределением поля директора ЖК [8]. Наблюдения в поляризационный микроскоп показали, что в ячейках первого типа имеются участки с однородной планарной ориентацией. Планарно-ориентированный слой в объеме ячейки, накладываясь на приповерхностный доменный слой, формирует «полигональную нематическую» текстуру [8]. Выбрав на верхней пластинке область с однородной планарной ориентацией, которая совпадает с планарной ориентацией в объемном слое, можно получить участок образца с планарно-доменной структурой ЖК. Данную структуру можно исследовать, если на пути зондирующего луча установить диафрагму, диаметр которой не превышал размер выбранного участка. В ячейках второго типа с толщиной зазора $\delta = 6$ мкм гомеотропная ориентация от верхних пластинок передавалась через объемный слой ЖК, визуализируя текстуру с радиальными доменами вблизи поверхности нижней подложки [8]. В данных образцах исследовалась гомеотропно-доменная структура.

В ячейках третьего типа для установления планарной ориентации нематика использовался эффект памяти, обнаруженный в ЖК на пленках ПК [11]. В магнитном поле H^* , прикладываемом к сэндвичу параллельно подложке с пленкой ПК в течение роста доменов, в объемном слое нематика наблюдалось возникновение однородной планарной ориентации, которая сохранялась после выключения поля (рис. 1). Ориентация оставалась устойчивой после дальнейшего воздействия на ячейку внешних электрических или магнитных полей. Текстура была четко выраженной, если направление ориентирующего поля H^* совпадало с одним из поляризаторов микроскопа (рис. 1, *а*) и просветлялась при повороте ячейки на угол 45° (рис. 1, *б*). Данное обстоятельство свидетельствует о возникновении однородно ориентированного слоя в объеме ячейки с директором, направленным вдоль поля H^* . Тот же эффект возникал в ЖК-ячейках с симметричными пластинками, покрытыми ПК. Полученные образцы использовались для магнито- и электрооптических исследований.

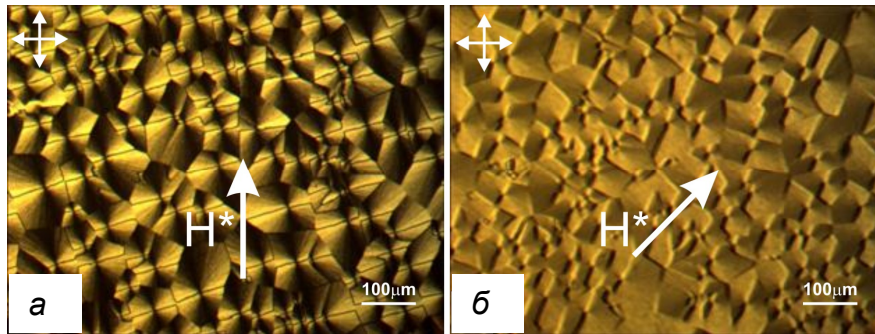


Рис. 1. Микрофотографии структуры 5ЦБ на подложке ПК, параллельно которой в процессе роста доменов прикладывалось магнитное поле H^* :
 а – направление H^* совпадает с одним из поляризаторов микроскопа (оси поляризаторов показаны стрелками); б – направление H^* составляет с осью поляризатора угол 45°

Таким образом, в эксперименте использовались три типа образцов. *Образец А*: поверхность ПК с доменами – слой 5ЦБ – очищенная стеклянная поверхность, $\delta = 30$ мкм. *Образец Б*: поверхность ПК с доменами – слой 5ЦБ – гомеотропно-ориентирующая стеклянная поверхность, $\delta = 6$ мкм. *Образец В*: поверхность ПК с доменами – слой 5ЦБ, ориентированный в магнитном поле H^* – поверхность ПК с доменами.

Излучение от гелий-неонового лазера (L) с длиной волны $\lambda = 633$ нм, отражаясь от зеркала (M), проходило через образец, диафрагмы (D) и попадало на фотодиод (PD). При необходимости на пути луча устанавливались поляризаторы под углом 45° к директору нематика. Для электрооптических исследований к ИТО-электродам прикладывалось напряжение U с частотой 1 кГц от генератора, а для магнитооптических исследований образцы помещались между полюсами электромагнита. Исследования выполнялись при температуре $T = 24$ °С. Схемы эксперимента представлены на рисунках ниже.

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены микрофотографии *образца А* при различных значениях приложенного к ЖК напряжения U . При сканировании напряжения в диапазоне $U \leq 1,2$ В никаких изменений в ячейке не возникало и наблюдалась только «полигональная нематическая» текстура золотисто-желтого цвета (рис. 2, а). При $U = 1,2$ В начиналось интенсивное изменение окраски текстуры при разнообразном смешивании цветов с ростом напряжения (рис. 2, с, д). При этом радиальные домены становятся четко выраженными (рис. 2, з). При некоторых значениях U визуализированные радиальные домены однородно окрашивались (рис. 2, е – з). В достаточно высоких электрических полях сетка радиальных доменов становилась зеленой и без изменения окраски постепенно начинала темнеть (рис. 2, и, к). При $U > 30$ В в ячейке устанавливалась картина оптически темного поля.

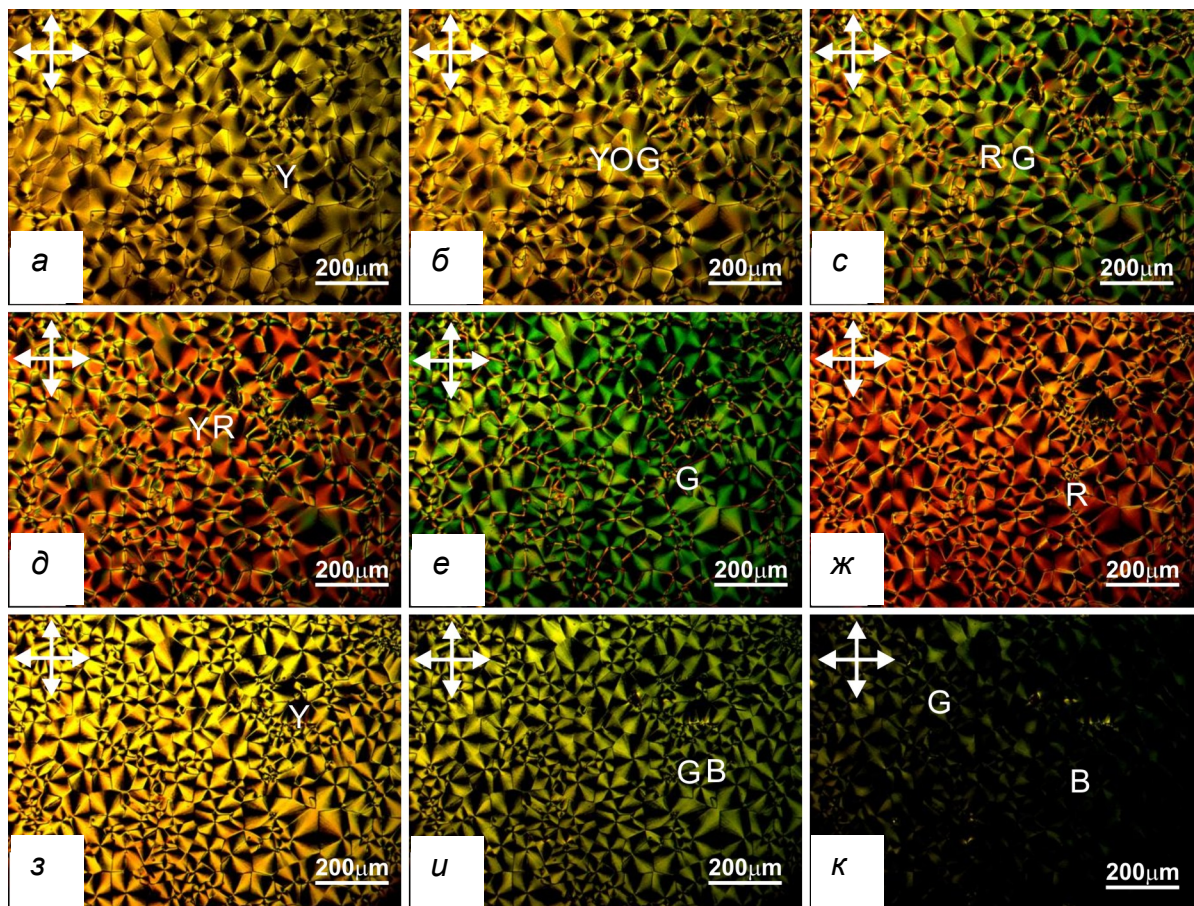


Рис. 2. Микрофотографии образца *A* в скрещенных поляризаторах при различных значениях приложенного напряжения U :

$a - 1,1 B$; $б - 1,2 B$; $c - 2 B$; $д - 2,5 B$; $e - 3,5 B$; $ж - 5 B$; $з - 8,5 B$;
 $и - 16 B$; $к - 30 B$. Изменение цвета текстуры в электрическом поле обозначено буквами:
 Y – желтый; O – оранжевый; G – зеленый; R – красный; B – черный. Направление поляризации света показано стрелками

На рисунке 3 представлено изменение интенсивности света, прошедшего через образец *A*, происходящее в процессе роста доменов. Зависимость $I(t)$ практически линейна в диапазоне $t \leq 2$ мин и быстро переходит в насыщение при $t_2 \approx 3$ мин. Оптическое пропускание ячейки при этом изменяется в 1,5 раза.

Для анализа вкладов в оптическое пропускание ячейки объемных и поверхностных слоев на рис. 4 приведена зависимость интенсивности лазерного излучения I , прошедшего через образец *A*, от напряжения U . Зависимость имеет пороговое значение U_{th} , осцилляции и монотонно затухающую область изменений при больших напряжениях. Аналогичная зависимость получается также в случае использования образцов *B* (рис. 5). На рисунке 6 представлены зависимости интенсивности света I , прошедшего через образец *B*, от магнитного поля H и напряжения U . Кривые $I(H)$ и $I(U)$ практически совпадают при соответствующем выборе масштабов.

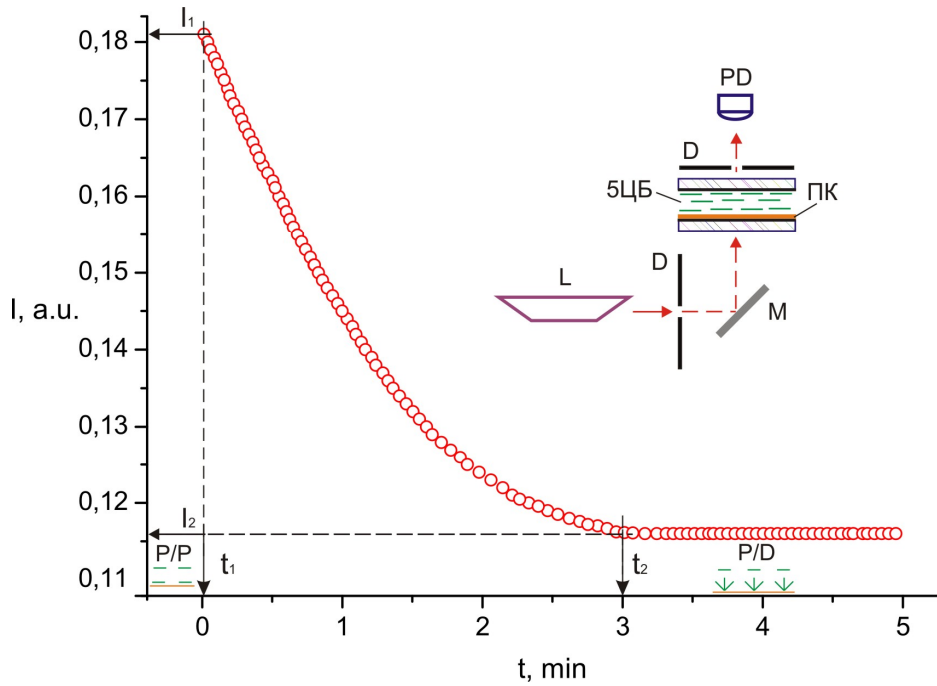


Рис. 3. Зависимость интенсивности света I , прошедшего через образец А, от времени роста доменов t

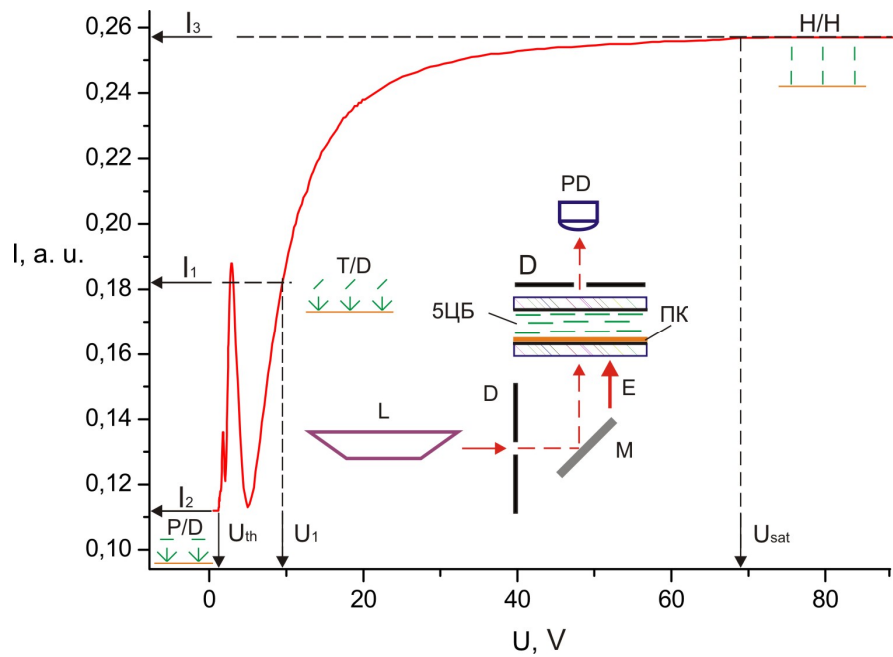


Рис. 4. Зависимость интенсивности света I , прошедшего через образец В, от напряжения U

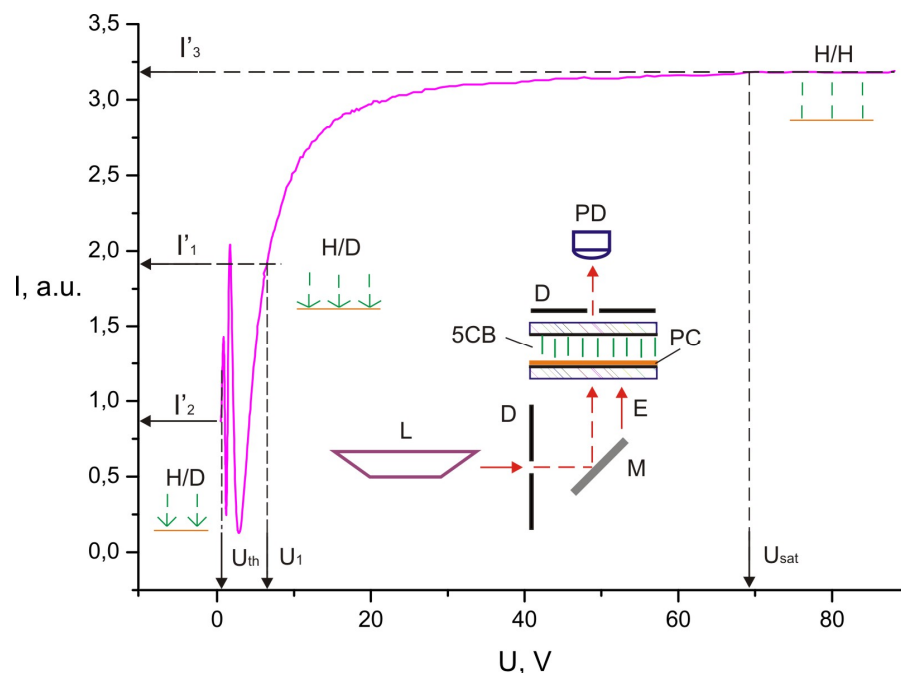


Рис. 5. Зависимость интенсивности света I , прошедшего через образец B , от напряжения U

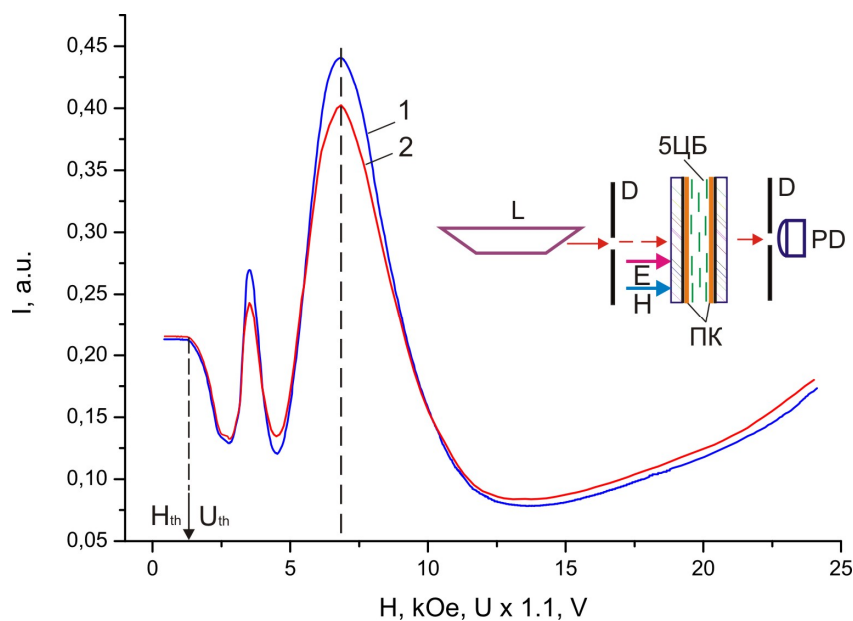


Рис. 6. Зависимости интенсивности света I , прошедшего через образец B , от магнитного поля H (кривая 1) и от напряжения U (кривая 2)

Пороговый характер зависимостей интенсивности света, прошедшего через исследуемые образцы, от приложенного внешнего поля (рис. 4—6) и отсутствие изменений в текстурах, свидетельствующих о структурных превращениях внутри доменов (рис. 2) вплоть до напряжений насыщения, дают основания полагать, что ориентацион-

ный переход происходит в объеме ячейки независимо от структуры доменного слоя ЖК. Таким образом, эксперимент показывает существование двухслойной структуры нематика в ячейках с доменами на поверхности со слабой корреляцией ориентаций директора в объемном и локализованном у поверхности слое. Это позволяет ввести обозначения для упорядочения объем/доменный слой (V/S). Наблюдаемые на рисунках 4—6 осцилляции интенсивности зондирующего излучения не могут быть связаны с фазовой модуляцией света в ЖК [12], поскольку в схемах электро- и магнитооптических измерений не использовались поляризаторы. По-видимому, данные осцилляции обусловлены интерференционными эффектами при прохождении излучения через светорассеивающий переходный слой [13].

Выявлено, что данные микроскопических наблюдений (рис. 2) и электрооптических измерений не соответствуют результатам, полученным при использовании классической методики определения порогового поля Фредерикса [14]. Вероятно, большая величина диэлектрической анизотропии 5ЦБ в двухслойных образцах с переходным деформированным нематическим слоем приводит к несоответствию напряжения U , приложенного к ячейке, напряжению, падающему на объемном слое ЖК. В данной ситуации необходимо учитывать добавочный вклад, обусловленный емкостью поверхностного слоя, который может проявиться в присутствии сильного электрического поля E [15], и анизотропией электропроводности [1]. Поскольку учесть данные вклады представляется сложной задачей, были проведены дополнительные исследования в магнитном поле, которые не требуют учета поправок на неоднородность поля. В связи с этим на рис. 6 установлено соответствие между полями E и H . Из рисунка 6 следует, что кривые $I(U)$ и $I(H)$ практически совпадают при нормировочной постоянной, равной 1,1. Поэтому ориентирующее действие электрического и магнитного поля можно считать эквивалентным и в дальнейшем вместо поля E использовать приведенное поле H . Экспериментальное пороговое магнитное поле при этом будет $H_{th} = 1,1$ кЭ. Для константы поперечного изгиба $K_{11} = 6,4 \cdot 10^{-7}$ дин и $\Delta\chi = 1,18 \cdot 10^{-7}$ [16] расчетное значение $H_{th}' = \pi/d (K_{11}/\Delta\chi)^{1/2} = 2,4$ кЭ. Существенное различие значений H_{th}' и H_{th} свидетельствует о том, что сцепление нематика с поверхностью ПК мало, если для оценки использовать стандартную методику определения полярной энергии сцепления W_θ [14].

Для оценки размеров поверхностного слоя определим длину магнитной когерентности ξ [17], которая должна показать, на какое расстояние от поверхности простирается деформация, обусловленная поверхностными силами. Величина ξ представляет собой некоторое взвешенное среднее из длин когерентностей $\xi_1 = 1/H_\xi (K_{11}/\Delta\chi)^{1/2}$ и $\xi_2 = 1/H_\xi (K_{33}/\Delta\chi)^{1/2}$ [17]. Используя значение константы продольного изгиба $K_{33} = 8,6 \cdot 10^{-7}$ дин [16] и значение магнитного поля $H_\xi = 5$ кЭ, соответствующее напряжению $U = 4,5$ В на рис. 4, получим усредненное значение параметра $\xi \approx 0,5$ мкм, сопоставимое со значением длины световой волны $\lambda = 0,633$ мкм. Осцилляции исчезают, как только толщина приповерхностного слоя с искаженным полем директора ЖК становится сравнимой с длиной волны зондирующего излучения. С другой стороны, азимутальная ориентация в объеме ЖК была устойчивой даже в случае использования толстых образцов A , в которых объемный слой не «чувствовал» ориентации, заданной на верхней пластинке, и сохранялась после полевых воздействий. К тому же, как показано на рис. 1, ориентация в объемном слое возникала в образцах, сформированных в поле во время роста доменов, и наблюдалась даже в образцах B , в которых объемный слой был ограничен двумя доменными поверхностями ПК, и также оставалась устойчивой. В данной ситуации доминирующее влияние на объемный слой ЖК оказывают дальнедействующие дисперсионные силы [10], простирающиеся выше толщины до-

менного слоя, радиус действия которых $l \leq 0,05$ мкм [18]. Следовательно, доменный слой можно рассматривать как локализованный у поверхности слой, а влияние ориентирующего магнитного поля H^* на объемный нематический слой обнаруживает существование в системе ЖК – полимер анизотропии дальнедействующих дисперсионных сил.

Изменение интенсивности I на рис. 3 в ячейке с планарным слоем ЖК при росте доменов на одной из поверхностей от I_1 до I_2 обусловлено исключительно доменным слоем, поскольку эксперимент выполнен в отсутствие поляризаторов, и представляет собой переход от однородной планарной ориентации P/P к планарно-доменному упорядочению P/D . В этом состоянии P/D к образцу прикладывалось напряжение U (рис. 4), которое оставалось неизменным до достижения порогового значения напряжения U_{th} , о чем свидетельствует отсутствие изменения интенсивности I_2 на данном участке. В дальнейшем, при $U > U_{th}$, после прохождения участка, где зависимость носит осциллирующий характер, интенсивность I монотонно достигала значения I_3 , соответствующего напряжению насыщения U_{sat} и однородному гомеотропному упорядочению ЖК в ячейке Н/Н. При этом интересно отметить, что интенсивность, характеризующая наклонно-доменное упорядочение T/D , проходит при напряжении U_1 значение I_1 , соответствующее начальному состоянию P/P , которое было в образце в отсутствие доменов. То есть, наличие доменного слоя существенно увеличивает диапазон изменения интенсивности света, прошедшего через ячейку с планарно-ориентированным слоем нематика. Аналогичные характер и амплитуда изменения $I(U)$ наблюдались и в случае использования образцов Б (рис. 5). Однако при этом напряжение U прикладывалось к ячейке ЖК в конфигурации H/D , которая сохранялась вплоть до U_{sat} , но при ее сохранении уменьшалась толщина переходного слоя. Данное обстоятельство позволяет заключить, что изменение интенсивности света, пропущенного через ЖК-ячейку, содержащую локализованный у поверхности слой с радиальными доменами, от приложенного внешнего поля, происходит за счет изменения рассеяния лучей в переходном слое.

Полученные результаты дают возможность использовать следующие модельные представления. На поверхности ПК имеется локализованный слой ЖК с плотноупакованными доменами с радиальной конфигурацией поля директора $n(r)$. В пределах домена, а также в сетке доменов, нельзя выделить преимущественную ориентацию молекул нематика N_d . При этом параметр порядка $S_d = \langle 1/2(3(N_d \cdot n(r))^2 - 1) \rangle_d = 0$, который можно ввести для доменов, как это сделано в случае неоднородного поликристаллического слоя ЖК [1] или диспергированных в полимерную матрицу ЖК [19]. Параметр порядка нематических молекул в образце можно представить как $S^* = S \cdot S_d$, где S – микроскопический параметр порядка ЖК. В объемном слое $S_d = 1$, как в однородно ориентированном домене [20], и $S^* = S$. Между монослоем и объемным слоем должен существовать переходный слой с промежуточным значением $0 < S_d < 1$ (рис. 7). То есть в двухслойной структуре параметр порядка S^* , а не модифицированный параметр порядка S , как в случае структур с адсорбированными на поверхность молекулами [5—7], может характеризовать P/D и H/D упорядочение.

Суперпозиция молекулярных взаимодействий ЖК с ПК в пределах домена определяет сцепление с локальными осями легкого ориентирования, исходящих из общей точки. При этом азимутальная поверхностная энергия, которая в классической модели [2] записывается при наличии на поверхности преимущественного направления ориентации молекул h , $f_\phi = -1/2 \cdot W_\phi \cdot (n \cdot h)^2 \approx 0$, поскольку ориентация директора нематика в локализованном у поверхности слое вырожденная. Азимутальная энергия сцепления $W_\phi = 0$, так как на поверхности нет ни одного энергетически преимущественного направления.

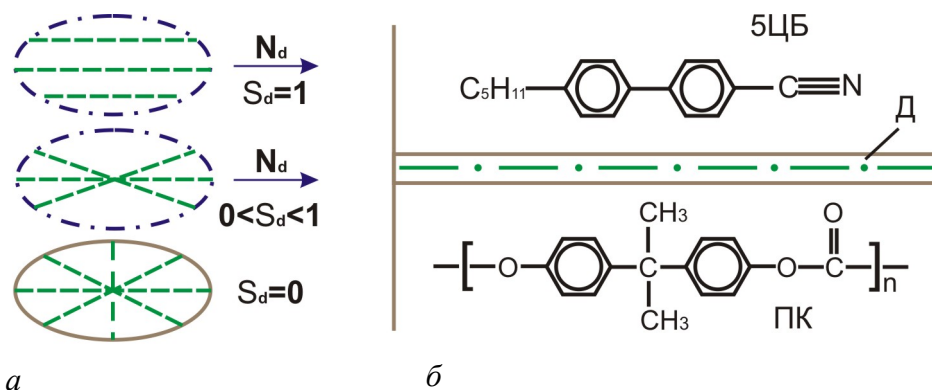


Рис. 7. Схематичное представление упорядочения ЖК:

a – в виде сечений, параллельных плоскости подложки: нижнее – домена; среднее – переходного слоя; верхнее – объемного слоя; пунктирные линии показывают распределение поля директора нематика, N_d – директор домена, S_d – параметр порядка домена; *б* – в виде возможного параллельного расположения жесткого фрагмента с двумя бензольными кольцами относительно подобного фрагмента макромолекулы ПК вследствие проникновения дальнедействующих дисперсионных сил через локализованный у поверхности доменный слой Д

Поэтому при повороте директора ЖК в объемном слое в плоскости, параллельной подложке, директор на поверхности может легко следовать за ним, а изменение азимутального угла его ориентации не связано со «скольжением» молекул нематика, как это предполагается в модели, основанной на теории упругости [2]. Однако анизотропия дальнедействующих дисперсионных сил, возникающая при ориентирующем воздействии верхней границы в ЖК-ячейке или магнитного поля H^* во время формирования структуры ЖК на поверхности ПК, снимает ориентационное вырождение и фиксирует преимущественное направление ЖК-молекул. К аналогичному результату приводит рассмотрение полярной поверхностной энергии, которая, если ее записать в классической форме [14] $f_0 = -1/2 \cdot W_0 \cdot (n \cdot h)^2 \approx 0$, так как полярная энергия сцепления $W_0 = 0$, ввиду того что на поверхности отсутствует макроскопическое упорядочение нематических молекул $S_d = 0$. Однако дальнедействующие дисперсионные силы фиксируют планарную ориентацию в объемном слое, задавая малое значение энергии сцепления в поверхностном слое, что и наблюдалось в эксперименте. Что касается анизотропии, то, по-видимому, она обусловлена взаимодействием жестких фрагментов с двумя бензольными кольцами, содержащимися в молекулах 5ЦБ и макромолекулах ПК (рис. 7, б).

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке за счет проектов № 24.29 и № 24.32 Президиума РАН, № 30 СО РАН-НАНБ, РФФИ № 12-03-00816 и Министерства образования и науки № 14.В37.21.0730.

Список использованной литературы

1. Блинов Л. М. Электро-и магниоптика жидких кристаллов. М. : Наука, 1978. 384 с.
2. Berreman D. W. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1973. Vol. 23. P. 215—231.
3. Коньяр Ж. Ориентация нематических жидких кристаллов и их смесей. Минск : Университетское, 1986. 100 с.
4. Horn R. G., Israelachvili J. N., Perez E. // J. Phys. 1981. Vol. 42. P. 39—52.

- ~~~~~
5. Cheng J., Boyd G. D. // Appl. Phys. Lett. 1979. Vol. 35. P. 444—446.
 6. Romanenko A., Pinkevich I., Reshetnyak V. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2004. Vol. 422. P. 173—183.
 7. Vetter P., Ohmura Y., Uchida T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1993. Vol. 42. P. 39—52.
 8. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2012. Вып. 1. С. 42—51.
 9. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. // Жидкие кристаллы и их практическое использование. 2012. Вып. 2. С. 51—59.
 10. Dubois-Violette E., de Gennes P. G. // J. Phys. Lett. 1975. Vol. 36. P. L-255—L-258.
 11. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. // Письма в ЖТФ. 2008. Т. 34. С. 62—68.
 12. Гребенкин М. Ф., Селиверстов В. А., Блинов Л. М., Чигринов В. Г. // Кристаллография. 1975. Т. 20. С. 984—990.
 13. Цветков В. Н. // ЖЭТФ. 1938. Т. 8. С. 855—869.
 14. Rapini A., Papoular M. // J. Phys. Colloq. C4. 1969. Vol. 30. P. C4-54—C4-56.
 15. Yokoyama H., van Sprang H., A. // J. Appl. Phys. 1985. Vol. 57. P. 4520—4526.
 16. Bradshaw M. J., Raynes E. P., Bunning J. D., Faber T. E. // J. Phys. 1985. Vol. 46. P. 1513—1520.
 17. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 400 с.
 18. Блинов Л. М., Давыдова Л. М., Сонин А. А., Юдин С. Г. // Кристаллография. 1984. Т. 29. С. 537—541.
 19. Kelly J. R., Palffy-Muhoray P. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1994. Vol. 243. P. 11—29.
 20. Паршин А. М., Гуняков В. А., Зырянов В. Я., Шабанов В. Ф. // Изв. РАН. Сер. физическая. 2011. Т. 75. С. 1106—1109.

Поступила в редакцию 31.10.2012 г.