

Диэлектрические свойства жидких кристаллов в поликапиллярных матрицах

© Б.А. Беляев, Н.А. Дрокин, М.А. Кумахов*, В.Ф. Шабанов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН,
Красноярск, Россия

* Институт рентгеновской оптики,
Москва, Россия

E-mail: belyaev@iph.krasn.ru

(Поступила в Редакцию 22 сентября 2009 г.)

Описана методика измерений и результаты исследований диэлектрических свойств жидких кристаллов, помещенных в поликапиллярные матрицы. Выявлено сильное влияние химической структуры жесткого остова и длины подвижных алкильных групп молекул жидких кристаллов из группы алкилцианобифенилов на равновесную конфигурацию их „директора“ в капиллярах. Изучены процессы переориентации молекул жидких кристаллов, находящихся в капиллярах в нематической фазе, под влиянием внешнего магнитного поля.

Работа поддержана грантом № 3818.2008.3 Президента РФ, Интеграционным проектом № 5 СО РАН, госконтрактом № 02.740.11.0220.

1. Введение

Хорошо известно, что жидкие кристаллы (ЖК) находят широкое применение в разнообразных устройствах отображения информации. Однако в настоящее время интенсивно изучаются возможности использования ЖК в качестве активной среды в разнообразных конструкциях управляемых устройств микроэлектроники сверхвысоких частот (СВЧ). В частности, в последние годы разработаны конструкции электрически перестраиваемых фазовращателей на жидких кристаллах [1,2], которые обладают неплохими характеристиками как в сантиметровом, так и миллиметровом диапазоне длин волн. Важно отметить, что в миллиметровом диапазоне перестраиваемые устройства на ЖК успешно выдерживают конкуренцию не только с полупроводниковыми конструкциями, но и с конструкциями на ферромагнетиках, для управления которыми требуются неприемлемо большие магнитные поля [3].

Способность молекул жидких кристаллов ориентироваться при контакте с какой-либо поверхностью — известный факт. Известно также, что характер ориентации зависит не только от конкретного жидкого кристалла и материала контактирующей с ним среды, но и в значительной степени от качества обработки поверхности контакта: наличия на ней микроскопических неровностей, царапин или пор. При этом под воздействием внешних магнитных и электрических полей молекулы способны переориентироваться, а после снятия воздействия вновь возвращаются в исходное состояние. Отметим, что на поляризацию молекул ЖК существенное влияние оказывает объем и форма ячейки, в которой он размещается, а также температура, так как она в значительной степени влияет на степень „закрепления“ молекул.

Принимая во внимание тот факт, что в любом устройстве ЖК всегда располагается в кювете, изготовленной

из того или иного материала и имеющей, как правило, небольшой объем, определение исходной ориентации молекул в ячейке и исследование особенностей их поляризации под воздействием внешних полей — важная и актуальная задача современной физики. Одна из таких сложных задач, привлекающая многих исследователей, связана с изучением механизмов поляризации ЖК, помещенных в пористые матрицы и различные композитные структуры. При этом объектами исследований являются, в частности, пористые стеклообразные среды на основе боросиликатного стекла со связанными друг с другом и беспорядочно ориентированными порами [4–7], цеолиты [8,9], а также компаунды типа аэрогелей [10,11] и капсулированные в полимере капли ЖК [12,13].

Исследование таких сложных сред, содержащих жидкие кристаллы, показывают, как правило, снижение скорости поляризации ЖК, обусловленное сильным закреплением молекул на контакте со стенками, а главное, малостью самого объема ЖК в капле или поре. Важно отметить, что основной проблемой в экспериментальных исследованиях неупорядоченных пористых сред является определение равновесной конфигурации „директора“ молекул ЖК в порах, а также регистрация характера его движения под воздействием внешних электрических или магнитных полей. Эту проблему, как известно, очень трудно разрешить с помощью оптических методов исследования, однако такие задачи достаточно надежно решаются методами диэлектрических измерений на низких, высоких и сверхвысоких частотах.

В частности, диэлектрические характеристики и анизотропные свойства изучались у ЖК, размещенных в матрицах с параллельными цилиндрическими порами, например в анапоровых мембранах из окиси алюминия (Anapore membranes) [14–17] и в полимерных пленках, в которых поры микронных и субмикронных размеров создавались методом облучения тяжелыми ионами [17,18]. Было показано, что обычно в необработанных

анановых мембранах молекулы ЖК упорядочиваются параллельно стенкам пор. Однако после химической модификации поверхности пор, например, алифатической кислотой ($C_nH_{2n+1}COOH$), можно получить радиальное упорядочение молекул. В результате, проводя исследования на необработанных и химически обработанных порах, удастся измерить величины диэлектрических проницаемостей для случаев ориентации молекул ЖК как вдоль направления высокочастотного электрического поля (ϵ_{\parallel}), так и ортогонально ему (ϵ_{\perp}). А значит, можно определить и величину диэлектрической анизотропии $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ на частоте измерения. Такие исследования, в частности, показали, что в области низких частот для обеих компонент диэлектрической проницаемости возникает дополнительная область дисперсии, приводящая к увеличению анизотропии, а с ростом частоты наблюдается характерная для ЖК инверсия знака диэлектрической анизотропии [16].

Очевидно, что матрицы с параллельными микропорами являются удобными объектами для исследования механизмов закрепления и упорядочения молекул ЖК в объеме самих пор и на их поверхности. Однако возможности практического использования таких сред, например, для создания управляемых СВЧ-устройств, весьма ограничены, так как в порах столь малых размеров существенно затруднены процессы переориентации молекул ЖК внешними электрическими или магнитными полями. В связи с этим большой интерес представляет изучение диэлектрических свойств ЖК, помещенных в регулярные поликапиллярные матрицы, технология получения которых позволяет варьировать диаметр капилляров в очень широких пределах. Очевидно, что с увеличением диаметра капилляров можно проследить соответствующее уменьшение критических магнитных и электрических полей переориентации молекул (полей Фредерикса), связанное с увеличением „объемной фазы“ ЖК по сравнению с „поверхностной“. Этим исследованиям и посвящена настоящая работа, основная задача которой состоит в определении равновесной конфигурации „директора“ ЖК и излучения процессов дипольной переориентации молекул жидких кристаллов, размещенных в поликапиллярных матрицах.

2. Образцы и методика измерений

Образцы пористых матриц, в которые размещались ЖК, изготавливались путем поперечного распила стеклянных трубок, заполненных тонкостенными стеклянными капиллярами. Технология получения таких поликапиллярных систем была разработана для создания оригинальных линз, позволяющих эффективно фокусировать рентгеновское излучение [19]. Разработанная технология позволяет получать регулярные поликапиллярные системы с диаметром капилляров от долей миллиметра до субмикронных размеров, при этом форма поперечного разреза капилляров, как правило, имеет вид правильного шестигранника.

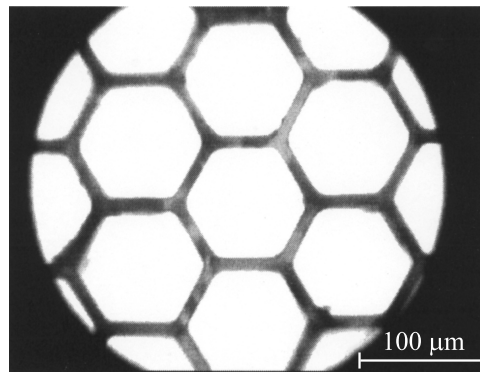


Рис. 1. Фотография участка поликапиллярной матрицы с размером капилляров $\sim 100 \mu m$.

В настоящей работе использовались пористые матрицы в виде дисков диаметром $\sim 10 mm$ и толщиной $\sim 1 mm$ с диаметром сквозных пор 100, 10 и $5 \mu m$. Для иллюстрации на рис. 1 приведена фотография участка пористой матрицы с размерами капилляров $100 \mu m$, которая демонстрирует высокую регулярность пористой структуры и тот факт, что капилляры имеют форму правильного шестигранника. Относительная концентрация пор, которая, очевидно, характеризует коэффициент заполнения пористой матрицы жидким кристаллом, определялась прямым подсчетом отношения площади капиллярных отверстий к общей площади матрицы и составляла величину $v = 0.8$ для матриц с размерами пор 100 и $10 \mu m$, а для матриц с размерами пор $5 \mu m$ $v = 0.45$.

В настоящей работе измерялись температурные зависимости диэлектрической проницаемости размещенных в пористых матрицах нематических ЖК из серии алкилцианобифенилов n -СВ ($n = 5-8$). В этом ряду следует обратить внимание на ЖК с наибольшей длиной алкильного „хвоста“ 8СВ, для которого в интервале температур $10.9-33.5^\circ C$ существует смектическая жидкокристаллическая фаза. Кроме того, были исследованы следующие ЖК: транс-4-пентил-1-(4-цианфенил) циклогексан (ЗРСН), 4-(4'-пентил бицикло/2.2.2/ октан) фенил (5ВСО), транс-4-пропил-(4-цианфенил) циклогексан (ЗРСН). Дипольный момент всех перечисленных соединений обусловлен цианогруппой ($C\equiv N$), расположенной с одной стороны жесткого молекулярного остова, в то время как подвижные метиленовые секторы (алкильные группы) находятся с другой стороны остова. При этом жесткий остов молекул ЖК из серии n -СВ состоит из двух соединенных вдоль одной оси фенильных колец, плоскости которых развернуты друг относительно друга на некоторый угол. Молекулярные остовы у жидкокристаллических субстанций ЗРСН и 5ВСО отличаются от n -СВ лишь замещением одного из фенильных колец на циклогексановый или бициклооктановый фрагмент соответственно. Жидкокристаллическое соединение ЗРСН относится к разряду монотропных нематиче-

ских ЖК. Моноотропность этого ЖК обусловлена тем, что переход в упорядоченную нематическую фазу в нем происходит при $t = 46^\circ\text{C}$ и только из изотропного состояния, предварительно получаемого путем нагрева вещества до более высоких температур. Исследование этого соединения важно в связи с тем, что его алкильный „хвост“ является предельно коротким.

Перед заполнением пор жидкими кристаллами поликапиллярные матрицы прогревались в вакууме в течение 2 h при температуре 90°C . Заполнение пор осуществлялось ЖК в изотропной фазе, т.е. при температурах, больших температуры перехода нематик-изотропная жидкость t_{NI} . После заполнения пор остатки ЖК с поверхности матриц удалялись с помощью бумажных фильтров, а подготовленные образцы выдерживались при $t > t_{NI}$ в течение 12 h. На торцевые поверхности матриц прикатывалась тонкая индиевая фольга, играющая роль обкладок плоского конденсатора. Подготовленный таким образом образец зажимался между двумя пружинящими контактами, расположенными на миниатюрном держателе датчика, который размещался в термостате между полюсами электромагнита, позволяющего создавать магнитное поле $H = 16\text{ кОе}$. Ориентация внешнего магнитного поля относительно направления осей цилиндрических пор изменялась простым поворотом держателя датчика с исследуемым образцом. В одном случае поле было параллельно (H_{\parallel}), в другом перпендикулярно (H_{\perp}) направлению осей пор.

Скорость изменения температуры в процессе экспериментальных исследований составляла величину $8\text{--}10^\circ\text{C}$ в час, а в режиме термостатирования температура поддерживалась с точностью $\sim 0.3^\circ\text{C}$. Термостатирование или заданная скорость изменения температуры осуществлялась с помощью программно-управляемого термоблока, автоматически регулирующего температуру и подачу воздуха, которым обдувался измерительный датчик с образцом.

Диэлектрические измерения проводились на частоте 1 kHz на специально сконструированной автоматизированной установке на базе цифрового LCR измерителя E7-8 [20]. При этом емкостной датчик с исследуемым образцом подключался по четырехпроводной схеме, исключающей влияние соединительных проводников на результат измерения. В ходе экспериментов исследовались температурные зависимости емкости образца C_x и тангенса угла его диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$. Величина емкости C_x , как известно, пропорциональна действительной компоненте диэлектрической проницаемости исследуемого образца, а величина $\text{tg } \delta$ — ее мнимой компоненте. Заметим, что емкость C_x измерялась сначала для пустой пористой матрицы, а затем после ее заполнения ЖК. При этом абсолютная точность определения этой емкости была не хуже $\sim 0.05\text{ pF}$, а $\text{tg } \delta$ — не хуже ~ 0.001 .

Методика определения равновесной ориентации „директора“ жидкого кристалла, находящегося в порах, заключается в сравнении характера наблюдаемых темпера-

турных изменений C_x и $\text{tg } \delta$ в области фазового перехода из изотропного в нематическое состояние исследуемых образцов с соответствующими зависимостями, полученными для однородно упорядоченных ЖК в сплошном объеме. Такое сравнение позволяет качественно определить равновесное направление ориентации молекул относительно стенок пор и оценить степень и характер переориентации „директора“ молекул под воздействием внешних электрических или магнитных полей.

3. Результаты измерений

Как показали проведенные эксперименты, значения $\text{tg } \delta$ для всех исследованных образцов пустых пористых матриц не превышали величины 0.001, и они почти не увеличивались при помещении в матрицы жидких кристаллов. Поэтому основное внимание в настоящей работе уделено температурным измерениям и анализу зависимостей емкости $C_x(t)$, которые, как уже отмечалось, отражают поведение действительной компоненты комплексной диэлектрической проницаемости исследуемых образцов. Важно заметить, что направление поляризации высокочастотного электрического поля в исследуемых образцах совпадает с направлением осей капилляров. Поэтому при ориентации „директора“ молекул ЖК вдоль капилляров емкость измеряемого образца будет наибольшая, а при ортогональном расположении „директора“ — наименьшая (в соответствии с величинами диэлектрических проницаемостей ε_{\parallel} и ε_{\perp}).

Рассмотрим вначале зависимости $C_x(t)$ поликапиллярных матриц, заполненных жидким кристаллом 8CB (рис. 2), молекулы которого, как уже отмечалось, имеют самый длинный алкильный „хвост“. Видно, что в капиллярах размером $100\text{ }\mu\text{m}$ (рис. 2, а) с увеличением температуры вплоть до температуры фазового перехода ЖК из нематического состояния в изотропную жидкость $t_{NI} = 40.5^\circ\text{C}$ емкость образца монотонно увеличивается как при наличии ориентирующего магнитного поля, приложенного параллельно H_{\parallel} или ортогонально H_{\perp} осям капилляров (кривые 2, 3), так и при его отсутствии (кривая 1). В этом интервале температур более высокая емкость $C_x(t)$ наблюдается при наложении магнитного поля H_{\parallel} , ориентирующего „директор“ молекул ЖК в направлении поляризации высокочастотного электрического поля в образце, а меньшая емкость имеет место при поле H_{\perp} , ориентирующим „директор“ молекул ортогонально направлению поляризации электрического поля. Однако тот факт, что в отсутствие магнитного поля емкость образца мала, причем при наложении ортогонального поля (H_{\perp}) ее уменьшение незначительно, свидетельствует о том, что в исходном состоянии ($H = 0$) „директор“ молекул ЖК ориентируется почти перпендикулярно осям капилляров.

Следует отметить, что характер поведения кривых $C_x(t)$ достаточно хорошо согласуется с известными температурными зависимостями диэлектрических про-

нищаемостей $\varepsilon_{\parallel}(t)$ и $\varepsilon_{\perp}(t)$ [21] для ориентированного „массивного“ образца жидкого кристалла 8СВ (рис. 3). Штриховыми линиями на рисунке отмечены температуры фазовых переходов ЖК из смектического состояния в нематическое t_{SN} и из нематического состояния в изотропное t_{NI} . Видно, что в области температуры t_{SN} диэлектрические проницаемости ε_{\parallel} и ε_{\perp} практически не меняются, как и емкости исследуемого образца в ориентирующих полях H_{\parallel} и H_{\perp} (рис. 2, а). Однако при

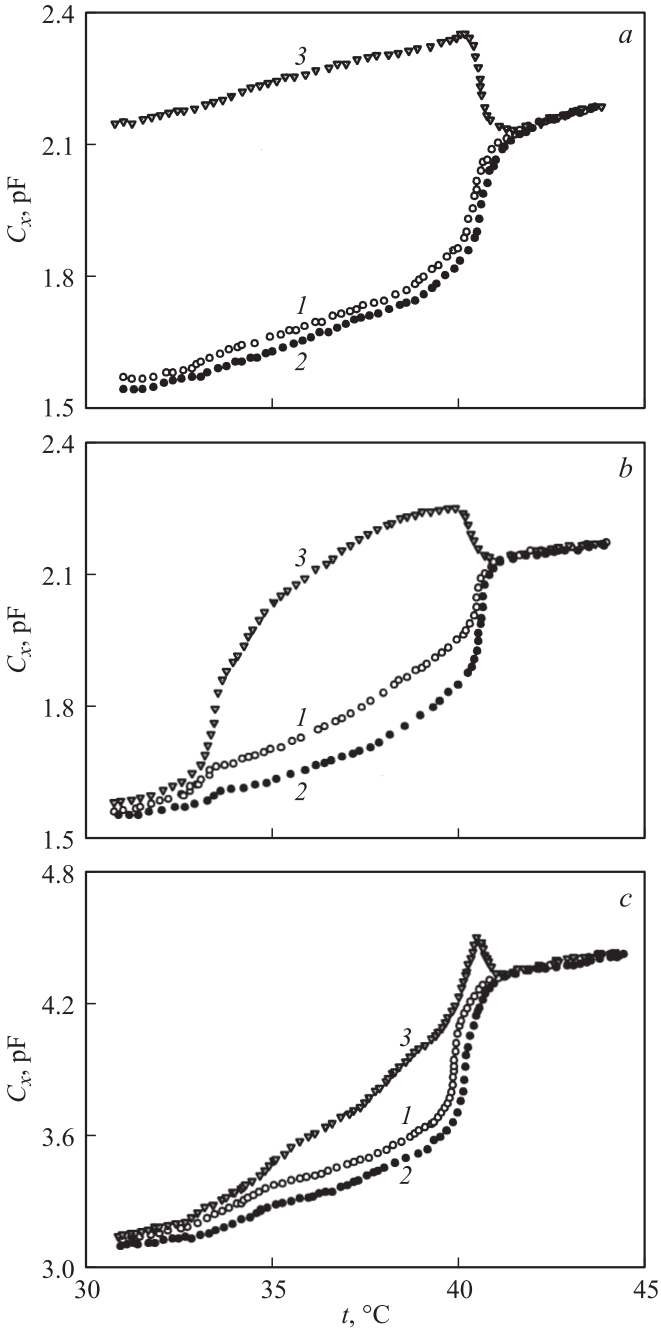


Рис. 2. Температурные зависимости емкости измерительного конденсатора на матрице с диаметром пор 100 (а), 10 (b) и 5 μm (с), заполненных жидким кристаллом 8СВ. 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — в поле H_{\perp} , 3 — в поле H_{\parallel} .

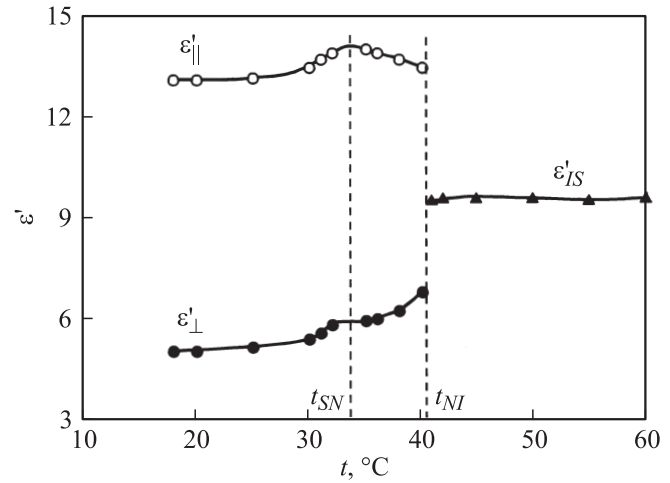


Рис. 3. Температурные зависимости продольной ε_{\parallel} и поперечной ε_{\perp} компонент статической диэлектрической проницаемости жидкого кристалла 8СВ в смектической ($t < t_{SN}$), нематической ($t_{SN} < t < t_{NI}$) и изотропной ($t > t_{NI}$) фазах.

переходе ЖК в изотропное состояние на зависимостях $\varepsilon_{\parallel}(t)$ и $\varepsilon_{\perp}(t)$ наблюдаются ярко выраженные скачки, которые для ЖК в пористых матрицах также имеют место на зависимостях $C_x(t)$, но эти скачки слегка размыты.

Важно отметить, что с ростом температуры наблюдается монотонное увеличение емкости C_x исследуемого образца пористой матрицы с размером капилляров 100 μm , содержащей жидкий кристалл 8СВ (рис. 2, а), причем как до температуры перехода t_{NI} , так и после нее. Этот факт можно объяснить сильной температурной зависимостью энергии закрепления на стенках пор молекул ЖК, длинные оси которых, как уже отмечалось, ориентируются преимущественно перпендикулярно осям капилляров, т.е. упорядочиваются либо радиально, либо планарно-полярно [22]. По результатам исследований, проведенных в том числе и на образцах с меньшим размером капилляров (рис. 2, b, c), можно сделать вывод о том, что с увеличением температуры энергия закрепления молекул ЖК стенками пор уменьшается.

Действительно, в образце с порами диаметром 10 μm (рис. 2, b) с ростом температуры примерно до 36.5 $^{\circ}\text{C}$ исходное состояние молекул ЖК остается почти неизменным при наложении магнитного поля в любом направлении. Это означает, что напряженности магнитного поля, используемого в эксперименте ($H = 16 \text{ kOe}$), недостаточно для преодоления энергии закрепления молекул на стенках капилляров. Однако с увеличением температуры свыше 36.5 $^{\circ}\text{C}$ наблюдается быстрый рост C_x в поле H_{\parallel} (кривая 3), который, очевидно, обусловлен переориентацией осей молекул вдоль поля, т.е. в направлении осей капилляров. Процесс переориентации молекул ЖК с увеличением температуры аналогичен переходам Фредерика, наблюдаемым в электрических или магнитных полях.

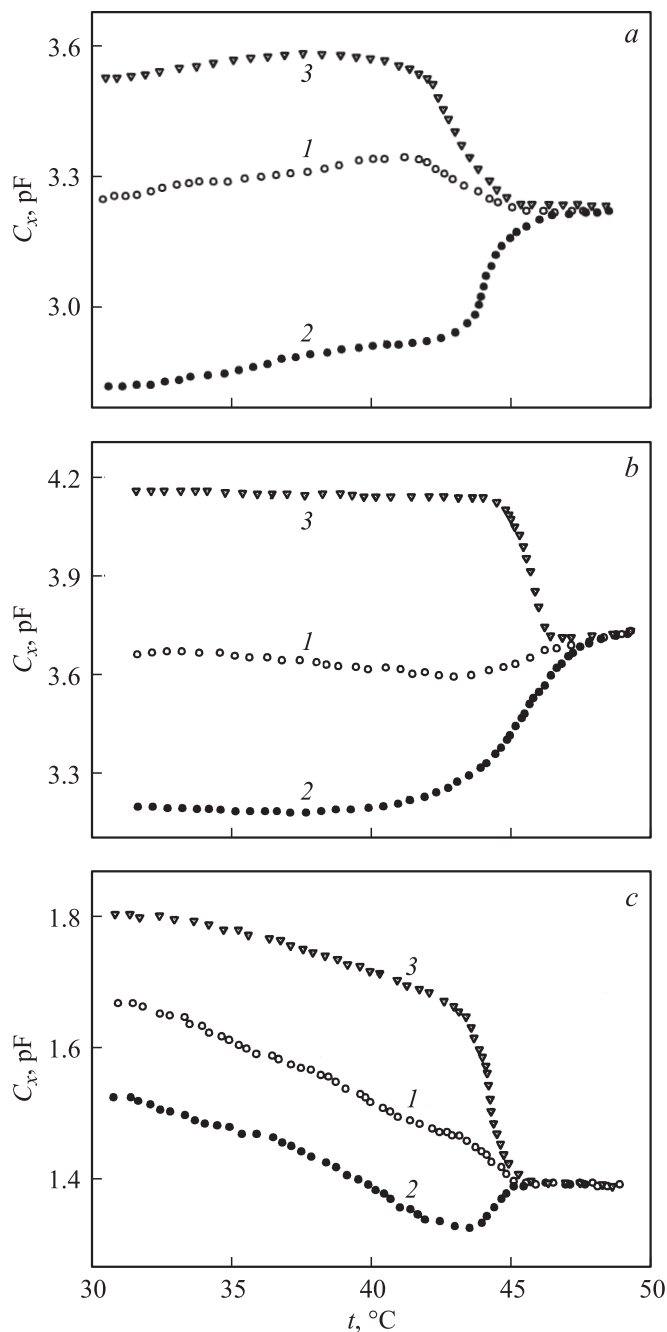


Рис. 4. Температурные зависимости емкости измерительного конденсатора на матрице с диаметром пор 100 (а), 10 (b) и 5 μm (с), заполненных жидким кристаллом ЗРСН. 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — в поле H_{\perp} , 3 — в поле H_{\parallel} .

Очевидно, что с уменьшением диаметра капилляров объем молекул ЖК, находящихся в „приповерхностном“ слое, увеличивается по отношению к полному объему жидкого кристалла. В результате пропорционально увеличивается доля энергии, обуславливающей закрепление молекул на поверхностях капилляров. Поэтому в образце с порами диаметром 5 μm (кривая 3 на рис. 2, с) процесс переориентации молекул начинается при еще

более высокой температуре — около 40°C (вблизи температуры фазового перехода жидкого кристалла в изотропную жидкость). Аналогичные зависимости $C_x(t)$ и обнаруженные в настоящей работе закономерности их изменения при уменьшении диаметра капилляров в образцах имеют место для всей исследованной серии алкилцианобифенилов, имеющих более короткие алкильные „хвосты“ $n = 7$ и 6.

Однако для жидкого кристалла ЗРСН, обладающего самым коротким алкильным „хвостом“ ($n = 3$), измерения показали существенное отличие зависимостей $C_x(t)$ (рис. 4). В частности, сравнительно небольшие изменения $C_x(t)$ с ростом температуры наблюдаются в отсутствие постоянного магнитного поля (кривые 1). При этом для образца с диаметром капилляров 100 μm (рис. 4, а) измеряемая емкость сначала монотонно увеличивается, а затем уменьшается в области перехода ЖК в изотропную жидкость. Для образца с диаметром капилляров 10 μm (рис. 4, б), напротив, $C_x(t)$ сначала уменьшается, а затем растет. Наконец, для образца с диаметром капилляров 5 μm (рис. 4, с) наблюдается монотонное уменьшение емкости $C_x(t)$ вплоть до температуры перехода ЖК в изотропное состояние.

Важно отметить, что в нематическом состоянии ЖК все значения емкости для образца с диаметром пор 10 μm (рис. 4, б) в отсутствие постоянного магнитного поля (кривая 1) попадают примерно в середину области между значениями, измеренными при перпендикулярном (кривая 2) и параллельном (кривая 3) направлениях поля относительно оси образца. Этот факт может свидетельствовать либо об отсутствии самопроизвольного упорядочения молекул, либо об ориентации их „директора“ в исходном состоянии под углом примерно 45° к оси капилляров. Тот факт, что с увеличением диаметра капилляров емкость образца в отсутствие магнитного поля приближается к значениям $C_x(t)$, наблюдаемым в параллельном магнитном поле (рис. 3, а), а с уменьшением диаметра капилляров (рис. 3, с) — наоборот, в принципе не противоречит предположению о неупорядоченном состоянии мезофазы. В этом случае в образцах должны появляться области самопроизвольной ориентации дипольных моментов молекул с направлениями либо параллельно, либо перпендикулярно стенкам пор, которые должны занимать некоторый небольшой объем жидкого кристалла вблизи стенок пор. Однако, на наш взгляд, наиболее вероятным является второе предположение — об ориентации „директора“ ЖК в исходном состоянии под углом примерно 45° к оси капилляров. В этом случае с изменением диаметра капилляров происходит либо уменьшение, либо увеличение этого угла.

Можно было бы предположить, что такое поведение в порах жидкого кристалла ЗРСН является следствием аномально короткого алкильного „хвоста“ его молекул. Однако учитывая тот факт, что в этом соединении жесткий остов молекулы содержит циклогексанный фрагмент в отличие от фенильных колец в ЖК из серии n -СВ, представляет интерес провести сравнение

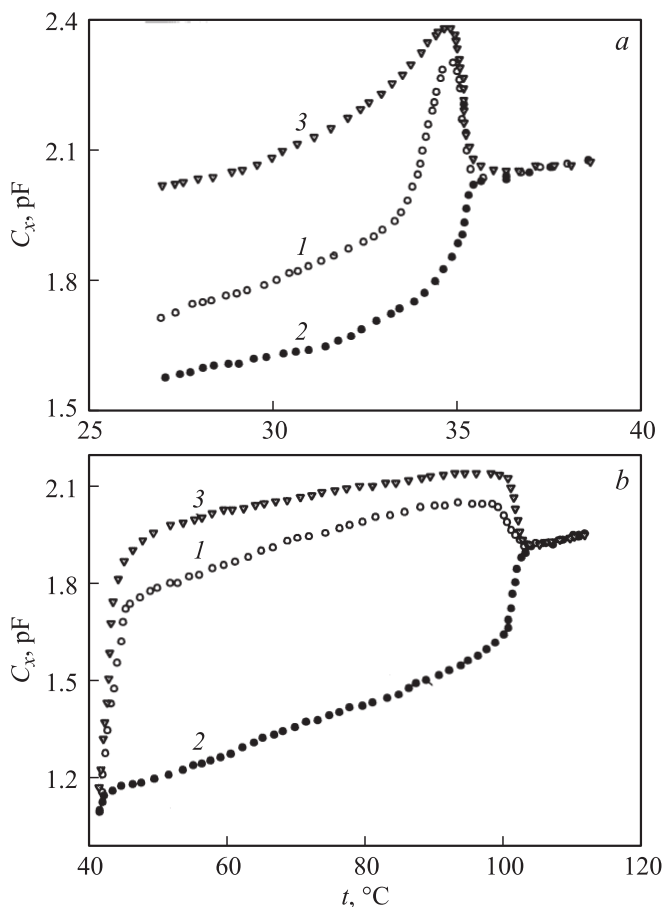


Рис. 5. Температурные зависимости емкости измерительного конденсатора на матрице с диаметром пор $100\ \mu\text{m}$, заполненных жидким кристаллом 5CB (а) и 5BCO (б). 1 — в отсутствие магнитного поля, 2 — в поле H_{\perp} , 3 — в поле H_{\parallel} .

диэлектрических свойств кристаллов 5CB и 5BCO, имеющих одинаковую длину алкильной цепочки $n = 5$, но разные молекулярные остовы (фенильные кольца у ЖК 5CB и бициклооктановый фрагмент у кристалла 5BCO). Результаты измерений этих соединений, помещенных в поры с диаметром $100\ \mu\text{m}$, приведены на рис. 5.

Из рис. 5, а (кривая 1) видно, что в отсутствие поля H значения $C_x(t)$ жидкого кристалла 5CB в порах при $t < t_{NI}$ сначала увеличиваются, а затем уменьшаются. Таким образом, вблизи точки фазового перехода, выстроившись параллельно стенкам пор, длинные оси молекул не могут закрепиться в таком положении и стремятся переориентироваться в частично упорядоченное планарно-полярное или радиальное состояние. Подобная тенденция наблюдается и при воздействии магнитного поля, приложенного вдоль оси пор (H_{\parallel}) (рис. 5, а, кривая 2). Как видно (рис. 5, а, кривая 3), внешнее поле H_{\perp} при $t < t_{NI}$ уменьшает значения $C_x(t)$, другими словами, дополнительно ориентирует длинные оси молекул перпендикулярно стенкам пор.

На рис. 5, б приведены аналогичные результаты измерений диэлектрических характеристик ЖК 5BCO. Вид-

но, что даже в отсутствие внешнего магнитного поля при переходе из изотропного состояния в нематическое величина $C_x(t)$ резко возрастает, что свидетельствует о преимущественно продольной самопроизвольной ориентации молекул. При воздействии на образец внешнего поля H_{\parallel} величина емкости $C_x(t)$ еще несколько возрастает в результате более однородной упорядоченности молекул вдоль стенок пор. Как видно, при приложении внешнего поля H_{\perp} при $t < t_{NI}$ значение емкости $C_x(t)$ значительно уменьшается, показывая, что молекулы ЖК ориентируются перпендикулярно стенкам пор. Однако при дальнейшем снижении температуры наблюдается резкое уменьшение емкости $C_x(t)$ как в случае отсутствия внешнего магнитного поля, так и в случае его направления вдоль осей капилляров. Это означает, что при низких температурах молекулы ЖК самопроизвольно ориентируются преимущественно аксиально, причем используемое в эксперименте магнитное поле напряженностью $H = 16\ \text{кОе}$ недостаточно по величине для преодоления энергии закрепления молекул. Заметим, что величину энергетического барьера W_H , который преодолевается магнитным полем, несложно оценить по формуле [23]

$$W_H = \frac{1}{2\pi} \gamma h H,$$

где γ — гиромангнитное отношение, h — постоянная Планка. При этом $W_H \approx 2.97 \cdot 10^{-16}\ \text{erg}$.

4. Заключение

Таким образом, из температурных измерений $C_x(t)$ образцов стеклянных поликапиллярных матриц, заполненных жидкими кристаллами, показано, что характер молекулярного упорядочения зависит не только от размеров пор, но и от молекулярной структуры исследуемых ЖК. В частности, установлено, что мезофазы ЖК из серии алкилцианобифенилов с $n = 5-8$ упорядочиваются преимущественно гомеотропно стенкам пор. Возможно, что возникающие при этом планарно-полярные или радиальные ориентации поля „директора“ обусловлены электростатическим или молекулярным механизмом взаимодействия концевой фрагмента $-C \equiv N-$ молекул с силасиновыми $=Si=O$ группами стекла, образующими поверхность капилляров. Гомеотропному типу упорядочения молекул способствуют также и стерические взаимодействия достаточно длинных алкильных цепей [24].

В то же время эксперименты показали, что, вероятнее всего, молекулы ЖК с большим циклогексановым или бициклооктановым фрагментом остова 3PCN и 5BCO находятся в порах либо в разупорядоченном состоянии, либо с ориентацией „директора“ молекул под углом примерно 45° к оси капилляров, но в магнитных полях они легко ориентируются как параллельно, так и перпендикулярно стенкам пор. Этот факт, несомненно, свидетельствует о наличии молекулярного взаимодействия остова молекул со стенками пор. По-видимому,

выявленные в работе процессы ориентации молекул жидких кристаллов в поликапиллярных матрицах связаны с конкуренцией молекулярных, электростатических и стерических взаимодействий остова, алкильных цепей и дипольных моментов со стенками пор.

Список литературы

- [1] S. Mueller, F. Goelden, P. Scheele, M. Wittek, C. Hock, R. Jakoby. Proc. 36th Eur. microwave Conf. Manchester, UK (2006). P. 306.
- [2] Б.А. Беляев, А.А. Лексиков, А.М. Сержантов, В.Ф. Шабанов. Письма в ЖТФ **34**, *11*, 19 (2008).
- [3] О.Г. Вендик, М.Д. Парнес. Антенны с электрическим сканированием. Сайнспресс, М. (2002). 231 с.
- [4] G.S. Iannacchione, G.P. Grawford, S. Zumer, J.W. Doane, D. Finotello. Phys. Rev. Lett. **71**, *16*, 2595 (1993).
- [5] G.P. Shinha, F.M. Aliev. Phys. Rev. E **58**, *2*, 2001 (1998).
- [6] S. Tripathi, C. Rosenblatt, F.M. Aliev. Phys. Rev. Lett. **72**, *17*, 2725 (1994).
- [7] C.H. Cramer, T.H. Cramer, M. Arndt, F. Kremer, L. Naji, R. Stannarius. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **303**, 209 (1997).
- [8] S. Frunza, A. Schönhals, L. Frunza, H.L. Zubowa, H. Kosslick, R. Frise, H. Carius. Chem. Phys. Lett. **307**, 167 (1999).
- [9] L. Frunza, S. Frunza, A. Schönhals, H.L. Zubowa, H. Kosslick, R. Fricke. J. Mol. Struct. **563–564**, 491 (2001).
- [10] N.A. Bellini, L. Wu Clark, C.W. Garland, D. Schaefer, B. Olivier. Phys. Rev. Lett. **69**, 788 (1992).
- [11] S. Kralj, G. Lahajnar, Z. Zidansek, N. Vrbancic-Korac, M. Vilfan, R. Blinc, M. Kosec. Phys. Rev. E **48**, 340 (1993).
- [12] Г.М. Жаркова, А.С. Сонин. Жидкокристаллические композиты. Наука, Новосибирск (1994). С. 214.
- [13] V.G. Nazarenko, Yu.A. Reznikov, V.Yu. Reshetnyak, V.V. Sergan, V.Ya. Zyryanov. Mol. Mater. **2**, 295 (1993).
- [14] S.A. Rozanski, R. Snannarius, H. Groothues, F. Kremer. Liq. Cryst. **20**, 59 (1996).
- [15] C.P. Sinba, F.M. Aliev. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **304**, 309 (1997).
- [16] S.A. Rozanski, F. Kremer, H. Groothues, R. Stannarius. Mol. Cryst. Liq. Cryst. **303**, 319 (1997).
- [17] P. Levitz, G. Ehret, S.K. Sinha, J.M. Drage. J. Chem. Phys. **95**, 8 (1991).
- [18] G.P. Grawford, L.M. Steele, R. Ondris-Crawford, G.S. Iannacchione, C.J. Yeager, J.M. Doane, D. Finotello. J. Chem. Phys. **96**, *10*, 7793 (1991).
- [19] А.Ю. Романов. Письма в ЖТФ **31**, *5*, 47 (2005).
- [20] К.В. Агафонов, Б.А. Беляев. Тр. IV Междунар. науч.-практ. конф. „Электронные средства и системы управления. Опыт инновационного развития“. Томск (2007). Ч. I. С. 57.
- [21] C. Druon, J.M. Wacrenier. J. Phys. (France) **38**, *1*, 47 (1977).
- [22] S. Faetty. Phys. Lett. A **237**, 264 (1988).
- [23] А.Г. Гуревич. Магнитный резонанс в ферритах и антиферромагнетиках. Наука, М. (1973). 591 с.
- [24] G.P. Grawford, D.W. Allender, J.W. Doane. Phys. Rev. A **45**, 8693 (1992).