

ЭФФЕКТЫ ЭЛЕКТРОГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ
В СМЕКТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ ТИПА С

© 2013 г. О. А. Денисова*, А. Н. Чувывров

* Уфимский государственный университет экономики и сервиса,
E-mail: denisovaolga@bk.ru

Башкирский государственный университет, Уфа

Поступила в редакцию 26.06.2012 г.

Исследованы эффекты электрогидродинамической неустойчивости в смектических жидких кристаллах типа С в электрическом поле. Объектом изучения служили ориентированные слои пара-оксибензойной кислоты, обладающие смектической фазой. Наблюдаемые эффекты делятся на три группы по характеру движения центров инерции молекул, ориентации директора и слоев смектического жидкого кристалла типа С. Экспериментально обнаружены неустойчивости типа азимутальных доменов и доменов Капустина–Вильямса. Ячейка представляла собой две стеклянные пластины с электродами из двуокиси олова, разделенные майларовыми прокладками заданной толщины. Рассмотрены различные схемы поворота доменов. Обнаружено, что электрогидродинамическая неустойчивость зависит от геометрии слоя.

DOI: 10.7868/S0023476113020070

ВВЕДЕНИЕ

Смектические жидкие кристаллы (СЖК) типа С – двусные анизотропные среды, характеризующиеся тензором упорядочения $Q_{\alpha\beta}$ с отличными от нуля компонентами Q_{zz} , Q_{xz} , Q_{xx} , Q_{yy} и условием $Q_{xx} \neq Q_{yy} \neq 0$ [1]. Это означает аналогию двумерным нематическим жидким кристаллам (НЖК) в плоскости отдельного смектического слоя с наклоном директора на угол ψ относительно нормали к поверхности слоя. Наклон характеризуется единичным вектором \mathbf{C} , лежащим в плоскости слоя (С-директор). В соседних слоях направления С-директора параллельны друг другу, а поле С-директора обладает дальним порядком. В направлении нормали к слоям СЖК С ведут себя аналогично СЖК А, но в плоскости слоя свойства С-директора аналогичны НЖК. В связи с этим, когда эффекты “просачивания” слоев отсутствуют при интерпретации многих явлений, удобно рассматривать однослойное квазинематическое приближение с дальнейшим обобщением на весь объем.

Явление электрогидродинамической неустойчивости (ЭГДН) в НЖК к настоящему времени хорошо изучено. В ряде работ [2–5] проводилось изучение ЭГДН в СЖК типа С, но в целом эти работы не носят систематического характера. Основная их трудность – это получение тонких ориентированных слоев. В настоящей работе исследованы эффекты ЭГДН в ориентированных образцах 7, 8 – гомологов ряда пара-оксибензойной кислоты, обладающих смектической фазой с

$\epsilon_a < 0$. Методы изучения доменных структур в СЖК С подробно изложены в [4].

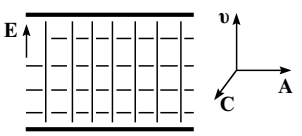
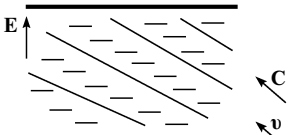
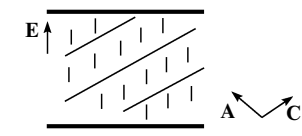
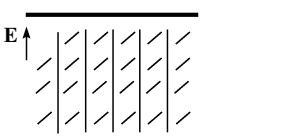
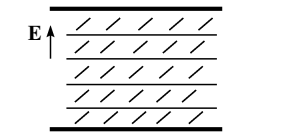
Стационарный эффект ЭГДН в СЖК С в значительной степени зависит от предварительной ориентации слоя смектика. По-видимому, наблюдаемые эффекты можно разделить на три группы, различающиеся характером движения центров инерции молекул, ориентацией директора и слоев СЖК С в электрическом поле: неустойчивость типа Капустина–Вильямса, азимутальная неустойчивость, развитая ЭГДН, определяемая формированием и движением дисклинаций.

Для упрощения дальнейшего рассмотрения введем специальные обозначения, характеризующие потоки, ориентацию С-директора и электрического поля, а именно: \mathbf{A} – компонент директора, перпендикулярный смектическому слою; \mathbf{C} – компонент директора вдоль слоя; \mathbf{v} – единичный вектор, перпендикулярный слою СЖК; $\boldsymbol{\mu}$ – вектор угловой скорости центров инерции молекул.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования ЭГДН проводились по стандартной методике [4], ячейка представляла собой две стеклянные пластины с электродами из двуокиси олова SnO_2 , разделенные майларовыми прокладками заданной толщины. Для задания однородной ориентации молекул СЖК С на электроды под различными углами напылялись тонкие слои хрома толщиной от 100 Å. Толщина этих пленок определялась с помощью эллипсометра по стандартной методике [6]. Планарная ориен-

Типы электрогидродинамической неустойчивости в СЖК С и оптические картины доменных структур

Пункт	Ориентация	Тип структуры и методы получения	ЭГДН в постоянных полях	ЭГДН в переменных полях	Поворот доменов
1	 $E \neq 0 \{E \parallel v, \mu \parallel A\}$	Простая веерообразная, сферолиты, полировка поверхности электродов	U_{1n} – продольные домены, U_{2n} – домены Капустина–Вильямса, ширина доменов постоянная	U_{1n} – продольные домены с изменяемой шириной, U_{2n} – поперечные домены	U_{3n} – поворот в переменных и постоянных полях, возникает новая ориентация доменов
2	 $E \neq 0 \{\mu \parallel C, C \parallel v\}$	Сферолиты, конфокальная, зернистая или мозаичная	U_{1n} – продольные домены, U_{2n} – домены Капустина–Вильямса	U_{1n} – продольные домены, U_{2n} – домены Капустина–Вильямса	U_{3n} – поворот в переменных и постоянных полях
3	 $E \neq 0 \{(E, v) = \psi, \mu \parallel C\}$	Конфокальная, сферолиты, вертикальное напыление пленки хрома толщиной 100 Å	U_{1n} – продольные домены	U_{2n} – домены Капустина–Вильямса	
4	 $E \neq 0 \{\mu \parallel E, \mu \perp C\}$	Шлирен-текстура, косое напыление пленки хрома толщиной 100–200 Å	U_{1n} – продольные домены	U_{2n} – продольные домены	
5	 $E \neq 0 \{(C, E) = \psi, \mu \parallel E\}$	Мозаичная с осью нормальной к поверхности, косое напыление пленки хрома толщиной до 400–500 Å	Неустойчивость Хельфриха–Юро, квадратные домены		

тация достигалась полировкой поверхности электродов. В работе исследовался СЖК С пара-оксибензойной кислоты при температуре 120°C. Пороги образования доменов и их строение изучались с использованием поляризационно-оптического микроскопа Axio Lab Pol (Карл Цейс, Германия), оснащенного приставкой с автоматической стабилизацией температуры с точностью до 0.1°C. Тестовый сигнал генерировался компьютером и через усилитель подавался на образец. Толщина образца определялась методом интерференции на спектрометре Shimadzu 3800.

Для объяснения зависимостей порога ЭГДН от проводимости, диэлектрической проницаемости и частоты рассматривались 2D-модели. Третье измерение учитывается при $U > U_{1n}$, но реальный НЖК является 3D-системой. Поэтому изучение и систематизация зависимостей U_{1n} от частоты в СЖК типа С, которые ближе к 2D-системам, является важной задачей.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Возможные типы ЭГДН в СЖК С и наблюдаемые оптические картины доменных структур сведены в таблицу. Качественные результаты, полученные на основе квазинематической модели, подтверждаются экспериментально. На рис. 1 приведены пороговые характеристики ЭГДН для различно ориентированных слоев СЖК С. Как правило, здесь реализуются азимутальные домены, но аналогично НЖК имеются две ветви неустойчивости: низкочастотная с порогом U_{1n} и высокочастотная с порогом U_{2n} . Влияние частоты на пороговые поля также зависит от ориентации С-директора на границах. Аналогично НЖК наблюдается гистерезис порога U_{2n} при понижении частоты ниже точки пересечения А ветвей U_{1n} и U_{2n} (область $\omega-$) (рис. 2).

В соответствии с геометрией С-директора на низких частотах при условии $\{E \parallel v, \mu \parallel A\}$ (таблица, п. 1) наблюдаются домены типа Капустина–

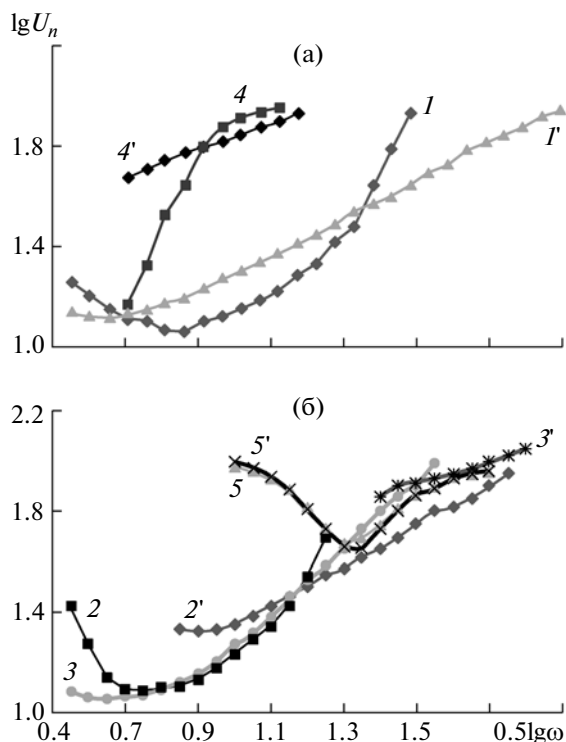


Рис. 1. Низкочастотная и обратная высокочастотная (со штрихом) зависимости пороговых полей (1–5 – различные геометрии ориентации директора, пронумерованные в соответствии с номерами пунктов в таблице).

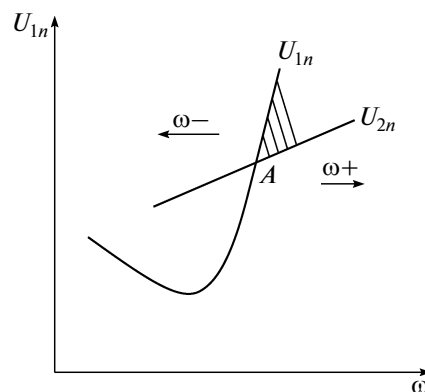


Рис. 2. Иллюстрация пересечения порогов различных типов доменов путем смены режимов ЭГДН в СЖК С при повышении напряжения от U_{2n} на величину $U_{1n}-U_{2n}$.

Вильямса и стандартная высокочастотная зависимость порога $U_{1n} \sim \omega^{1/2}$ [5, 7] (рис. 1). Жидкий кристалл ориентирован планарно. Электрическое поле приложено перпендикулярно к ячейке. В этом случае наблюдается простая веерообразная структура или сферолиты. При действии постоянного электрического поля по достижении порога U_{1n} появляются продольные домены, по достижении порога U_{2n} – домены Капустина–Вильямса (рис. 3). В переменном электрическом поле имеют место продольные домены с изменяемой шириной (порог U_{1n}), затем поперечные (порог U_{2n}). Схема поворота доменов – $\{\mathbf{E} \parallel \mathbf{v}, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\} \rightarrow \{\mathbf{E} \parallel \mathbf{v}, \boldsymbol{\mu} \parallel \mathbf{A}, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\}$.

Два других случая ориентации директора, представленные в таблице, пп. 2 и 3 ($\{\boldsymbol{\mu} \parallel \mathbf{C}, \mathbf{C} \parallel \mathbf{v}\}$ и $(\mathbf{E}, \mathbf{v}) = \psi, \boldsymbol{\mu} \parallel \mathbf{C}$), аналогичны НЖК, когда директор ориентирован под углом к электроду [5]. В этом случае реализуется, как и в НЖК, азимутальная неустойчивость с частотной зависимостью порога $U_{2n} \sim \omega$ в области диэлектрической неустойчивости. В случае 2 наблюдаются конфокальная, зернистая, мозаичные структуры или сферолиты. При действии постоянного электрического поля по достижении порога U_{1n} появляются продольные домены, по достижении порога

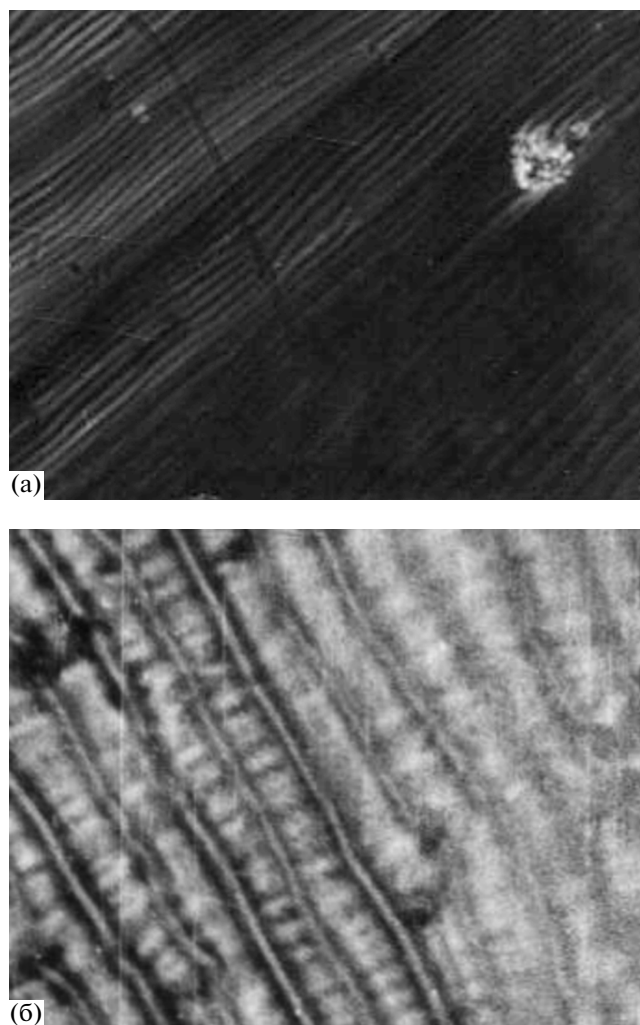


Рис. 3. Разновидности доменов: а – продольные домены, соответствующие геометриям п. 1, 2, 3 в таблице; б – случай одновременного сосуществования доменов Капустина–Вильямса и продольных доменов п. 1, 2 в таблице (масштаб 1 : 100).

U_{2n} — домены Капустина—Вильямса. В переменном электрическом поле имеют место продольные домены (порог U_{1n}), затем домены Капустина—Вильямса (порог U_{2n}). В случае 3 рассматривается гомеотропная ориентация молекул ЖК. Типы структур — конфокальная или сферолитная. По достижении порога U_{1n} наблюдаются продольные домены в постоянном электрическом поле. В переменном электрическом поле — домены Капустина—Вильямса (рис. 3). Схема поворота доменов — $\{\mathbf{E} \parallel \mathbf{v}, \boldsymbol{\mu} \perp \mathbf{C}, (\mathbf{C}, \mathbf{v}) = \psi\} \rightarrow \{\mathbf{E} \parallel \mathbf{v}, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\}$.

Когда $\{\boldsymbol{\mu} \parallel \mathbf{E}, \boldsymbol{\mu} \perp \mathbf{C}\}$ (таблица, п. 4), пороговое напряжение зависит от частоты как $U_{2n} \sim \omega^{2/3}$. Заданная ориентация ЖК-молекул получается в результате косоугольного напыления пленки из хрома толщиной 100–200 Å. Наблюдаемая структура — шпирен-текстура. По достижении порога в постоянных и переменных полях появляются продольные домены. В случаях 3 и 4 переходы разрешены лишь при $\varepsilon_a > 0$ и планарной ориентации С-директора. При этом ориентация новой доменной структуры зависит от напряжения выше порога Фредерикса. Схема поворота доменов — $\{\mathbf{E} \parallel \mathbf{V}\} \rightarrow \{\mathbf{E} \parallel \mathbf{v}, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\}$.

Наконец, при условии $\{(\mathbf{C}, \mathbf{E}) = \psi, \boldsymbol{\mu} \parallel \mathbf{E}\}$ (таблица, п. 5) частотная зависимость порога $U_{2n} \sim \omega^{3/2}$. Заданная ориентация ЖК-молекул получается в результате косоугольного напыления пленки из хрома толщиной 400–500 Å. Тип структуры — мозаичная с осью, нормальной к поверхности. В постоянном электрическом поле наблюдается неустойчивость Хельфриха—Юро и квадратные домены. Схема поворота доменов — $\{\mathbf{E} \parallel \mathbf{v}, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\} \rightarrow \{\mathbf{E} \parallel \mathbf{C} \parallel \mathbf{v}\}$.

Последние две зависимости (рис. 1б) не согласуются ни с одной из известных на сегодняшний день теорий. По-видимому, они являются следствием нелинейного взаимодействия электрического поля с тонким слоем СЖК С при наличии эффекта Фредерикса.

Следует отметить другой механизм поворота, когда на высоких частотах одновременно реализуются зависимости пороговых напряжений доменов $U_{2n} \sim \omega^{1/2}$ либо $U_{2n} \sim \omega$ (рис. 1). Тогда наблюдаются азимутальные домены двух типов с переходом по напряжению: $\{E \parallel \mathbf{v}, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\} \rightarrow \{E \parallel \mathbf{v}, (\mathbf{C}, \mathbf{v}) = \psi, \mathbf{C} \perp \mathbf{v}\}$ [8].

Наблюдаемые зависимости пороговых полей в диэлектрической области имеют другую важную особенность — гистерезис, из-за которого при понижении частоты кривая U_{2n} пересекает область U_{1n} (рис. 1) и может принимать значения $U_{1n} > U_{2n}$, как это приведено на рис. 1а. Возможно, сохранение диэлектрического режима при обратном ходе частоты связано с блокированием абсорбцион-

ных токов вблизи электродов, и они не участвуют в развитии ЭГДН.

Поведение СЖК выше порога ЭГДН в зависимости от геометрии слоя приводит к двум эффектам. Это либо поворот доменов, либо динамическое рассеяние света. Причем первый происходит в режиме стационарной ЭГДН и является следствием наклона молекул в слоях, а также смены режима действия электрического поля на СЖК. Это может осуществляться как за счет эффекта Фредерикса, так и при переходе от азимутальной неустойчивости к доменам Капустина—Вильямса. Как правило, поворот доменов осуществляется в области частот выше точки А (область $\omega+$) пересечения U_{1n} и U_{2n} . Для этого необходимо повысить напряжение на ячейке на величину $U_{1n} - U_{2n}$. Величина углов поворота доменов точно совпадает с углом наклона молекул и составляет 57° .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Жидкий кристалл — это одна из форм двумерного состояния вещества, и проведенные выше исследования еще раз это подчеркивают. В смектических жидких кристаллах типа С характер ЭГДН определяется геометрией слоя, а общие закономерности изменения пороговых полей в значительной степени аналогичны двумерным слоям НЖК. Причем однослойное приближение, использованное для интерпретации полученных результатов, является удачным и позволяет качественно понять механизмы неустойчивости при различной геометрии слоя и контролируется геометрией слоя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. 367 с.
2. Frederiks V., Repjeva A. // Acta Phys. USSR. 1936. V. 4. P. 91.
3. Чувывров А.Н., Куватов З.Х. // Кристаллография. 1973. Т. 16. Вып. 2. С. 216.
4. Kelher H., Hatz R. Handbook of liquid crystals. Weinheim. Deer — field. Verlag Chen. 1980. 914 p.
5. Ликин С.А. Структурные превращения в жидких кристаллах. М.: Наука, 1981. 337 с.
6. Горшков М.Н. Эллипсометрия. М.: Советское радио, 1974. 185 с.
7. Orsay liquid crystals group // Phys. Rev. Lett. 1970. V. 25. P. 1642.
8. Чувывров А.Н., Денисова О.А., Гирфанова Ф.М. Физика жидких кристаллов: поверхность. Уфа: Уфимская гос. академия экономики и сервиса, 2009. 324 с.