

07

## **Эффект пространственно-временной синхронизации доменных осцилляций в системе электроконвекции нематических жидких кристаллов**

© В.А. Делев, О.А. Скалдин, Ю.И. Тимиров

Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, Уфа  
E-mail: scala@anrb.ru

*В окончательной редакции 10 февраля 2009 г.*

Методами оптической дифракции и временно́го Фурье-анализа интенсивности прошедшего через ячейку с НЖК света изучена динамика нестационарной псевдогексагональной доменной структуры, которая возникает при электроконвекции в нематических жидких кристаллах в постоянном электрическом поле. Исследован процесс эволюции системы от невозмущенного состояния до режима развитых доменных осцилляций. Обнаружено, что выше порога, электрогидродинамической неустойчивости в планарных слоях НЖК имеет место пространственно-временная синхронизация доменных осцилляций во всем ЖК-образце с образованием сверхрешетки, узлами которой являются источники фазовых волн.

PACS: 61.30-v

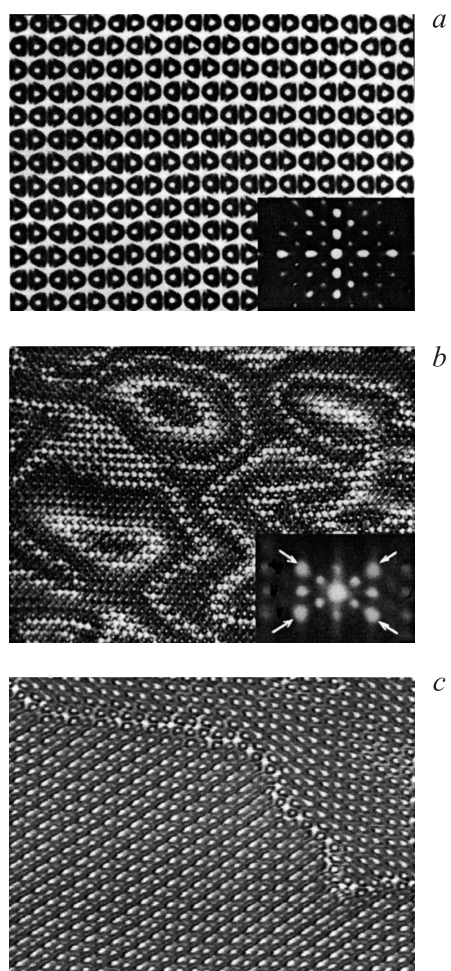
Синхронизация как фундаментальное явление известно достаточно давно в механических колебательных системах [1], однако наибольший интерес представляет ее реализация в распределенных системах осцилляторов [2–4]. В настоящее время хорошо изучены одномерные системы, например состоящие из двух осцилляторов, и автогенераторы [5]. Однако проблемы синхронизации в квазидвумерной системе осцилляторов, механизмы самоорганизации в более сложные структуры, процессы образования и разрушения сверхрешеток остаются до сих пор слабо исследованными [2]. С этой точки зрения жидкие кристаллы являются хорошими модельными средами, в которых реализуется развитие динамической неустойчивости в доменных структурах, например в системе электрогидродинамической (ЭГД) конвекции нематиков [6]. В частности, при исследовании процесса перехода от стационарной доменной

структуры до ее турбулизации выше порога ЭГД-неустойчивости был обнаружен режим, когда доменные осцилляции самоорганизуются в концентрические и спиральные фазовые волны, которые не интерферируют, не отражаются от ЖК-границы и аннигилируют при встрече [7,8]. Исследование этого процесса имеет и практическую значимость для разработок оптических систем преобразователей информации, автогенераторов на жидких кристаллах при управляющем постоянном поле.

Поэтому целью настоящей работы было исследование процесса пространственно-временной синхронизации доменных осцилляций и механизмов их самоорганизации в сверхрешетку, узлами которой являются источники фазовых волн.

Ячейка с НЖК *n*-метоксibenзилиден-*n*-бутиланилином (МББА) помещалась на предметный столик поляризационно-оптического микроскопа Amplival-Pol.U с фотометрической приставкой СФН-10. Подсветка осуществлялась когерентным источником света типа ЛГИ-105. Все исследования проводились при исходной планарной ориентации директора **n**. Для получения однородной ориентации молекул проводящие поверхности подложек натирались в одном направлении. Расстояние между подложками задавалось слюдяными прокладками толщиной  $d = 25 \mu\text{m}$ . Измерения проводились при температуре  $T = 25 \pm 0.10^\circ\text{C}$  в постоянном электрическом поле. Прошедший через ячейку с НЖК поляризованный свет с интенсивностью  $I(t)$ , промодулированный во времени локальным изменением оптической анизотропии  $\langle \Delta n \rangle$ , регистрировался фотоэлектронным умножителем. После чего сигнал оцифровывался и обрабатывался на компьютере.

При достижении порогового напряжения  $U_c = 8 \text{ V}$ , которое не зависит от толщины  $d$  ЖК-слоя, происходит периодическая деформация однородной ориентации поля директора, что приводит к образованию стационарной двумерной в плоскости XOY решетки псевдогексагональных доменов (ПГД) (рис. 1, *a*) [7]. При  $U > U_c$ , когда ПГД-структура теряет устойчивость,  $\langle \Delta n \rangle$  будет также изменяться во времени. Поэтому анализ рассеянного света, прошедшего через достаточно большую площадь ЖК-ячейки, позволяет получить усредненную (интегральную) по пространству информацию о поведении нестационарной доменной структуры. В данной работе исследовались как локальные характеристики доменных осцилляций, так и усредненные по пространству (XOY) ЖК-слоя. Локальные характеристики были получены методом регистрации прошедшего света при помощи зонда, размер которого



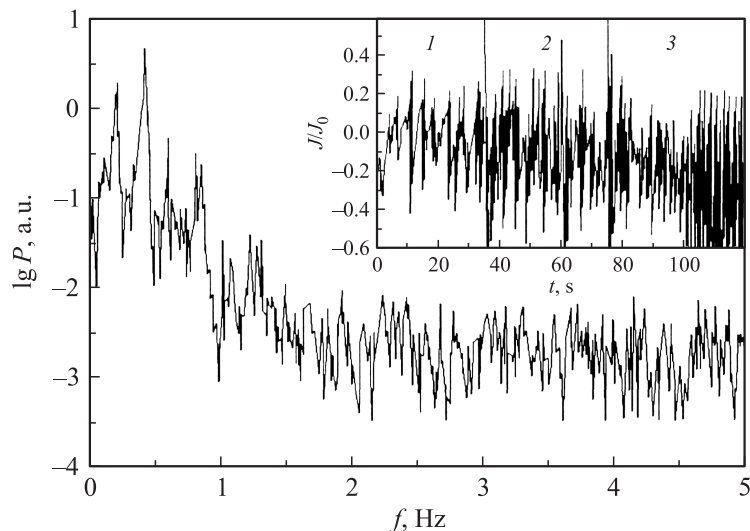
**Рис. 1.** Стационарная ПГД-структура при постоянном напряжении  $U_c = 8 \text{ V}$  (*a*); фазовые волны при постоянном напряжении  $1.4U_c$  (*b*) и осциллирующая ПГД-структура при приложенном к ЖК-слою напряжении типа меандр  $1.4U_c$  (*c*). На вставках показаны соответствующие картины рассеяния.

сравним с размером осциллирующего доменного блока. Усредненные по пространству характеристики получены методом регистрации и анализа интенсивности рефлексов дифракционной картины на нестационарной доменной структуре.

Рассмотрим процесс эволюции НЖК от невозмущенного состояния ( $U = 0 \text{ V}$ ) до режима развитых доменных осцилляций при  $U = 1.4U_c$ , когда постоянное напряжение подается к ЖК-слою скачком. При включении напряжения  $U = 1.4U_c$  вначале образуется ПГД-решетка, которая сразу начинает осциллировать. Через  $t = 20 \text{ s}$  домены объединяются в осциллирующие блоки, размер которых вначале растет. Достигнув критического размера (порядка ширины ЖК-ячейки), что свидетельствует о возникновении когерентных осцилляций, решетка доменов перестает осциллировать как единое целое и разбивается на более мелкие блоки. Это указывает на то, что происходит расфазировка доменных осцилляций во всей системе, которая приводит к тому, что соседние блоки начинают осциллировать в противофазе с одновременной генерацией фазовых волн (рис. 1, *b*). Таким образом, в процессе перехода происходит перестройка от синфазно осциллирующих доменов к блокам, которые продолжают осциллировать синхронно, но с противоположной фазой. Т.е. генерация фазовых волн начинается, когда сдвиг фаз между соседними осциллирующими блоками достигает величины  $\Delta\varphi_{ij} = \pi$ .

Временная реализация и спектр мощности такого переходного процесса представлены на рис. 2. Как следует из вставки на рис. 2, реализацию переходного процесса можно разбить на три участка: участок 1 соответствует несогласованным осцилляциям доменов, участок 2 — образованию доменных блоков и их расфазировке, участок 3 — частотной синхронизации волновых источников во всей системе, что также подтверждается наличием соответствующей спектральной линии в спектре мощности интенсивности света, рассеянного нестационарной ПГД-структурой (рис. 2). По-видимому, причиной расфазировки является так называемый „шум“ (ЭГД-флуктуации, дефекты на подложках и т.д.), который всегда присутствует в реальных системах.

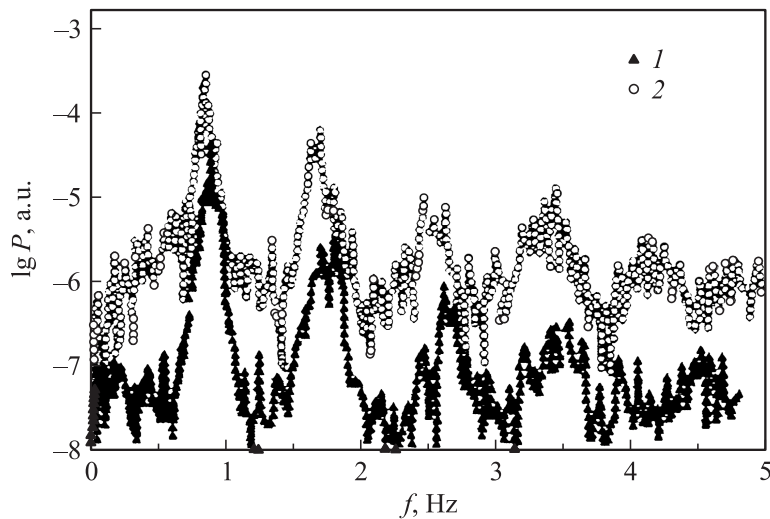
Для определения условий реализации эффекта синхронизации экспериментально необходимо оценить фазы и частоты по измеряемым данным. Если частоты осцилляторов равны и сдвиг фаз равен 0 или постоянен, то система совершает синхронные (синфазные или противофазные) колебания [1]. Для исследования локальных частотных



**Рис. 2.** Временная реализация (на вставке) и спектр мощности переходного процесса от невозмущенного состояния до режима генерации фазовых волн, когда приложенное к ЖК-слою напряжение подается ступенькой от  $U = 0$  V до  $1.4U_c$ .

характеристик были измерены спектры мощности прошедшего света, промодулированного осцилляциями отдельных доменных блоков (когда размер зонда сравним с размером блока) в различных областях ЖК-ячейки. Было обнаружено, что частота осцилляций различных доменных блоков во всей ПГД-структуре практически одинакова. Типичный спектр мощности уже стабилизировавшихся осцилляций отдельного блока показан на рис. 3, кривая 1. Несмотря на то что у доменов, образующих блок, фаза осцилляций одна и та же, шум также присутствует и в спектрах мощности осцилляций отдельных блоков.

Для экспериментального наблюдения факта пространственной синхронизации осцилляций доменных блоков по частоте было исследовано рассеяние света всей осциллирующей ПГД-структурой методом дифракции. Установлено, что в режиме генерации фазовых волн при  $U = 1.4U_c$  интенсивность диагональных пар рефлексов дифракционной картины  $[11]$  и  $[\bar{1}\bar{1}]$  или  $[\bar{1}1]$  и  $[1\bar{1}]$  периодически меняется (см. рис. 1, *b*, вставка). Это связано с азимутальными осцилляциями [9] доменов



**Рис. 3.** Спектры мощности локальных осцилляций отдельного доменного блока (1) и усредненных по пространству доменных осцилляций во всей ПГД-структуре (2) при  $1.4U_c$ .

в блоках вдоль кристаллографических направлений исходной ПГД-структуры. Такие периодические колебания интенсивности рефлексов возможны лишь в том случае, когда азимутальные осцилляции доменов в блоках происходят согласованно во всей осциллирующей ПГД-структуре, что в свою очередь говорит о не только их временной, но и пространственной синхронизации.

Другим подтверждением эффекта пространственно-временной синхронизации является полная идентичность локального спектра мощности осцилляций отдельного доменного блока (рис. 3, кривая 1) и усредненного по пространству временного спектра мощности колебаний одного из рефлексов дифракционной картины (размер зонда сравним с размером рефлекса) (рис. 3, кривая 2).

Для получения усредненной характеристики разброса частот осциллирующих блоков во всей ПГД-структуре вычислялась разность эффективной ширины спектра мощности, усредненного по пространству, и эффективной ширины спектра осциллирующего отдельного блока.

Эффективная ширина спектра мощности вычислялась по формуле [10]:

$$\Delta f_{eff} = \frac{1}{P_{max}} \int P(f) df.$$

В частности, при  $1.4U_c$  данная величина для отдельного блока равна  $\Delta f_{bl} \sim 0.15$  Hz, а усредненная для всей системы осциллирующих блоков  $\Delta f_{GP} \sim 0.26$  Hz. Таким образом, разница двух этих величин  $\langle \Delta f \rangle = \Delta f_{GP} - \Delta f_{bl} = 0.11$  Hz может служить усредненной количественной характеристикой разброса частот осцилляций источников фазовых волн, который возникает из-за присутствия в системе как внутренних (ЭГД-флуктуации директора  $\mathbf{n}$ ), так и внешних шумов (температуры).

Необходимо подчеркнуть, что факт синхронизации колебаний в системах, состоящих из связанных осцилляторов, известен давно, однако пространственно-временная синхронизация доменных осцилляций в ЖК обнаружена впервые.

Окуда (Okuda) [11] для одномерного случая численно показал, что если связь между идентичными (т.е. имеющими одинаковые собственные частоты) фазовыми осцилляторами описывается некоторой обобщенной функцией связи  $q(\varphi)$ , то это может привести к образованию нескольких кластеров. При этом у осцилляторов, формирующих кластер, фаза одна и та же, а между различными кластерами существует постоянный сдвиг по фазе. В нашем случае кластером является осциллирующий доменный блок, в котором фаза осцилляций доменов одна и та же, а сдвиг фаз между соседними блоками равен  $\Delta\phi = \phi_j - \phi_k = \pi$ . Поэтому предложенная в [11] модель вполне пригодна и для нашего случая:

$$\frac{d\phi_k}{dt} = \omega_0 + \frac{\varepsilon}{N} \sum_{j=1}^N q(\phi_j - \phi_k),$$

где  $\omega_0$  — собственная частота осцилляторов,  $\varepsilon$  — параметр, определяющий силу связи,  $N$  — число взаимосвязанных осцилляторов,  $\Delta\phi = \phi_j - \phi_k$  — сдвиг фаз между соседними осцилляторами.

Рассмотрим теперь случай, когда к ЖК-слою приложено электрическое поле типа меандр. Варьируя скважностью меандра, удалось пронаблюдать синхронизацию доменных осцилляций как по частоте, так и по фазе во всем ЖК-образце. В этом случае генерация и распространение фазовых волн не наблюдаются, и решетка доменов

осциллирует как единое целое (рис. 1, *c*). Такие синхронные осцилляции могут существовать достаточно длительное время (порядка  $t = 5-6$  h). Однако следует отметить, что продолжает существовать граница между областями ПГД-структуры, где фаза доменных осцилляций отличается на  $\pi$ . С одной стороны, по-видимому, это связано с равновероятным возникновением осцилляций доменов (в один и тот же момент времени) как вдоль одного кристаллографического направления, так и вдоль другого. С другой стороны, экспериментально не удастся получить идеальную ПГД-структуру без дефектов, поэтому, как показывает эксперимент, такая граница возникает рядом с дефектами исходной ПГД-структуры. В целом же нестационарную ПГД-структуру можно представить как континуум идентичных автоосцилляторов с диффузионными связями. Для наблюдения фазовых волн достаточно создать сдвиг по начальным фазам колебаний вдоль кристаллографических направлений такой решетки. Каждый такой автоосциллятор будет выходить из состояния равновесия через один и тот же промежуток времени, но моменты выхода из состояния равновесия сдвинуты для соседних элементов. Взаимодействие между автоколебательными элементами приводит к появлению частотной дисперсии фазовых волн от их пространственного периода, влияющей на процесс пространственно-временной синхронизации доменных осцилляций по всем ЖК-образце, и образованию сверхрешетки, узлами которой являются источники фазовых волн.

Таким образом, в данной работе показано, что в интервале напряжений от  $1.2 U_c$  и до  $1.6 U_c$  существует режим пространственно-временной противофазной синхронизации источников фазовых волн. При этом усредненная расстройка по частоте составляет  $\langle \Delta f \rangle \sim 0.11$  Hz при  $1.4 U_c$ . Когда к ЖК-слою приложено напряжение типа меандр, наблюдается синфазная синхронизация доменов во всем ЖК-слое, а расстройка по частоте отсутствует.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 08-02-97008.

## Список литературы

- [1] Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Физматгиз, 1959. С. 717–727.
- [2] Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. Гл. 11. С. 335–350.



- [3] *Блехман И.И.* // Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. С. 120–131.
- [4] *Блехман И.И.* // Синхронизация в природе и технике. М.: Наука, 1981. С. 78–95.
- [5] *Малахов А.Н.* Флуктуации в автоколебательных системах. М.: Наука, 1968. Гл. 9. С. 343–427.
- [6] *Пикин С.А.* // Структурные превращения в жидких кристаллах. М.: Наука, 1981. С. 275.
- [7] *Delev V.A., Scaldin O.A., Chuvyrov A.N.* // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1992. V. 215. P. 179–186.
- [8] *Delev V.A., Scaldin O.A., Chuvyrov A.N.* // Liq. Cryst. 1992. V. 12. N 3. P. 441–448.
- [9] *Батыришин Э.С., Делев В.А., Скалдин О.А.* // Кристаллография. 1999. Т. 44. С. 548–550.
- [10] *Баскаков С.И.* Радио-технические цепи и сигналы. М.: Высш. школа, 1988. 444 с.
- [11] *Okuda K.* // Physica D. 1993. V. 63. P. 424–436.