

06.2;09.3

## **Эффект фазовой синхронизации гидродинамической и ориентационной мод при электроконвекции в нематическом жидком кристалле**

© Э.С. Батыршин, А.П. Крехов, О.А. Скалдин, В.А. Делев

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

Поступило в Редакцию 14 апреля 2014 г.

Экспериментально исследована пространственно-временная динамика осциллирующих электроконвективных структур в нематическом жидком кристалле при комбинированном воздействии переменного и постоянного напряжений. Обнаружено, что увеличение постоянной компоненты приложенного напряжения приводит к синхронизации гидродинамической моды с ориентационной твист-модой директора. Определены параметр синхронизации мод и сдвиг фаз между ними в зависимости от постоянной компоненты приложенного напряжения. Полученные результаты свидетельствуют в пользу флексоэлектрического механизма синхронизации.

Эффекты синхронизации, как стремление к достижению упорядоченности и согласованности в поведении объектов, наблюдаются в системах различной природы: физических, химических, биологических, социальных и др. Несмотря на различие в свойствах систем, закономерности синхронизации имеют общие свойства и их исследования носят междисциплинарный характер [1].

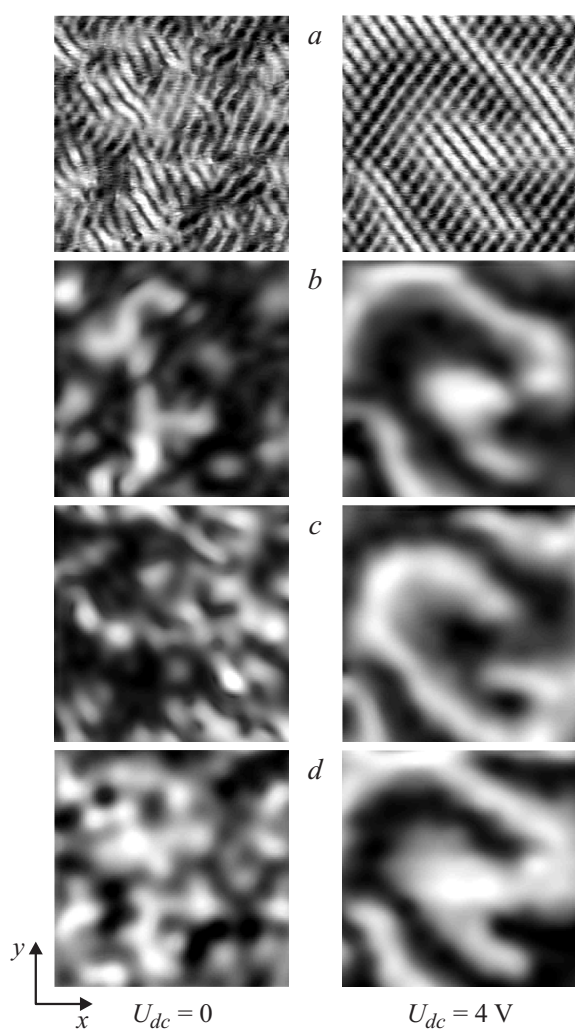
Привлекательной модельной средой для анализа этих закономерностей являются электроконвективные структуры в нематических жидких кристаллах (НЖК), возникающие при приложении к слою НЖК электрического поля [2]. Анизотропия физических свойств НЖК обеспечивает целый ряд дополнительных механизмов неустойчивостей и контрольных параметров по сравнению с изотропными системами. Характерной особенностью электроконвекции в НЖК выше порога образования конвективных роллов является большое многообразие вторичных неустойчивостей [3]. Одним из наиболее важных механизмов,

определяющих развитие электроконвективных структур в закритической области, является возбуждение однородной (в плоскости слоя) твист-моды директора [4]. Взаимодействие твист-моды с конвективной (гидродинамической) модой роллов может приводить к развитию локальных осцилляций между двумя вырожденными состояниями наклонных роллов (так называемых зиг- и заг-роллов) [4]. Динамика таких осцилляций при электроконвекции в переменном электрическом поле представляет собой типичные картины пространственно-временного хаоса [5]. Напротив, при воздействии постоянного напряжения осцилляции синхронизируются, что проявляется в генерации фазовых волн: бегущих, спиральных и концентрических [6,7]. Ранее были описаны некоторые свойства зиг-заг-осцилляций в постоянном электрическом поле [8–10], однако механизм их синхронизации остается практически не изученным. В данной работе для исследования роли твист-моды и выявления механизма пространственно-временной синхронизации зиг-заг-осцилляций использовалось комбинированное воздействие переменного и постоянного напряжений, приложенных к слою НЖК. Суперпозиция переменного и постоянного напряжений приводит, в частности, к нарушению базовой симметрии электрогидродинамических уравнений, использующихся для описания электроконвективных структур [3,4]. Кроме того, наличие постоянной составляющей проложенного к слою НЖК напряжения значительно усиливает роль флексоэлектрического эффекта в образовании пространственно-периодических структур [11].

Экспериментальная ячейка представляла собой плоский конденсатор с прозрачными стеклянными обкладками, на внутреннюю поверхность которых нанесен проводящий слой  $\text{SnO}_2$ . Начальная планарная ориентация директора ( $\mathbf{n}_0 \parallel \mathbf{x}$ ) обеспечивалась натиранием. Толщина зазора между обкладками составляла  $d = (25 \pm 0.3) \mu\text{m}$ . Ячейка, заполненная МББА (ТСІ Europe), помещалась в термокамеру Instec и стабилизировалась при температуре  $T = (28 \pm 0.05)^\circ\text{C}$ , соответствующей нематической фазе. Визуализация изображений в плоскости слоя  $x$ – $y$  осуществлялась с помощью поляризационного оптического микроскопа Zeiss Axio Imager, оснащенного CCD-камерой PCO VX44. Применялась схема наблюдений, чувствительная к твист деформации директора [12]. К ячейке прикладывалось переменное напряжение прямоугольной формы со смещением относительно нуля средним значением  $U = U_{ac} \text{sign}[\sin(\omega t)] + U_{dc}$ . Частота переменного напряжения

$\omega/2\pi = 20\text{ Hz}$  соответствовала проводящему режиму электроконвекции. Для каждой комбинации  $U_{ac}$ ,  $U_{dc}$  регистрировались последовательности изображений  $I_0(x, y, t)$  с пространственным разрешением  $512 \times 512$  точек, с 256 уровнями серого цвета, с частотой 25 fps и длиной 1024 кадра. Полученные таким образом последовательности изображений подвергались пространственной демодуляции [13] для оценки амплитуд активных мод: гидродинамических зиг-заг-мод  $A_{zig}(x, y, t)$ ,  $A_{zag}(x, y, t)$  и ориентационной твист-моды директора  $A_{tw}(x, y, t)$ . После демодуляции, для каждой моды восстанавливалась фаза осцилляций  $\varphi_{zig}(x, y, t)$ ,  $\varphi_{zag}(x, y, t)$ ,  $\varphi_{tw}(x, y, t)$  при помощи метода, основанного на применении вейвлет-преобразования [14].

При воздействии переменного напряжения с амплитудой  $U_{ac} = 6\text{ V}$  ( $U_{dc} = 0$ ) в слое МББА наблюдается электроконвективная неустойчивость в виде хорошо известных „нормальных“ роллов (ориентированы перпендикулярно начальной ориентации директора  $\mathbf{n}_0$ ). С увеличением приложенного переменного напряжения наблюдается следующая последовательность переходов: сопровождающаяся образованием наклонных роллов зиг-заг-неустойчивость  $\rightarrow$  переход к „анормальным“ роллам  $\rightarrow$  „варикозная“ неустойчивость. Данный сценарий переходов был предсказан в рамках расширенного нелинейного анализа стандартной модели электрогидродинамики НЖК, учитывающего активацию однородной твист-моды [4]. Дальнейшее увеличение переменного напряжения до  $U_{ac} = 8.5\text{ V}$  приводит к возникновению двумерной структуры с развитыми зиг-заг-осцилляциями (рис. 1, *a*, слева). На изображениях рис 1, *a* хорошо видны наклонные полосы, соответствующие зиг- и заг-роллам. Кроме того, различимы крупномасштабные светлые и темные области, соответствующие разным знакам однородной твист-моды директора. Увеличение постоянной составляющей  $U_{dc}$  (при соответствующем уменьшении  $U_{ac}$  так, чтобы среднеквадратичное напряжение  $U_{rms} = \sqrt{U_{ac}^2 + U_{dc}^2} = 8.5\text{ V}$  оставалось постоянным) выше некоторого порогового значения приводит к существенному изменению картины осцилляций (рис. 1, *a*, справа). Размеры областей, занятых роллами одного типа (зиг или заг), значительно увеличиваются, что явно отражается в изменении характерных пространственных масштабов демодулированных амплитуд (рис. 1, *c-d*). Ранее нами было установлено, что рост пространственной упорядоченности в системе сопровождается частотной синхронизацией осцилляций [15].



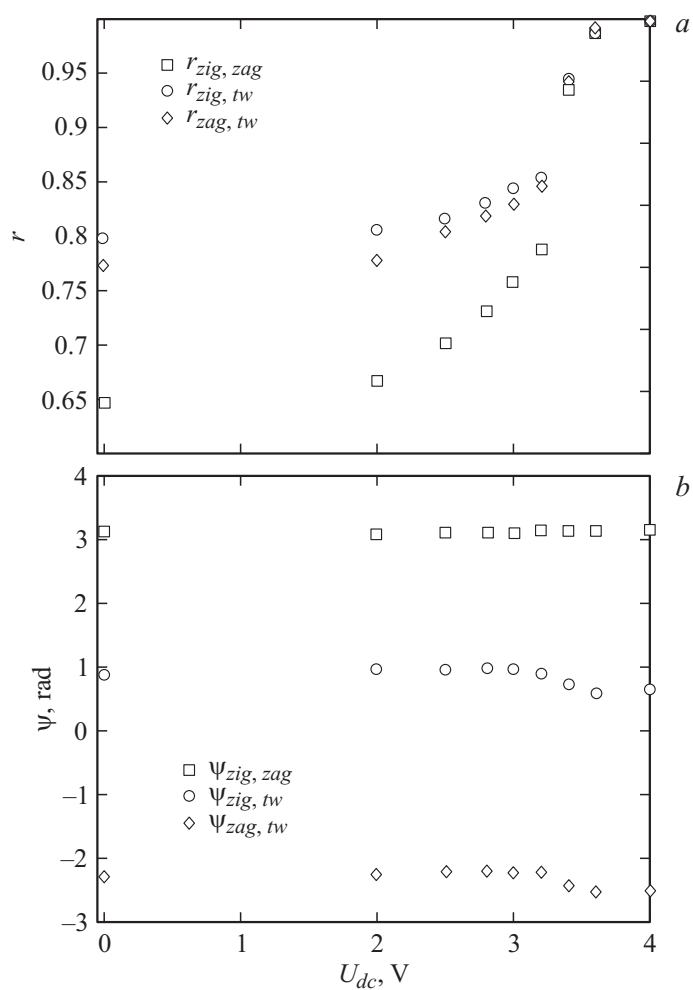
**Рис. 1.** Характерные картины электроконвекции ( $a$ ) и соответствующие им демодулированные амплитуды зиг- ( $b$ ), заг- ( $c$ ) и твист- ( $d$ ) мод при  $U_{dc} = 0$  (слева) и  $U_{dc} = 4 \text{ V}$  (справа). Размер показанных структур  $0.45 \times 0.45 \text{ mm}$ ,  $U_{rms} = 8.5 \text{ V}$ . Более светлые области соответствуют большей амплитуде.

Сравнение изображений структур на рис. 1, *a* слева и справа показывает, что при  $U_{dc} = 0$  в области однородного твиста одного знака могут существовать роллы как зиг-, так и заг-типа, что говорит о слабой корреляции локальной динамики гидродинамических мод роллов и однородной твист-моды директора. В противоположность этому при  $U_{dc} = 4$  В в областях с твист-модой одного знака существуют роллы только одного типа, что говорит о синхронном поведении гидродинамической моды роллов и однородной твист-моды директора. Осцилляции упорядочиваются в плоскости электроконвективной структуры, и происходит генерация фазовых волн аналогично ситуации, наблюдавшейся при воздействии только постоянного напряжения [6].

Для количественного описания синхронизации активных мод был вычислен стандартный параметр синхронизации зиг-заг-мод  $r_{zig,zag}$  и сдвиг фаз  $\psi_{zig,zag}$  между ними [1]:

$$r_{zig,zag} \exp\{i\psi_{zig,zag}\} = \langle \exp\{i[\psi_{zig}(x, y, t) - \psi_{zag}(x, y, t)]\} \rangle_{x,y,t},$$

где  $\langle \dots \rangle_{x,y,t}$  означает усреднение по пространству и времени. Аналогичным образом были определены соответствующие параметры синхронизации для других пар мод: зиг-твист ( $r_{zig,tw}$ ,  $\psi_{zig,tw}$ ) и заг-твист ( $r_{zag,tw}$ ,  $\psi_{zag,tw}$ ). Параметр  $r = 1$ , когда моды осциллируют в состоянии полной фазовой синхронизации с постоянным сдвигом фаз. Если же сдвиг фаз между модами меняется равномерно от 0 до  $2\pi$ , в этом случае имеем  $r = 0$ . Средний сдвиг фаз между модами определяется параметром  $\psi$ . На рис. 2 показана зависимость параметров синхронизации и сдвига фаз при изменении постоянной составляющей приложенного напряжения  $U_{dc}$ . При воздействии только переменного напряжения ( $U_{dc} = 0$ ) гидродинамические зиг-, заг-моды осциллируют в противофазе ( $\psi_{zig,zag} \approx \pi$ ). Динамика мод не синхронизирована полностью, так как  $r < 1$ . При этом степень синхронности зиг- и заг-мод между собой меньше величины их синхронизации с твист-модой ( $r_{zig,zag} < r_{zig,tw}, r_{zag,tw}$ ), что подтверждает теоретические представления о том, что взаимодействие между зиг- и заг-модами осуществляется посредством твист-моды [4]. Увеличение постоянной составляющей  $U_{dc} > U_{dc}^{sync} \approx 3.2$  В приводит к росту коэффициента синхронизации мод зиг-заг, зиг-твист и заг-твист до значения  $r = 1$ , т.е. локальная динамика мод становится полностью синхронизированной с постоянным сдвигом фаз между ними.



**Рис. 2.** Параметр синхронизации мод (a) и сдвиг фаз между ними (b) при различных значениях постоянной составляющей напряжения  $U_{dc}$ .

Осцилляции гидродинамических зиг-заг-мод остаются противофазны, а фаза твист-моды по отношению к зиг-заг-осцилляциям незначительно изменяется.

Таким образом, при увеличении постоянной компоненты в приложенном к слою НЖК комбинированном напряжении обнаружен эффект фазовой синхронизации локальной динамики гидродинамических зигзаг-мод и однородной твист-моды директора в осциллирующей электроконвективной структуре. Тот факт, что эффект связан с воздействием постоянного напряжения, позволяет связать синхронизацию с действием механизма флексополяризации, поскольку флексоэлектрический отклик НЖК линеен по полю [2], а следовательно, усредненный за период переменного поля флексоэлектрический момент сил, действующий на директор, равен нулю при  $U_{dc} = 0$ . Наличие же постоянной компоненты  $U_{dc} \neq 0$  в приложенном к слою НЖК напряжении должно приводить к дополнительной твист-деформации поля директора [11]. В пользу флексоэлектрического механизма синхронизации свидетельствует также тот факт, что при воздействии только постоянного напряжения  $U_{dc} \approx U_{dc}^{sync} (U_{ac} = 0)$  в изучаемой системе наблюдаются продольные домены, ориентированные преимущественно вдоль исходной ориентации директора. С теоретической точки зрения для дальнейшего изучения механизма синхронизации и роли флексоэффекта необходимо провести нелинейный анализ уравнений электрогидродинамики НЖК с учетом флексополяризации. В то же время исследуемая электроконвективная структура может быть использована как легко воспроизводимая модельная система с управляемым механизмом синхронизации, для описания которой могут быть опробованы универсальные феноменологические модели, как, например, модель связанных осцилляторов Курамото [16] и другие.

## Список литературы

- [1] Пиковский А., Розенблюм М., Куртс Ю. Синхронизация. Фундаментальное нелинейное явление. М.: Техносфера, 2003. С. 19.
- [2] де Жен П. Физика жидких кристаллов. М.: Мир, 1977. С. 221.
- [3] Kramer L., Pesch W. // Pattern Formation in Liquid Crystals / Eds. A. Buka, L. Kramer. New York: Springer, 1996. P. 221.
- [4] Plaut E., Pesch W. // Phys. Rev. E. 1999. V. 59. P. 1747.
- [5] Dennin M. // Phys. Rev. E. 2000. V. 62. P. 6780.
- [6] Delev V.A., Scaldin O.A., Chuvyrov A.N. // Liq. Cryst. 1992. V. 12. P. 441.
- [7] Делев В.А., Скалдин О.А., Чувывров А.Н. // Кристаллография. 1992. Т. 37. С. 1575.

- [8] Батыршин Э.С., Делев В.А., Чувывров А.Н. // Кристаллография. 1999. Т. 44. С. 548.
- [9] Delev V.A., Batyrshin E.S., Scaldin O.A., Chuvyrov A.N. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1999. V. 329. P. 499.
- [10] Делев В.А., Скалдин О.А., Батыршин Э.С., Аксельрод Е.Г. // ЖТФ. 2011. Т. 81. С. 11.
- [11] Krekhov A., Pesch W., Buka A. // Phys. Rev. E. 2011. V. 83. P. 051706.
- [12] Amm H., Stannarius R., Rossberg A.G. // Physica D. 1999. V. 126. P. 171.
- [13] Dennin M., Cannell D.S., Ahlers G. // Phys. Rev. E. 1998. V. 57. P. 638.
- [14] Lachaux J.-P. et al. // Human Brain Mapping. 1999. V. 8. P. 194.
- [15] Батыршин Э.С., Крехов А.П., Скалдин О.А., Делев В.А. // ЖЭТФ. 2012. Т. 141. В. 6. С. 1200–1205.
- [16] Acebron J.A. et al. // Rev. Mod. Phys. 2005. V. 77. P. 137.