

Синхронизация гидродинамических и ориентационной мод при электроконвекции в нематическом жидком кристалле¹

Батыршин Э.С., Делев В.А.

Институт физики молекул и кристаллов УНЦ РАН, Уфа

Экспериментально исследована пространственно-временная динамика осциллирующей электроконвективной структуры в нематическом жидком кристалле при совместном воздействии переменного и постоянного напряжений. Обнаружено, что увеличение постоянной составляющей напряжения приводит к синхронизации гидродинамических мод с ориентационной твист модой директора. Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что синхронизация связана с действием флексоэлектрического механизма.

1. Введение

Электроконвекция в нематических жидких кристаллах (НЖК) является уникальной модельной средой для изучения универсальных аспектов образования и эволюции пространственно-временного порядка в неравновесных системах различной природы [1, 2]. НЖК представляют собой анизотропную жидкость, характеризующуюся ориентационным упорядочением молекул удлинённой формы. Преимущественное направление ориентации молекул НЖК описывается полем директора \mathbf{n} [3]. Электроконвективная неустойчивость возникает при приложении к слою НЖК, заключённому между проводящими подложками, напряжения, превышающего некоторое критическое значение. При этом в пороге образуется периодическая система полос, представляющих собой пространственно-периодическую модуляцию поля директора и скорости течения НЖК (электроконвективные роллы). Непрерывная активность в исследованиях электроконвективных структур обусловлена необходимостью изучения возможных механизмов самоорганизации в сложных анизотропных системах. Относительная простота изменения контрольных параметров (амплитуда и частота приложенного напряжения), малые времена релаксации и высокий оптический контраст возникающих структур вследствие оптической анизотропии НЖК дают весомые преимущества при экспериментальных исследованиях электроконвекции по сравнению с другими системами.

Стандартная модель электроконвекции [3, 4] базируется на представлениях Карра [5] и Хельфриха [6] об электроконвективном механизме в анизотропных жидкостях. В рамках этой модели были рассчитаны пороговые характеристики неустойчивостей, имеющие хорошее совпадение с экспериментальными результатами. Сценарий неустойчивости определяется знаками анизотропии диэлектрической проницаемости ϵ_a и проводимости σ_a и исходным распределением поля директора [7, 8]. Обнаружение режима так называемой «нестандартной» электроконвекции в НЖК с $\sigma_a < 0$ [8–10], при котором конвективный механизм Карра–Хельфриха не работает, инициировало дальнейшее развитие теоретических моделей. Нестандартная электроконвекция получила свое объяснение в рамках модели, учитывающей вклад флексополяризации [11, 12], и дающей хорошее количественное согласие с экспериментальными пороговыми характеристиками. Существенное влияние флексополяризации на электроконвекцию было продемонстрировано ранее также и для НЖК с $\sigma_a > 0$ [13, 14].

В отличие от порога образования электроконвективных роллов, который к настоящему времени достаточно детально исследован экспериментально и теоретически, поведение системы в закритической области гораздо менее изучено. Характерной особенностью электроконвекции в НЖК выше порога образования конвективных роллов является большое многообразие вторичных неустойчивостей и сценариев эволюции неравновесных структур, обусловленное различными нелинейными взаимодействиями гидродинамических и ориентацион-

¹Работа выполнена при поддержке АН РБ (грант № 3.3.5.2-2011).

ных мод. Одним из наиболее важных механизмов, определяющих развитие вторичных неустойчивостей в закритической области, является возбуждение однородной (в плоскости слоя) твист моды директора [15, 16]. Кроме того, взаимодействие твист моды с конвективными модами роллов в переменном электрическом поле может приводить к развитию локальных осцилляций между двумя вырожденными состояниями наклонных роллов (так называемых «зиг» и «заг» роллов) [16]. Динамика таких осцилляций представляет собой типичные картины пространственно-временного хаоса [17].

При воздействии постоянного электрического поля развитие электроконвекции в закритической области может приводить к формированию двумерной структуры, представляющей собой суперпозицию зиг и заг роллов [18, 19]. Потеря устойчивости такой структуры также ведет к развитию зиг–заг осцилляций. Их отличительной особенностью является фазовая синхронизация, проявляющаяся в генерации фазовых волн: бегущих, спиральных и концентрических [20, 21]. Ранее были описаны некоторые свойства зиг–заг осцилляций в постоянном электрическом поле [22–24], однако механизм их возникновения остается практически не изученным.

В данной работе изучался режим развитых зиг–заг осцилляций при электроконвекции в планарном слое НЖК. Для исследования роли твист моды и выявления механизма пространственно-временной синхронизации зиг–заг осцилляций использовалось комбинированное воздействие переменного и постоянного напряжений на слой НЖК.

2. Методика эксперимента

Ячейка представляла собой плоский конденсатор с прозрачными стеклянными обкладками, на внутреннюю поверхность которых был нанесен проводящий слой SnO_2 . Механическое натирание подложек обеспечивало планарную ориентацию директора ($\mathbf{n}_0 \parallel \hat{\mathbf{x}}$), которая контролировалась методом вращения кристалла. Ячейка, заполненная МББА (ТСІ Europe), помещалась в термокамеру Instec и располагалась на столике поляризационного оптического микроскопа Zeiss Axio Imager. Толщина слоя НЖК, определенная интерферометрическим методом, составляла $d = (25 \pm 0.3)$ мкм. Исследования проводились при температуре $T = (28 \pm 0.05)^\circ\text{C}$. Интенсивность прошедшего через ячейку света регистрировалась CCD-камерой PCO VX44 в плоскости слоя ($x - y$) размером $0.9 \text{ мм} \times 0.9 \text{ мм}$ с пространственным разрешением 512×512 точек, частотой выборки 25 Гц и 256 уровням серого цвета. Полученные изображения обрабатывались на ком-

пьютере. Применялась схема наблюдений, чувствительная к твист деформации директора: поляризатор перпендикулярен начальной ориентации \mathbf{n}_0 , анализатор параллелен \mathbf{n}_0 , между ячейкой НЖК и анализатором установлена фазовая пластинка $\lambda/4$ под углом 45° к \mathbf{n}_0 [25]. К ячейке прикладывалось переменное напряжение прямоугольной формы со смещенным положением среднего значения

$$U = U_{ac} \text{sign}[\sin(\omega t)] + U_{dc}.$$

В качестве источника напряжения использовался цифро-аналоговый преобразователь L-card-1250, сопряженный с усилителем Tabor-9200. Частота переменного напряжения $\omega/2\pi = 20$ Гц соответствовала режиму проводимости. Для каждой комбинации U_{ac} , U_{dc} регистрировались последовательности изображений $I_0(x, y, t)$ длиной 1024 кадра. Каждое изображение последовательности нормировалось на фоновое, полученное при нулевом приложенном напряжении:

$$I(x, y, t) = I_0(x, y, t)/I_{BG}(x, y).$$

Полученные таким образом последовательности изображений подвергались пространственной демодуляции для оценки амплитуд активных мод: гидродинамических зиг, заг мод $A_{zig}(x, y, t)$, $A_{zag}(x, y, t)$ и ориентационной твист моды директора $A_{tw}(x, y, t)$. Техника демодуляции детально описана в работах [26, 27]. После демодуляции для каждой моды была восстановлена фаза осцилляций $\phi_{zig}(x, y, t)$, $\phi_{zag}(x, y, t)$, $\phi_{tw}(x, y, t)$. Для этого был использован метод, основанный на применении вейвлет-преобразования [27, 28].

3. Результаты и обсуждение

При воздействии переменного напряжения с амплитудой $U_{ac} = 6 \text{ В}$ ($U_{dc} = 0$) 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: зиг–заг неустойчивость, сопровождающаяся образованием наклонных роллов \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 [15, 16].

Дальнейшее увеличение напряжения приводит к возникновению в системе двумерной зиг–заг структуры и при $U_{ac} = 8.5 \text{ В}$ наблюдаются разви-

тые зиг-заг осцилляции (рис. 1(а), слева). На изображениях рис. 1(а) хорошо видны наклонные полосы, соответствующие зиг и заг роллам. Кроме того, различимы крупномасштабные светлые и темные области, соответствующие разным знакам однородной твист моды директора.

В исследованиях поведения системы при комбинированном воздействии переменного и постоянного напряжений изменения U_{ac} и U_{dc} производились таким образом, чтобы среднеквадратичное напряжение $U_{rms} = \sqrt{U_{ac}^2 + U_{dc}^2}$ оставалось неизменным. При $U_{rms} = 8.5$ В, что соответствует режиму развитых зиг-заг осцилляций при воздействии переменного напряжения, увеличение постоянной составляющей U_{dc} выше некоторого порогового значения приводит к существенному изменению картины осцилляций (рис. 1(а), справа). Размеры областей, занятых роллами одного типа (зиг или заг) значительно увеличиваются, что явно отражается в изменении характерных пространственных масштабов демодулированных амплитуд мод (рис. 1(б-г)). Было установлено, что с ростом пространственной упорядоченности в системе наступает частотная синхронизация осцилляций. Результаты изучения пространственно-временных корреляций при увеличении U_{dc} детально представлены в работе [29], где показано, что при превышении некоторого порога $U_{dc}^{sync} \approx 3.2$ В длины корреляций в системе увеличиваются на порядок.

Более того, сравнение изображений структуры на рис. 1(а) 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 конвективных мод роллов и однородной твист моды директора. При $U_{dc} = 4$ В в областях с твист модой одного знака существуют роллы только одного типа, что говорит о синхронном поведении конвективных мод роллов и однородной твист моды. Осцилляции упорядочиваются в плоскости структуры и происходит генерация фазовых волн, аналогично ситуации, наблюдавшейся при воздействии только постоянного напряжения [20]. Для количественного описания синхронизации активных мод был вычислен стандартный параметр синхронизации [30]:

$$r_{zig,zag} e^{i\psi_{zig,zag}} = \left\langle e^{i[\phi_{zig}(x,y,t) - \phi_{zag}(x,y,t)]} \right\rangle_{x,y,t},$$

где $\langle \dots \rangle_{x,y,t}$ означает усреднение по пространству и времени. Аналогичным образом был определен параметр синхронизации для других пар мод. Параметр $r = 1$, когда моды осциллируют с постоянным сдвигом фаз, который определяется параметром ψ . В обратном случае, когда разность фаз между модами меняется равномерно от 0 до 2π ,

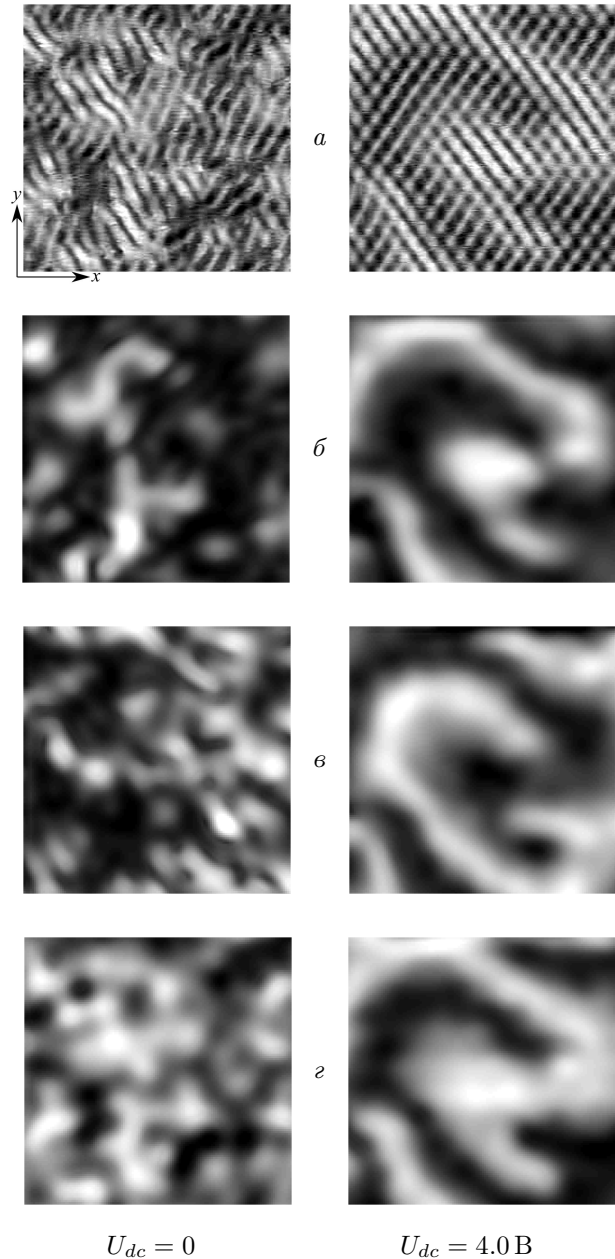


Рис. 1. Характерные картины электроконвекции (а) и соответствующие им демодулированные амплитуды зиг (б), заг (в) и твист (г) мод при различных значениях U_{dc} . Размер показанных структур $0.45 \text{ мм} \times 0.45 \text{ мм}$, $U_{rms} = 8.5$ В. Более светлые области соответствуют большей амплитуде

$r = 0$. На рис. 2 показана зависимость параметров синхронизации и сдвига фаз мод при изменении постоянной составляющей напряжения U_{dc} . При действии только переменного напряжения ($U_{dc} = 0$) гидродинамические зиг, заг моды осциллируют в противофазе ($\psi_{zig,zag} \approx \pi$), а фаза твист моды занимает некоторое промежуточное положение. Ди-

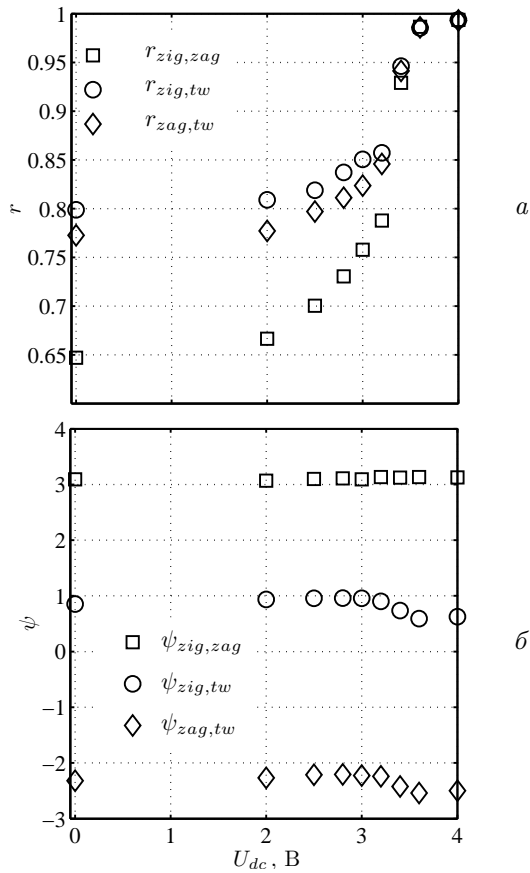


Рис. 2. Параметр синхронизации мод (а) и сдвиг фаз между ними (б) при различных значениях постоянной составляющей напряжения U_{dc}

намика мод не синхронизирована полностью, т.к. $r < 1$. При этом величина синхронизации зиг и заг мод между собой меньше величины их синхронизации с твист модой, что подтверждает теоретические представления о том, что связь между зиг и заг модами опосредована через твист моду [16]. Увеличение постоянной составляющей $U_{dc} > U_{dc}^{sync} \approx 3.2$ В приводит к росту коэффициента синхронизации до значения $r = 1$, т.е. локальная динамика мод становится полностью синхронизированной с постоянным сдвигом фаз. Осцилляции гидродинамических мод также противофазны, а фаза твист моды немного изменяется при том же пороговом значении U_{dc} .

4. Заключение

Таким образом, при увеличении постоянной составляющей в приложенном к слою НЖК переменном напряжении, обнаружен эффект фазовой синхронизации локальной динамики гидродинамических мод и однородной твист моды директора в ос-

циллирующей электроконвективной структуре. Тот факт, что синхронизация в системе возникает только при наличии постоянной составляющей в приложенном переменном напряжении, позволяет предположить, что ее механизм обусловлен флексополяризацией.

С теоретической точки зрения усредненный за период переменного поля флексоэлектрический момент сил, действующий на директор, равен нулю при $U_{dc} = 0$, поскольку флексоэлектрический отклик в НЖК линейен по полю [3]. Наличие же постоянной компоненты $U_{dc} \neq 0$ в приложенном к слою НЖК напряжении должно приводить к дополнительной статической твист деформации поля директора [11,12]. Предварительный симметричный анализ уравнений динамики НЖК показывает, что флексоэффект, развивающийся на фоне зиг-заг осцилляций электроконвективных роллов, в свою очередь, обеспечивает синхронизацию между твист модой определенного знака и одним из типов зиг-заг роллов.

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. Установлено, что при изменении толщины слоя НЖК (в интервале от 15 мкм до 70 мкм) пороговое напряжение образования доменов не изменяется, а период растет линейно с толщиной. Перечисленные свойства указывают на то, что обнаруженные продольные домены являются флексоэлектрическими [12,31]. Для дальнейшего изучения механизма синхронизации и роли флексоэффекта необходимо провести нелинейный анализ уравнений электрогидродинамики НЖК с учетом флексополяризации. Другим важным аспектом исследований является выяснение роли синхронизации конвективных мод с однородной твист модой в процессе генерации фазовых волн.

Список литературы

- [1] M. Cross and H. Greenside, Pattern Formation and Dynamics in Nonequilibrium Systems, Cambridge University Press, 2009.
- [2] Pattern Formation in Liquid Crystals, edited by Á. Buka and L. Kramer, Springer, New York, 1996.
- [3] П. де Жен. Физика жидких кристаллов «МИР», Москва, 1977. (P. G. de Gennes, The Physics of Liquid Crystals, Clarendon Press, Oxford, 1974.)
- [4] E. Bodenschatz, W. Zimmermann, and L. Kramer, J. Phys. (France) 49, 1875 (1988).

- [5] E.F. Carr, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 7, 253 (1969).
- [6] W. Helfrich, *J. Chem. Phys.* 51, 4092 (1969).
- [7] Á. Buka, N. Éber, W. Pesch, and L. Kramer, in *Self Assembly, Pattern Formation and Growth Phenomena in Nano-Systems*, edited by A. A. Golovin and A. A. Nepomnyashchy (Springer, Dordrecht, 2006) p. 55.
- [8] Á. Buka, N. Éber, W. Pesch, and L. Kramer, *Phys. Rep.* 448, 115 (2007).
- [9] E. Kochowska, S. Németh, G. Pelzl, and Á. Buka, *Phys. Rev. E* 70, 011711 (2004).
- [10] D. Wiant, J. T. Gleeson, N. Éber, K. Fodor-Csorba, A. Jákli, and T. Tóth-Katona, *Phys. Rev. E* 72, 041712 (2005).
- [11] A. Krekhov, W. Pesch, N. Éber, T. Tóth-Katona, and Á. Buka, *Phys. Rev. E* 77, 021705 (2008).
- [12] A. Krekhov, W. Pesch, and Á. Buka, *Phys. Rev. E* 83, 051706 (2011).
- [13] T. Tóth-Katona, N. Éber, Á. Buka, and A. Krekhov, *Phys. Rev. E* 78, 036306 (2008).
- [14] M. May, W. Schöpf, I. Rehberg, A. Krekhov, and Á. Buka, *Phys. Rev. E* 78, 046215 (2008).
- [15] E. Plaut, W. Decker, A. G. Rossberg, L. Kramer, W. Pesch, A. Belaidi, and R. Ribotta, *Phys. Rev. Lett.* 79, 2367 (1997).
- [16] E. Plaut and W. Pesch, *Phys. Rev. E* 59, 1747 (1999).
- [17] M. Dennin, *Phys. Rev. E* 62, 6780 (2000).
- [18] S. Hirata and T. Tako, *Jap. J. Appl. Phys.* 20, L459 (1981).
- [19] А. Н. Чувывров, В. Г. Чигринов, *ЖЭТФ* 87, 177 (1984).
- [20] V. A. Delev, O. A. Scaldin, and A. N. Chuvyrov, *Liq. Cryst.* 12, 441 (1992).
- [21] В. А. Делев, О. А. Скалдин, А. Н. Чувывров, *Кристаллография* 37, 1575 (1992).
- [22] Э. С. Батыршин, В. А. Делев, А. Н. Чувывров, *Кристаллография* 44, 548 (1999).
- [23] V. A. Delev, E. S. Batyrshin, O. A. Scaldin, and A. N. Chuvyrov, *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* 329, 499 (1999).
- [24] В. А. Делев, О. А. Скалдин, Э. С. Батыршин, Е. Г. Аксельрод, *ЖТФ* 81, 11 (2011).
- [25] H. Amm, R. Stannarius, and A. G. Rossberg, *Physica D* 126, 171 (1999).
- [26] Dennin M., Cannell D.S. and Ahlers G., *Phys. Rev. E* 57, 638 (1998).
- [27] Батыршин Э. С., Дисс. к.ф.-м.н., Уфа (2012).
- [28] J.-P. Lachaux, E. Rodriguez, J. Martinerie and F. J. Varela, *Human Brain Mapping* 8, 194 (1999).
- [29] Э. С. Батыршин, А. П. Крехов, О. А. Скалдин and В. А. Делев, *ЖЭТФ* 141, 1200 (2012).
- [30] А. Пиковский, М. Розенблюм, Ю. Куртс *Синхронизация. Фундаментальной нелинейное явление, «Техносфера», Москва, 2003.*
- [31] Ю. П. Бобылев, С. А. Пикин, *ЖЭТФ* 72, 369 (1977).