

# ДИНАМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ ЗАРЯДОВ В НЕМАТИКЕ С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ АНИЗОТРОПИЕЙ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ

C. A. Пикин\*

Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника»  
119333, Москва, Россия

Поступила в редакцию 3 сентября 2020 г.,  
после переработки 3 сентября 2020 г.  
Принята к публикации 4 сентября 2020 г.

Я хочу выразить свое уважение И. Е. Дзялошинскому — соавтору книги «Метод квантовой теории поля в статистической физике», Englewood Cliffs: Prentice Hall (1963), написанной А. А. Абрикосовым, Л. П. Горьковым и И. Е. Дзялошинским, которая стала настольной книгой для молодых теоретиков. И. Е. Дзялошинский является соавтором научного открытия «Магнитоэлектрический эффект» — классического результата современной физики. Сегодня стали общепринятыми термины «вектор Дзялошинского» и «взаимодействие Дзялошинского – Мория». И. Е. Дзялошинский всегда поддерживает новые идеи и поиск новых материалов, например, жидких кристаллов. Последние обладают уникальными свойствами, например, они имеют необычные фазовые диаграммы и структуры границ сегнетоэлектрических доменов, которые связаны с дефектами и примесями в жидкокристаллических решетках. В данной работе показано, что помимо обычной электрогидродинамической (ЭГД) неустойчивости с бесконечными вдоль оси  $y$  доменами на плоскости  $xy$  (возникающими при соблюдении необходимых условий) и бесконечными  $x$ -полосами (возникающими из-за флексоэлектрической (ФЭ) неустойчивости), существуют также локализованные ЭГД-возбуждения. Эти явления приводят к своеобразной фазовой диаграмме в переменном электрическом поле.

Статья для специального выпуска ЖЭТФ, посвященного 90-летию И. Е. Дзялошинского

DOI: 10.31857/S0044451021040167

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работа [1] посвящена экспериментам с нематиком в переменном поле и содержит интересные наблюдения, которые пока не имеют теоретического объяснения. Прежде всего, нематик имел отрицательную анизотропию проводимости и потому был устойчив по отношению к электрогидродинамической (ЭГД) неустойчивости [1]. Кроме того, наблюдавшиеся явления совсем не похожи на явления, возникающие из-за флексоэлектрического эффекта. В этом нематике наблюдалось движение так называемых «пуль» — ориентационно деформированных частей нематика. Основной механизм образования таких «пуль» до сих пор не очень ясен и требует даль-

нейших экспериментальных и теоретических исследований. При поле  $E$ , параллельном оси  $z$ , пули вытянуты вдоль оси  $y$ , перпендикулярно оси  $x$ . При этом их размер вдоль этой оси  $L_x$  мал (порядка толщины нематического слоя). Размер  $L_y$  увеличивается с увеличением напряженности поля  $\langle E^2 \rangle$ , а длина  $L_x$  была постоянной. Движение «пуль» начиналось в одном и том же направлении на больших участках ячейки, но на других участках с той же вероятностью возникало движение в противоположном направлении. Скорость движения линейно зависела от  $\langle E^2 \rangle$ . Существование таких «пуль» возможно в некоторой области параметров системы (фазовой диаграммы). Эти эффекты могут быть связаны с определенными электролитическими свойствами [2, 3] очень чистого нематического жидкого кристалла (НЖК), т. е. НЖК, свободного от заряженных примесей. Это явление присуще обычным жидким электролитам, когда играют роль инжекци-

\* E-mail: pikin@ns.crys.ras.ru

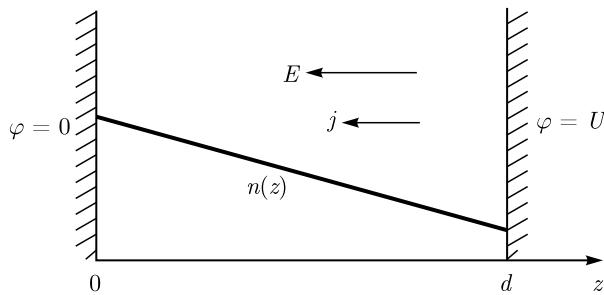


Рис. 1. Неравномерное распределение подвижных носителей заряда при слабом электрическом токе [3]

онные свойства электродов. Качественно эти факты можно объяснить с учетом инжектированных ионов и объемных зарядов в нематике под действием осциллирующего поля. Известно, что интенсивность потока инжектируемых ионов зависит от напряженности поля, создаваемого вблизи поверхности электрода внешними источниками и объемным зарядом внутри диэлектрика [4, 5]. В общем случае роль ионов разных знаков в протекании тока определяется электрохимическими процессами на двух электродах, но часто результирующий ток создается одним сортом ионов, при этом ионы противоположного знака остаются в покое [3]. В данной работе предполагается, что инжектируемые ионы создают слабый постоянный ток в осциллирующем поле. Известно [3], что при небольшом количестве инжектированных носителей электрический ток  $j$  пропорционален приложенному напряжению  $U$ , а количество инжектированных электронов около катода уменьшается с увеличением тока электронов и ограничено объемным зарядом (см. рис. 1). Связанные с зарядами возмущения иногда возникают в тех местах электродов, где внешней энергии достаточно для создания инъекции. Площадь пули  $L_x L_y$  может увеличиваться за счет увеличения  $L_y$ , но  $L_x$  практически не меняется и остается приблизительно порядка толщины ячейки  $d$ .

Вся эта картина наблюдалась в переменном электрическом поле (при действии высокочастотного электромагнитного поля) и при наличии электродов. Цель данной работы — продемонстрировать возможность формирования динамической системы полос, состоящей из движущихся заряженных дефектов нематической структуры на фоне невозмущенного нематика. Это явление является пороговым по напряженности переменного электрического поля в зависимости от частоты, оно зависит от потока инжектированных электронов. Следует подчеркнуть, что такой эффект существует независи-

мо от широко известных электрогидродинамической (ЭГД) и флексоэлектрической (ФЭ) неустойчивостей [6, 7].

## 2. РАЗМЕР ДЕФЕКТОВ

Интенсивность потока инжектированных электронов зависит от поля  $E$ , созданного на поверхности электрода внешним источником. Для возникновения некоторого количества инжектированных электронов необходимо конечное время  $\tau$  (необходим отрыв электронов от электрода, связывание электронов с молекулами нематика, «одевание» искажений ориентационной структуры на захваченные электроны и т. д.). Следовательно, размер  $L_y$  можно оценить как

$$L_y \sim v_y \tau, \quad (1)$$

где средняя скорость заряженных искажений  $v_y$  в вязкой жидкости зависит от интенсивности  $\langle E^2 \rangle$ , определяющей плотность инжектированных электронов. Значение  $\tau$  из уравнения (1) существенно влияет на размер  $L_y$ , который при малом времени  $\tau$  может быть небольшим и сравнимым с  $L_x$ . В работе [1] показано, что в некоторых случаях значения  $L_y$  могут быть велики. В наблюдаемых искажениях  $L_y/L_x \sim 10 \div 20$ .

## 3. ДВИЖЕНИЕ ДЕФЕКТОВ

Предположим, что концентрация инжектированных электронов  $n$  пропорциональна средней плотности энергии поля  $\langle E^2 \rangle$ , а именно,  $n = b\langle E^2 \rangle$ , где  $b$  — константа, а значение  $n$  связано со средней макроскопической скоростью движения (движение некоторых доменных стенок, ЭГД-роллов и т. д.)  $\langle v \rangle$  соотношением

$$\langle v \rangle = \eta n, \quad (2)$$

где  $\eta$  — электрокинетический коэффициент. Таким образом, имеет место зависимость

$$\langle v \rangle = \eta b \langle E^2 \rangle. \quad (3)$$

Соотношения (2), (3) являются основными постулатами данного подхода, связывая инжектирование зарядов в электролитическую ячейку с макроскопическим движением жидкости в ней при наличии переменного поля.

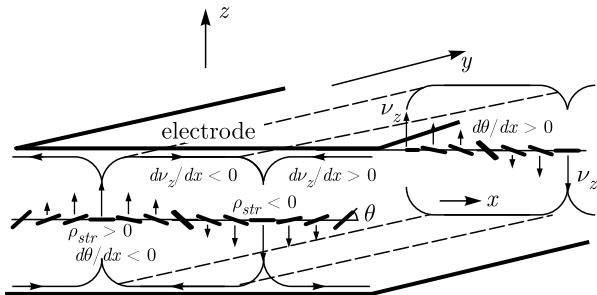


Рис. 2. Трехмерное изображение искажений в НЖКК

В соответствии с [2,3] можно оценить электрокинетический коэффициент. Можно использовать случай, когда массовый поток ионизированных молекул с плотностью  $\rho$  (по оси  $z$  — через растворитель) равен  $\rho v_z = -j m/e$ ; макроскопическое движение жидкой смеси со скоростью  $v_z$  — это импульс единицы объема жидкости  $\rho v_z$  [3]. Если  $\mathbf{n}$  ориентирован перпендикулярно ионному потоку, то происходит падение напряжения на расстоянии порядка толщины слоя  $d$  ( $\varphi(0) = 0, \varphi(d) = U$ ), таким образом, получаем следующее уравнение [2]:

$$\rho D^\perp \left( \frac{dn}{dz} \right) = j_z [\beta^\perp + (m/e)(1-n)], \quad (4)$$

где  $D_{ki}$  — тензор диффузии и  $\beta_{ki}$  — симметричные кинетические коэффициенты [2, 8] (индекс  $\perp$  означает собственное значение тензора). Здесь для простоты предполагается, что химический потенциал раствора определяется как производная термодинамического потенциала раствора (на единицу массы) по его концентрации  $n$  (например, по концентрации отрицательных ионов);  $n$  — отношению массы электролита к полной массе жидкости в данном элементе объема. Ячейка ЭГД имеет большую длину по оси  $y$ . Сечение ячейки в плоскости  $xy$  схематично показано на рис. 2 с характерными распределениями скорости жидкости и ориентации директора.

Приведенный ниже рисунок (рис. 3) может быть характерным для «пуль», если имеется универсальная причина появления посторонних зарядов. На самом деле эти структурные образования создаются и создают соответствующие оптические изображения в результате взаимодействия инжектированного электронного облака с нематическими молекулами. Например, можно сказать об определенных связанных состояниях инжектированного электрона с ароматическими электроактивными молекулами, когда отрицательные ионы образуются при захвате электронов этими молекулами по некоторым резонанс-

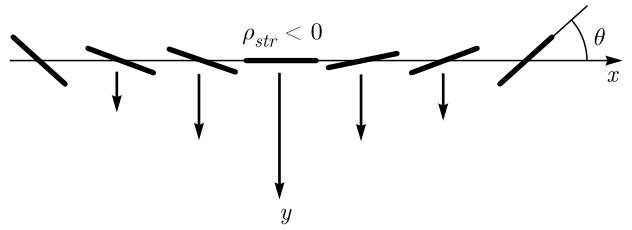


Рис. 3. Характерные распределения скорости жидкости и ориентации директора на двумерном сечении искажения (при наличии посторонних зарядов)

ным механизмам [9]. В других работах [10, 11] отмечается важная роль локализации и перераспределения ионов в «пулях». Формирование ограниченного анионного состояния связано с однократным резонансом с захватом электрона на определенную орбиталь. Этот механизм сопровождается максимумом ионного тока [9]. На рис. 3 показано образование ЭГД при относительно большой длине ориентации исходной однородной структуры (возмущения  $L_y$  вдоль оси  $y$ ); колонны (пунктирные линии) этих возмущений (распределения потоков и сил в колоннах показаны как в эффекте ЭГД [6]). В такой колонне директор становится почти параллельным потоку (состояние с максимумом ионного тока). В колоннах с перпендикулярной ориентацией потоков (исходное однородное состояние нематика) наблюдается минимум ионного тока при отрицательной анизотропии электропроводности. Таким образом, электроны не связываются с молекулами планарного неискаженного нематика при отрицательной анизотропии электропроводности (базовый фон), а прилипают к искаженным структурам — «пулям» НЖКК (покрывая их электронными «оболочками»).

Находящиеся в таком слое захваченных инжектированных электронов нематические молекулы напоминают уединенные волны. Все они в оптическом представлении выглядят как два параллельных блока конечной длины ( $\sim L_y$ ) и ширины ( $\sim d$ ). Эти блоки, очевидно, связаны с левой и правой сторонами колонн (см. рис. 3) с максимумами токов. При прямом столкновении таких «пуль» эти блоки «стремятся» захваченный инжектированный электрон, и «пули» исчезают.

При боковом столкновении «пуль» исчезает только часть захваченных электронов, такие «пули» могут восстанавливаться и как бы проходить друг через друга. Они также могут отражаться от твердых препятствий или даже быть полностью уничтожены ими. Часть инжектированных электронов переносит электрические заряды в жидкости

под действием поля  $E$ , а другие инжектированные электроны прилипают к молекулам НЖК, запасая «пули». «Пули», заряженные одинаково, испытывают кулоновское отталкивание. Полнота заряженные подвижные искажения, «одетые» электронами, напоминают уединенные волны (солитоны): они могут распространяться одна за другой вдоль оси  $y$  со скоростью  $\langle v \rangle$ , что связано с взаимным отталкиванием. В этом случае направление движения  $y$  эквивалентно направлению назад.

#### 4. ПОРОГОВЫЙ ХАРАКТЕР НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Рассматриваемое явление является пороговым по напряженности переменного электрического поля в зависимости от частоты, оно существенно зависит от потока инжектированных электронов. Если пороговое значение  $I_{th} = \langle E^2 \rangle_{th}$  пропорционально частоте переменного поля  $\omega$  на некотором интервале значений  $\omega$  (часть фазовой диаграммы), то нетрудно видеть, что среднее значение  $\langle v \rangle$  как функция  $\omega$  является прямой линией на том же интервале значений  $\omega$ . Аналогичным образом можно сделать вывод, что концентрация инжектированных электронов пропорциональна пороговой напряженности поля, заряд полностью заряженного дефекта нематической структуры равен  $pa \sim \langle E^2 \rangle_{th}$ ; поле действует на такой дефект с силой, пропорциональной этому заряду. Здесь  $a$  — коэффициент, показывающий степень прилипания электронов к молекулам НЖК.

На поверхности электрода (в плоскости  $xy$ ) импульс сохраняется: движущиеся заряженные дефекты начинают заполнять поле наблюдения, но с симметрией движения вправо и влево по полосам, то есть суммарные импульсы «пуль» уравновешивают друг друга. Соответственно,  $\langle v_{bullets} \rangle = a \tau p$ , где  $p$  — концентрация движущихся полностью заряженных «пуль». Таким образом, пороговое значение  $I_{th} = \langle E^2 \rangle_{th}$  определяет количество заряженных «пуль», а их скорости (см. (3)) находятся из соотношения

$$n = b I_{th}, \quad \langle v \rangle = ab I_{th} \eta. \quad (5)$$

#### 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В тонком слое нематика при действии переменного поля при отсутствии заряженных примесей описанные выше процессы имеют место, если

инжекция электронов происходит под действием постоянного или переменного поля. Электрическое поле  $E = E_z = E_0 \cos(\omega t)$  направлено перпендикулярно поверхности нематического слоя, т. е. эффект ЭГД изотропен в плоскости конденсатора. Поэтому здесь существенны двумерные возмущения потоков с инжектированными зарядами. Ячейки с искажениями теперь могут занимать всю плоскость  $xy$ , создавая полосчатую структуру с равными условиями движения посторонних зарядов вдоль оси  $y$ . В таких ячейках действуют электрические поля, приводящие в движение заряженные «пули» как искажения ориентационной структуры. «Пули» с инжектированными электронами под действием упомянутых полей могут двигаться в любом направлении, но ось  $y$  имеет предпочтение. Рисунок 5 из работы [1] (см. также соответствующие видео, приведенные в [1]) можно понять следующим образом: заряженные «пули» уходят на катод и исчезают из поля зрения. Одновременно «пули» в соседней группе полос с альтернативным (по оси  $y$ ) движением уносятся потоком в обратном направлении. Эта работа совершенно феноменологическая. Чтобы найти микроскопические значения параметров  $a, b, \eta$  и  $\tau$ , необходимо построить микроскопические уравнения, описывающие обсуждаемый процесс. Вообще говоря, эти феноменологические параметры должны соответствовать членам соответствующих уравнений движения заряженных дефектов ЭГД в нематиках.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность Е. С. Пикиной за полезные и плодотворные обсуждения, а также Е. И. Кацу и В. Е. Дмитриенко за проявленный интерес к работе.

**Финансирование.** Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и образования (государственная программа ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. B.-X. Li, V. Borshch, R.-L. Xiao, S. Paladugu, T. Turiv, S. V. Shlyanovskii, and O. D. Lavrentovich, *Nat. Commun.* **9**, 2912 (2018).
2. V. G. Levich, *Fiziko-Chimicheskaya Gidrodinamika*, Fizmatgiz, Moscow (1959).
3. L. D. Landau and E. M. Lifshits, *Electrodinamika Sploshnyh Sred*, Fizmatgiz, Moscow (1959).

4. B. L. Smorodin and A. V. Taraut, Fluid Dynamics **45**, 1 (2010).
5. V. A. Il'in, A. N. Mordvinov, and D. A. Petrov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **147**, 181 (2015).
6. S. A. Pikin *Structural Transformations in Liquid Crystals*, Gordon & Breach Science Publishers, New York (1991).
7. P. G. de Gennes and J. Prost, *The Physics of Liquid Crystals*, Clarendon Press, Oxford (1993).
8. S. A. Pikin, Surface. X-Ray, Synchrotron and Neutron Investigations **19**, 72 (2019).
9. S. A. Pshenichnyuk, A. V. Kuhto, I. N. Kuhto, and N. L. Asfandiarov, Russian Journal of Physical Chemistry **29**, 82 (2010).
10. S. Aya and F. Araoka, Nature Communications **11**, 3248 (2020).
11. Y. Shen and I. Dierking, Soft Matter **22**, (2020).  
see also electronic supplementary information (ESI).  
DOI:10.1039/d0sm00676a.