

УДК 03.07

О. А. Денисова, А. Н. Чувывров*

ЭЛЕКТРОГИРАЦИЯ В НЕМАТИЧЕСКИХ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ

ELECTROGIRATION IN NEMATIC LIQUID CRYSTALS

Уфимская государственная академия экономики и сервиса, кафедра физики,
450078 Уфа, ул. Чернышевского, д. 145.

*Башкирский государственный университет, кафедра инженерной физики,
450074 Уфа, ул. Валиди, д. 32

Симметрия нематического жидкого кристалла (НЖК) допускает возникновение в нём эффекта электрогирации при действии электрических полей. Величина электрогирации пропорциональна произведению коэффициента электрогирации и электрического поля.

Рассмотрен случай, когда НЖК ориентирован так, что электрическое поле E направлено перпендикулярно директору n НЖК и $E \parallel OZ$. При этом возникает момент кручения за счет эффекта электрогирации, который компенсирует упругий момент. В ситуации, когда директор $n \parallel OZ$ при слабых граничных условиях начинается реориентация директора и образование доменных структур, в виде концентрических окружностей различного радиуса, формирующих сферолиты. Волновой вектор структур пропорционален приложенному полю, а ширина доменов одинакова при различной толщине образцов кристаллов, но равных напряженностях электрических полей. При выключении поля время релаксации зависит от граничных условий, при этом происходит раскрутка геликоидных структур, и картины доменов повторяются в обратном порядке, а времена раскрутки составляют 5 – 20 с.

Ключевые слова: нематические жидкие кристаллы, электрогирация.

The symmetry of NLC allows the appearance of an optical activity in electric fields. The value of electrogiration is proportionate to electrogiration and electrical field coefficient product.

The case, when NLC, is oriented so that field E is directed perpendicular to director n NLC $E \perp n$, but $E \parallel OZ$ is examined. Herewith a moment of torsions appears owing to the effect of electrogiration, which compensates a springy moment. In situations, when director $n \parallel OZ$ is under weak border conditions, reorientation of director and formation of the domain structures in the manner of concentric circumferences of different radius, repeating geometry of spherulites begin. Wave vector of structures is proportionate to the applied field. The width of domens is the same under the different thickness of crystal samples, but equal tension of electric field. When switching off a field, the time of relaxation depends on the border conditions, herewith the torsions of helicious structures occur, and the pictures of domens are repeated in the inverse order. Correspond time of torsions of domens is 5 – 20 sec.

Key words: nematic liquid crystals, electrogiration.

Хорошо известно, что отличие НЖК от ХЖК состоит в наличии у последних закрутки, хотя их локальные свойства и структура совпадают. Сегодня доказано, что холестерические жидкие кристаллы встречаются только в молекулярных системах НЖК, в которых молекулы отличаются от своего зеркального изображения. Существует множество способов получения спиральных ориентаций НЖК, например, путем растворения оптически активных молекул в матрице НЖК или создания, например, планарной ориентации молекул с последующей закруткой одной из подложек. При этом в первом случае волновой вектор индуцированной спирали q пропорционален концентрации c оптически активных молекул: $q=4\pi\beta c$, где β – микроскопическая сила кручения. На сегодняшний день не совсем ясно, как величина оптической активности растворяемого вещества связана с шагом спирали, но достоверно известно, что макроскопическая сила кручения пропорциональна величине оптической активности [1].

Однако в жидких кристаллах можно предсказать существование еще одного эффекта при действии электрического поля, приводящего к пространственной закрутке ЖК, т. к. их симметрия допускает ее возникновение. Этот эффект хорошо известен для обычных кристаллов и носит название электрогирация. Величина оптической активности выражается через аксиальный тензор третьего ранга l_{ijk} и линейно зависит от величины электрического поля $\sigma_{ij}=l_{ijk}E_k$ [2]. В случае НЖК согласно его симметрии разрешается существование лишь двух компонентов тензора электрогирации l_{ijk} отличных от нуля: l_{xzy} и l_{xzx} , при $l_{xzy}=-l_{xzx}$.

Рассмотрим НЖК, ориентированный так, что поле направлено перпендикулярно директору НЖК $E \perp n$, но $E \parallel OX$. В этом случае НЖК становится оптически активным, а угол поворота φ_z плоскости поляризации света, распространяющегося вдоль оси OZ , будет равен $\varphi_z = l_{xzy} k_z E_x$, а вдоль оси OX $\varphi_y = l_{xzy} k_x E_x$, где k_y , k_x – y - и x -компоненты единичного вектора вдоль направления распространения света. Появление оптической активности в НЖК приводит к возникновению моментов кручения π_{ij}^* , который пропорционален $l_{xzy}E_x$ и $l_{xzx}E_x$. Их компенсируют упругие моменты

$$\pi_{xz} = K_{22} \left(n_x \frac{\partial n_z}{\partial y} - n_z \frac{\partial n_x}{\partial y} \right), \text{ либо } \pi_{yz} = K_{22} \left(n_z \frac{\partial n_y}{\partial x} - n_x \frac{\partial n_z}{\partial x} \right)$$

соответственно, где K_{22} – коэффициент упругости, n_x и n_z – компоненты директора. В том и другом случаях волновой вектор структуры вдоль оси OY или OX : $q_y \sim l_{xzx} E_x / K_{22}$, $q_x \sim l_{xzy} E_x / K_{22}$.

Итак, появляются два момента кручения: π_{xz}^* и π_{zy}^* . Первый стремится закрутить НЖК в плоскости XZ , а второй – вдоль электрического поля. Поэтому необходимо создать такие условия, чтобы исключить либо π_{zy}^* , либо π_{xz}^* . При наличии обоих моментов кручения интерпретация эксперимента очень затруднена.

Отметим, что этот эффект должен появляться всегда, однако по ряду причин до сих пор он не наблюдался. Для наблюдения «холестерического» эффекта в электрическом поле необходимы НЖК с очень малыми диэлектрической анизотропией и электропроводностью. Эти условия на сегодня удается реализовать только в НЖК класса двухкольчатых эфиров путем подбора различных концевых групп при наличии группы COO в центре, обладающей сильной поляризуемостью, в растворах двухкольчатых эфиров с концевыми группами X , Y : $X_1=C_4H_9$; $X_2=C_6H_{13}O$; $X_3=C_4H_9OC$; $Y_1=OC_6H_{13}$; $Y_2=OC_4H_9$; $Y_3=OC_2H_5$. Обычно после очистки удельное сопротивление этих кристаллов около $6 \cdot 10^{12}$ Ом·см, а диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{||} \approx \epsilon_{\perp} \sim 5,75$ при $\epsilon_{||} - \epsilon_{\perp} < 0,005$.

Флексоэлектрические коэффициенты в этой смеси НЖК $e_{||} \sim e_{\perp} \sim 10^{-6}$, т. е. они на порядок ниже, чем, например, в n – метоксибензилиденбутиланилин (МББА).

Изложенные ниже исследования холестерического эффекта, индуцированного электрическим полем, проводились с помощью поляризационного микроскопа и комплектованных его приставок. Спектральная фотометрическая приставка микроскопа имела прямоугольный зонд 5×1000 мкм и позволяла проводить фотометрирование и анализ двулучепреломления с участков кристалла размером до 5 мкм. Регистрация сигналов с фотоэлектронного умножителя для длин волн 200 – 800 нм проводилась цифровым вольтметром с записью компьютером РС-4 либо двухкоординатным самописцем, быстро протекающие процессы исследовались с помощью запоминающего осциллографа с последующей обработкой сигнала на компьютере. Фотографирование велось с помощью цифровой камеры РС-2 с последующей компьютерной обработкой изображений. Температура образца, помещенного в термостатическую камеру, регулировалась с точностью до 0,1 °С. Электрическое поле задавалось либо генератором сигналов специальной формы, либо источником постоянного напряжения. Двулучепреломление и угол ориентации директора НЖК определялись из анализа эллиптичности света с помощью компенсатора Сенармона с постоянной разностью хода.

Диэлектрическая проницаемость смесей $\epsilon_{||}$, ϵ_{\perp} и чистых компонентов измерялись (до 100 кГц) с помощью моста переменного тока, а электропроводность – мостом постоянного тока, двулучепреломление измерялось из величины разности хода гомеотропно ориентированного НЖК в плоскопараллельной кювете, наклоненной под углом 10° к лучам света. Для создания условий реализации закрутки вдоль оси OX (в плоскости слоя НЖК) и выделенного направления переориентации, на одной из подложек создавался микрорельеф с достаточно большим шагом $\sim 10^{-5}$ см путем полировки подложки в одном направлении. После чего на подложку напылялся прозрачный токопроводящий слой SnO_2 . При малом шаге микрорельефа менее 10^{-5} см получались образцы только с планарной ориентацией молекул благодаря микрорельефу подложек. Также именно благодаря ему не возникала закрутка молекул вдоль оси OX – условие запрета.

Рассмотрим динамику спиральных структур при различных величинах электрических полей в слоях НЖК, где ось OX перпендикулярна пластинам конденсатора, а директор $n \parallel OZ$. При слабых граничных условиях практически одновременно с приложением поля начинается реориентация директора, и здесь реализуются моменты кручения π_{xz}^* и π_{zy}^* и образуется особая картина доменной структуры, в которой домены образуют набор соосных окружностей различного радиуса сферолитов. Каждая из этих картин доменов, наблюдаемых в микроскопе, связана с образованием спиральных структур, имеющих особую точку, от которой и начинается радиальная закрутка НЖК в плоскости YOZ . При наличии микрорельефа на одной из подложек доменная структура имеет вид системы параллельных полос (рис. 1). При циклическом переключении полярности наблюдается гистерезис волнового вектора, зависящий от частоты переключения. Величина гистерезиса зависит от температуры НЖК и количества дефектов в доменной структуре. В соответствии со сказанным выше, при включении поля волновой вектор изменяется от нуля до фиксированного значения q , соответствующего полю E (рис. 2). Время образования структур зависит от граничных условий коэффициентов упругости и вязкости. С увеличением частоты переключения электрического поля ($E = const$) ширина доменов растет. При резком выключении электрического поля (например, с $E \sim 10^5$ В/см) происходит постепенная раскрутка геликоидных структур и картины доменов повторяются в обратном порядке. Соответствующие времена рас-

крутки доменов составляют 5 – 20 с (рис. 3) и зависят от температуры и толщины слоя НЖК.

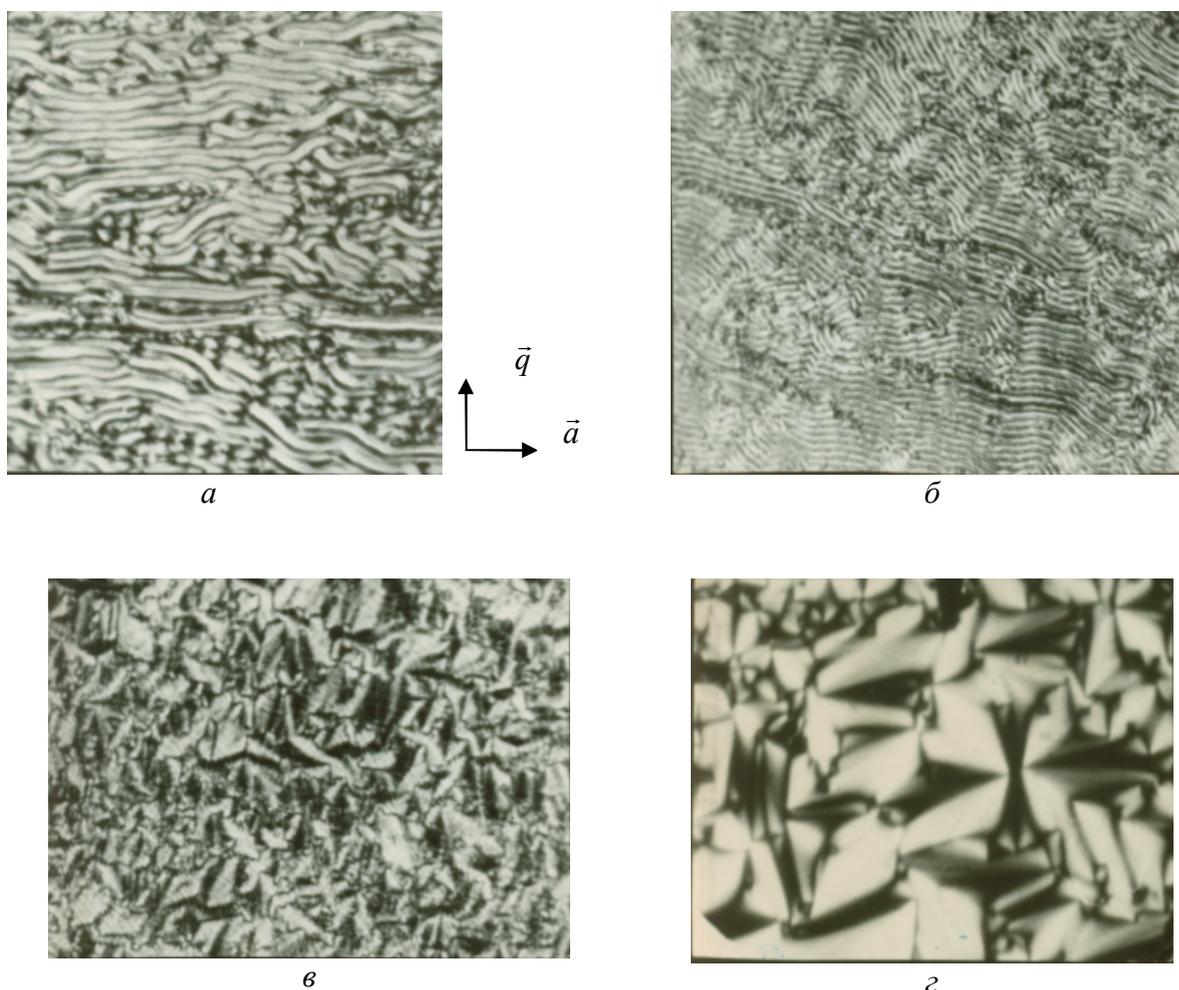


Рис. 1. Доменная структура при напряженностях поля:
 $a - 10^2$ кВ/м, $б - 3 \cdot 10^2$ кВ/м, $в - 6 \cdot 10^2$ кВ/м, $г - 10^3$ кВ/м.

Стрелкой показано направление \vec{a} микрорельефа, \vec{q} – волнового вектора спиральных структур ($a, б, в, г$ в 1 см – 0,1 мм)

Оптическая структура отдельных доменов в сильной степени определяется величиной двулучепреломления, и они имеют полосчатую структуру, представляющую систему главных изогир и изохром. При малых напряжениях доменные структуры не видны при параллельности плоскости поляризации оси геликоида. В том случае отсутствует и дифракция света. При увеличении поля в слое НЖК образуется множество дефектов. Восстановленная из поляризационно-оптических измерений структура ориентации директора около дефектов позволяет их отнести к χ -дисклинациям спиральных структур. При больших полях растет количество таких χ -дисклинаций полувцелой силы, распадающихся $\lambda\tau$ -пару ($P/2$ -пару) по схеме $\chi(1/2) = \lambda^{-2} + \tau^+$. С увеличением волнового вектора q число таких $P/2$ -пар растет и они образуют границу гиперболы, разделяющую слои, и в конце концов в плоскости ZOY образуются конфокальная текстура.

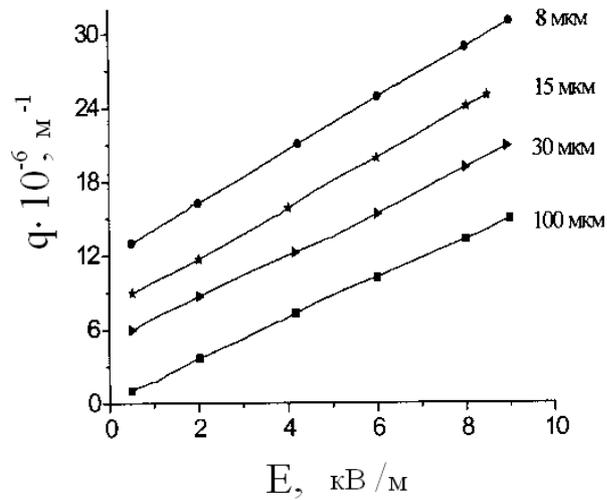


Рис. 2. Зависимость волнового вектора индуцированной спирали НЖК от напряженности электрического поля. Для наглядности значения волнового вектора смещены для 30 мкм на $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$, для $15 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}$ – на $0,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$, для $8 \cdot 10^{-6} \text{ мкм}$ – на $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^{-1}$

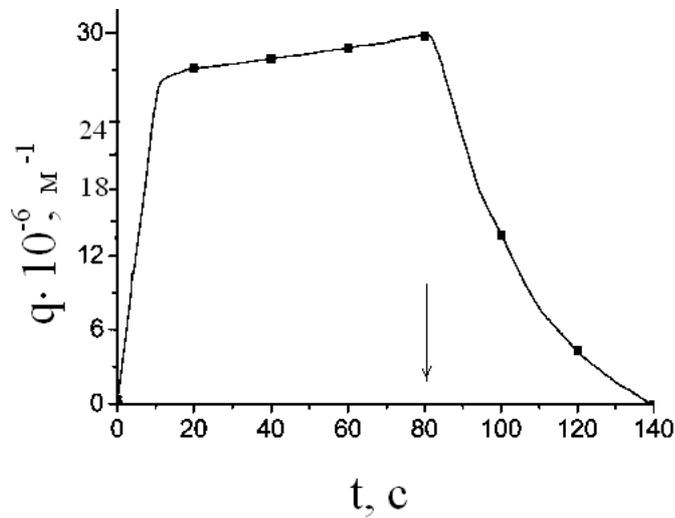


Рис. 3. Зависимость волнового вектора индуцированной спирали НЖК от времени при включении и выключении (показано стрелкой) электрического поля величиной $9 \cdot 10^2 \text{ кВ/м}$

Сравним зависимость волнового вектора от напряженности, вычисленную из анализа интенсивностей нулевого максимума дифрагированного света. Вопрос о рассеянии света на спиральных структурах был рассмотрен в монографии Белякова и Сони́на [3]. Изучаемый здесь частный случай нормального падения света при $\lambda < P$ достаточно тривиален и фактически равносильен случаю дифракции света на фазовой

решетке. Действительно модулированная структура представляет собой фазовую дифракционную решетку с периодическим изменением показателей преломления. При нормальном падении света на кристалл амплитуда дифрагированного света в нулевом максимуме $E_y \sim \sin(qL) \approx qL$, где L – толщина ЖК-слоя. Типичная зависимость $q(E)$, вычисленная из положения максимумов и минимумов, приведена на рис. 2. Величина $q(E)$, определенная таким образом, в два раза больше, чем определенная с помощью микроскопических наблюдений, т. к. значение углов ориентации $-\theta$ и $+\theta$ не различимы при дифракции света.

В данной работе исследование электрооптического эффекта – эффект электрогирации, результаты изучения которого могут быть использованы при разработке систем отображения информации.

Список литературы

1. Де Жен П. Физика жидких кристаллов. М. : Мир, 1977. 377 с.
2. Желудев И. С. Симметрия и ее приложение. М. : Атомиздат, 1976. 170 с.
3. Беляков В. А., Сонин А. С. Оптика холестерических жидких кристаллов. М. : Наука, 1982. 162 с.

Поступила в редакцию 13.01.2011 г.