

06.3;07;12

## **Интерференционные осцилляции в динамике оптического отклика капсулированных полимером нематических жидких кристаллов**

© А.В. Баранник, А.В. Шабанов, В.Я. Зырянов

Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск  
E-mail: zyr@iph.krasn.ru*Поступило в Редакцию 11 марта 2002 г.*

Экспериментально исследована динамика оптического отклика пленок капсулированного полимером нематического жидкого кристалла на импульсное воздействие электрического поля для образцов с различным размером капель нематика. Выявлен осциллирующий характер кривой релаксации оптического сигнала. Показано, что число осцилляций определяется поперечным размером капель нематика. Анализ осциллирующей зависимости в рамках приближения аномальной дифракции, а также сравнение с зависимостью светопропускания от приложенного напряжения, измеренной в статическом режиме, подтверждают интерференционный характер обнаруженных осцилляций.

Осциллирующий характер зависимости светопропускания от приложенного напряжения для пленок капсулированных полимером нематических жидких кристаллов (КПНЖК) был обнаружен и исследован в работах [1–6]. Осцилляции обусловлены интерференцией светового потока, проходящего между каплями, и света, рассеянного каплями жидкого кристалла в прямом направлении. При воздействии на пленку электрического поля директор жидкого кристалла внутри капель переориентируется, что приводит к изменению фазовой задержки интерферирующих световых потоков и, следовательно, к осциллирующей зависимости интенсивности прямо проходящего излучения от приложенного поля. Число осцилляций (экстремумов) на зависимости светопропускания пропорционально поперечному (в направлении нормали к плоскости пленки) размеру капель. Исследования [1–6] зависимости светопропускания проводились в статическом режиме, когда время развертки электрического поля (10 секунд и более) значительно превышало характерное время переориентации капель нематика ( $1 \div 10$  ms).

В этом случае при увеличении поля ориентационная структура в каплях нематика проходит через последовательность равновесных состояний от биполярной конфигурации директора до состояния насыщения, при котором директор ЖК практически во всем объеме капли ориентирован вдоль поля.

В технических приложениях, в особенности для пространственно-временных модуляторов света, применяемых в плоских дисплеях, устройствах записи, хранения и преобразования информации, используется дискретная адресация с высокочастотным импульсным воздействием электрического поля на отдельные элементы транспаранта. В этом плане актуально исследование вклада интерференционной составляющей в оптический отклик КПНЖК пленок, измеренный в динамическом режиме, когда время переключения электрического сигнала гораздо меньше характерного времени переориентации капель нематика.

Образцы КПНЖК пленок изготавливались с применением известного метода фазового разделения гомогенного раствора жидкого кристалла и преполимера, иницируемого фотоотверждением полимерной матрицы [7]. В качестве компонентов композиции использовались оптический адгезив NOA-65 (Norland Products, Inc.) и нематическая смесь производных цианобифенилов [8] в весовом соотношении 1:1. Приготовленный раствор помещался в зазор между стеклянными подложками с прозрачными электродами, величина которого задавалась спейсерами толщиной  $10\ \mu\text{m}$ . В процессе изготовления интегральная мощность излучения ртутной лампы варьировалась в пределах  $1 \div 10\ \text{mW/cm}^2$ . Образец был разделен на несколько участков, для каждого из которых использовался свой технологический режим фотоотверждения (температура и интенсивность облучения). Вариация указанных технологических параметров дает возможность влиять на морфологические характеристики получаемой структуры. В результате средний размер капель для различных участков образца изменялся в диапазоне от 1 до  $10\ \mu\text{m}$ . В пределах отдельного участка композитной пленки разброс капель по размеру не превышал 40%.

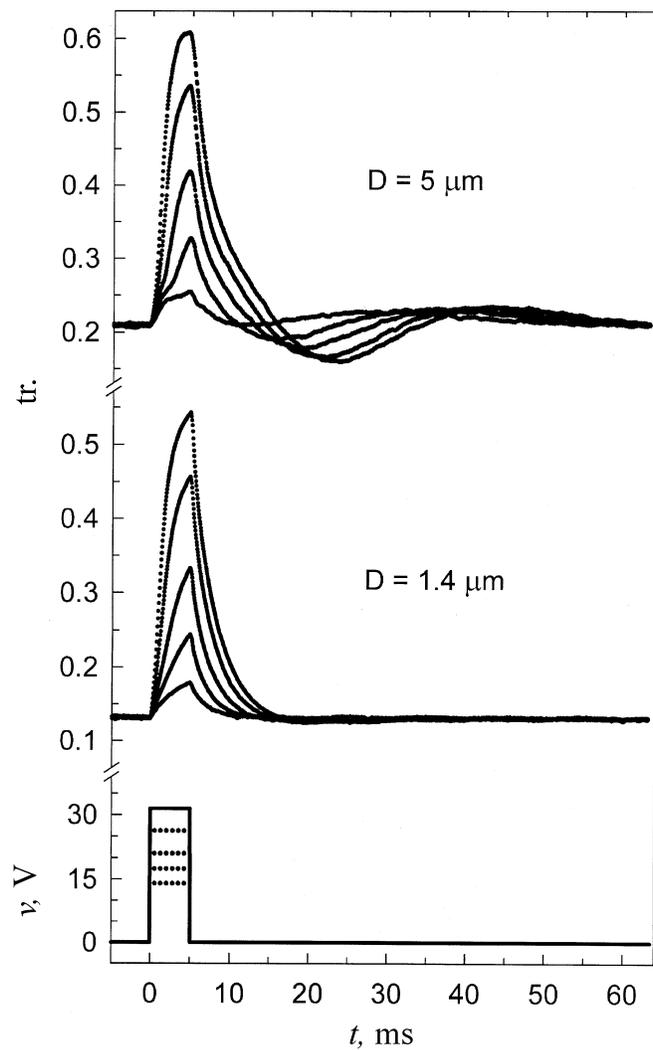
Текстурные исследования с использованием поляризационного оптического микроскопа показали, что внутренняя ориентационная структура капель нематика соответствует биполярной конфигурации директора жидкого кристалла. Оси симметрии, связывающие два полюса капель, лежат преимущественно в плоскости пленки, при этом имеют хаотическую азимутальную ориентацию. Следует отметить, что оси симметрии

мелких капель имеют небольшие отклонения от плоскости пленки, поскольку форма таких капель близка к сферической. Капли большого размера имеют заметно сплюснутую форму — их поперечный размер на один-два микрона меньше размера в плоскости пленки. В каплях такой формы минимум упругой энергии достигается при ориентации осей симметрии вдоль длинных осей капель [9], т. е. в плоскости пленки.

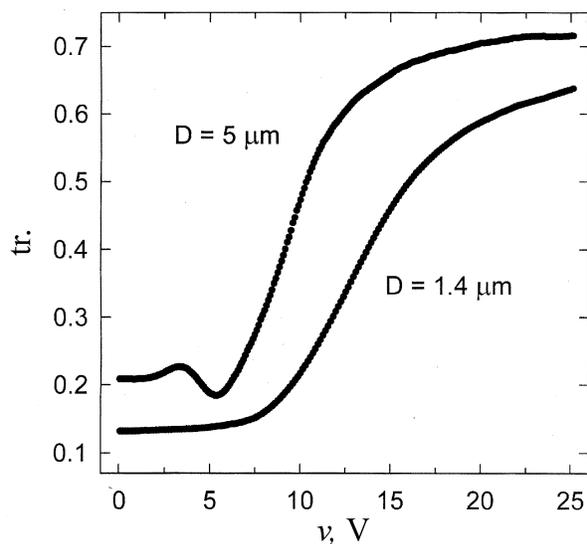
Исследования электрооптических характеристик проводились для монохроматического излучения гелий-неонового лазера с длиной волны  $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ . Вольт-контрастные характеристики измерялись при медленно меняющейся ( $1 \text{ V/s}$ ) амплитуде знакопеременного напряжения частотой  $500 \text{ Hz}$ , приложенного к электродам ячейки. Динамика оптического отклика КПНЖК пленок исследовалась в зависимости от амплитуды одиночных прямоугольных электрических импульсов длительностью  $5 \text{ ns}$ .

На рис. 1 показаны осциллограммы оптического отклика двух образцов композитной пленки с различной величиной капель нематика, а также форма управляющего электрического импульса. Для образца с малым размером капель нематика характерны монотонно убывающие, по форме близкие к экспоненциальной, зависимости светопропускания от времени после выключения электрического импульса. Существенно отличающийся вид имеют релаксационные кривые для образца с крупными каплями жидкого кристалла. Светопропускание в этом случае, уменьшаясь, достигает минимума, затем увеличивается, достигает локального максимума и лишь затем постепенно уменьшается до исходного состояния. Положение минимума на временной шкале, так же как и время полной релаксации, зависит от амплитуды электрического импульса. Это определяется тем, что для большей трансформации ориентационной структуры капли требуется более длительное время релаксации. В минимальной точке светопропускания композитной пленки имеет меньшую величину, чем в исходном состоянии до включения импульса. Интересно отметить, что глубина минимума (разность светопропускания в исходном состоянии и в минимальной точке) тем больше, чем больше амплитуда управляющего импульса.

Для сравнения на рис. 2 представлены зависимости светопропускания от приложенного напряжения этих же участков образца, измеренные в статическом режиме. Для мелких капель нематика кривая зависимости имеет классическую [7] S-образную форму. Пороговое поведение с точкой излома, соответствующей критическому полю



**Рис. 1.** Оциллограммы оптического отклика для двух участков композитной пленки с различным средним размером капель  $D$ , соответствующие управляющим импульсам (внизу) напряжения амплитуды 14.0, 17.5, 21.0, 26.3, 31.5 V.



**Рис. 2.** Зависимости светопропускания от приложенного напряжения для тех же участков композитной пленки, измеренные в статическом режиме.

Фредерикса, не наблюдается. Это объясняется наличием в данной структуре капель нематика, ось симметрии которых, как указывалось выше, ориентирована под углом к плоскости пленки. Невыполнение условия ортогональности осей биполярной конфигурации капель нематика и действующего поля [2–4] приводит к беспороговому виду вольт-контрастной характеристики. Такая ситуация характерна для композитных пленок, в которых размер капель нематика существенно меньше толщины пленки. Условие ортогональности выполняется более хорошо для крупных капель, что проявляется в пороговом характере зависимости светопропускания для этого участка образца (рис. 2). Кроме этого на кривой имеются локальные минимум и максимум, по виду сходные с теми, которые наблюдаются в динамическом режиме измерений (рис. 1).

Воспользуемся аналитическим подходом, развитым в [2–5] для объяснения интерференционных осцилляций вольт-контрастной характеристики. Относительная фазовая задержка интерферирующих свето-

вых потоков определяется отношением разности их оптического пути к длине волны излучения  $\Delta n \cdot D/\lambda$ . Здесь  $\Delta n = n_{lc} - n_p$ ,  $n_{lc}$  — показатель преломления необыкновенного луча в жидком кристалле,  $n_p \simeq 1.52$  — показатель преломления используемой полимерной матрицы. Величина показателя преломления необыкновенного луча зависит от относительного расположения электрического вектора световой волны и директора жидкого кристалла, изменяясь для исследуемой нематической смеси в диапазоне  $n_{lc}^{\max} \simeq 1.72$  и  $n_{lc}^{\min} \simeq 1.52$ . В области насыщения (максимальное светопропускание на рис. 1 и 2) директор нематика перпендикулярен электрическому вектору светового луча,  $\Delta n = n_{lc}^{\min} - n_p = 0$  и, следовательно, фазовый сдвиг отсутствует. При ослаблении напряжения (рис. 2) двулучепреломление увеличивается и при некотором его значении разность оптического пути  $\Delta n \cdot D$  достигает  $\lambda/2$ . Это соответствует условию появления первого минимума на кривой вольт-контрастной характеристики. Дальнейшее уменьшение напряжения приводит к равенству  $\Delta n \cdot D = \lambda$ , которое определяет положение первого максимума. Соотношение  $\Delta n \cdot D = 3\lambda/2$  соответствует второму минимуму на зависимости светопропускания и т. д.

Поперечный размер мелких капель составляет в среднем  $1.4 \mu\text{m}$ . В этом случае максимально достижимая разность оптического пути  $\Delta n^{\max} \cdot D = 0.2 \cdot 1.4 \mu\text{m} = 0.28 \mu\text{m} < \lambda/2$ . Отсюда понятно, что для дисперсии столь мелких капель используемого жидкого кристалла осцилляции на зависимостях светопропускания (рис. 1 и 2) наблюдаться не могут.

Для крупных капель поперечный размер равен  $5 \mu\text{m}$ . Тогда разность оптического пути  $\Delta n^{\max} \cdot D = 0.2 \cdot 5 \mu\text{m} = 1.0 \mu\text{m} \approx 3\lambda/2$ . Следовательно, при релаксации таких капель в исходное состояние (рис. 1) или при уменьшении приложенного напряжения (рис. 2) зависимость светопропускания должна последовательно пройти через первый минимум, первый максимум, второй минимум и выйти на насыщение в исходное (в отсутствие поля) состояние, что и наблюдается в эксперименте.

Таким образом, в работе впервые представлены наблюдения осциллирующего характера релаксационной кривой оптического отклика пленки капсулированных полимером нематических жидких кристаллов на прямоугольный электрический сигнал. Анализ результатов убедительно свидетельствует об интерференционной природе этих осцилляций. Следует отметить, что динамическая картина оптического отклика композитных пленок в общем случае может иметь весьма сложный

вид, поскольку возможно влияние различных эффектов, например воздействие электрического поля пространственно разделенного заряда примесных ионов [10,11], образование дефектов и доменов [12,13], реструктурирование границы раздела капля–полимер [8,14] и прочее. В этом плане результаты, полученные в данном исследовании, показывают важность учета вклада интерференционных эффектов при проведении комплексного анализа динамических характеристик композитных пленок.

Работа выполнена при частичном финансировании по грантам Минонауки и Минобразования РФ, а также Красноярского фонда науки.

## Список литературы

- [1] Зырянов В.Я., Пресняков В.В., Шабанов В.Ф. // Письма в ЖТФ. 1996. Т. 22. В. 14. С. 22–26.
- [2] Шабанов А.В., Пресняков В.В., Зырянов В.Я. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1998. Т. 67. В. 9. С. 696–700.
- [3] Shabanov A.V., Presnyakov V.V., Zyryanov V.Ya. et al. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1998. V. 321. P. 245–258.
- [4] Presnyakov V.V., Zyryanov V.Ya., Shabanov A.V. et al. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1999. V. 329. P. 27–34.
- [5] Конколович А.В., Пресняков В.В., Зырянов В.Я. и др. // Письма в ЖЭТФ. 2000. Т. 71. В. 12. С. 710–713.
- [6] Zyryanov V.Ya., Presnyakov V.V., Serebrennikov A.N. et al. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2001. V. 368. P. 3983–3990.
- [7] Жаркова Г.М., Сонин А.С. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука, 1994. 214 с.
- [8] Баранник А.В., Сморгон С.Л., Зырянов В.Я. и др. // Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 5. С. 99–101.
- [9] Ковальчук А.В., Курик М.В., Лаврентович О.Д. и др. // ЖЭТФ. 1988. Т. 94. В. 5. С. 350–364.
- [10] Афонин О.А., Названов В.Ф., Новиков А.В. // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. В. 6. С. 33–37.
- [11] Zhuikov V.A., Shabanov V.F., Zharkova G.M. et al. // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1990. V. 179. P. 377–381.
- [12] Shimada E., Uchida T. // Jpn. J. Appl. Phys. 1992. V. 31. P. L352–L354.
- [13] Drzaic P.S. // Liq. Cryst. 1988. V. 3. N 11. P. 1543–1555.
- [14] Cupelli D., Macchione M., Nicoletta F.P. et al. // Appl. Phys. Lett. 2000. V. 76. N 20. P. 2856–2858.