

ПРОПУСКАНИЕ СВЕТА ПОЛИМЕР- ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ ПЛЁНКАМИ, ДОПИРОВАННЫХ УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

**В. А. Лойко^{a*}, А. В. Конколович^a, А. А. Мискевич^a,
Д. Манаила-Максимеан^b, О. Данила^b, В. Цырку^b,
А. Бэрар^b**

^aИнститут физики НАН Беларуси, Минск, Беларусь

^bПолитехнический университет г. Бухареста, Румыния

***E-mail:** loiko@ifanbel.bas-net.by

Аннотация. Разработана оптическая модель для определения коэффициента когерентного (направленного) пропускания капсулированных полимером жидкокристаллических (КПЖК) плёнок, допированных углеродными нанотрубками (УНТ) при однородном нормальном межфазном сцеплении на границе раздела жидкокристаллическая (ЖК) капля – полимерная матрица. Она основана на приближениях Фолди–Тверского, аномальной дифракции, соотношениях Максвелла–Гарнетта и концепции параметров порядка.

Введение

В последние годы наметился интерес к исследованию диэлектрических и оптических свойств композитных материалов на основе ЖК и КПЖК, допированных углеродными нанотрубками [1,2]. Это связано с тем, что нанотрубки в композитном материале дают

дополнительные возможности для формирования и управления его электрооптическим откликом.

В данной работе мы предлагаем электрооптическую модель для анализа коэффициента когерентного пропускания КПЖК-УНТ плёнок.

Оптическая модель. Основные соотношения

Рассмотрим КПЖК-УНТ плёнку. Схематическое изображение отдельной капли ЖК в поперечном сечении плёнки показано на рис.1.

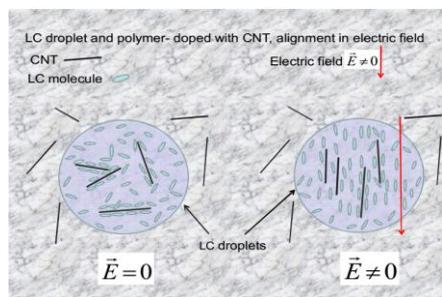


Рис.1. Переориентация жидкого кристалла электрическим полем E в поперечном сечении КПЖК плёнки, допированной углеродными нанотрубками (carbon nanotubes, CNTs). В отсутствие управляющего поля ($E=0$) ориентация нанотрубок является хаотической по всему объёму композита. При наложении поля ($E \neq 0$) длинные оси молекул ЖК и нанотрубки в ЖК каплях (LC droplets) ориентируются вдоль поля

Для определения коэффициента когерентного пропускания T_c КПЖК-УНТ плёнки при однородном нормальном межфазном сцеплении получены следующие аналитические соотношения [3]:

$$T_c = \exp(-\gamma), \gamma = \frac{3c_d}{4a_{ef}} Q, Q = 4 \operatorname{Re} K_h, \quad (1)$$

$$\operatorname{Re} K_h = \frac{1}{2} - \frac{\sin v}{v} + \frac{1 - \cos v}{v^2}, v = 2ka_{ef} \left(\frac{n_{d+CNT}}{n_{p+CNT}} - 1 \right), \quad (2)$$

$$n_{d+CNT} = \left(\frac{1 + 2c_d^{CNT}}{1 - c_d^{CNT}} \right)^{1/2} n_d, \quad n_{p+CNT} = \left(\frac{1 + 2c_p^{CNT}}{1 - c_p^{CNT}} \right)^{1/2} n_p, \quad (3)$$

$$n_d = n_m - \frac{1}{3} \Delta n S_d(E), \quad n_m = \frac{2n_{\perp} + n_{\parallel}}{3}, \quad \Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}, \quad (4)$$

$$S_d(E) = 1 - \exp(-e), \quad (5)$$

$$e = E \frac{2a_{ef}}{A} \left(\frac{1 + 2c_d^{CNT}}{1 - c_d^{CNT}} \right)^{1/2} \left(\frac{\varepsilon_0 \Delta \varepsilon_{LC}}{K} \right)^{1/2} \left(\frac{3}{2 + x\beta} \right) \left(1 - c_d \frac{x\beta - 1}{x\beta + 2} \right)^{-1}, \quad (6)$$

$$x = \frac{1 - c_p^{CNT}}{1 + 2c_p^{CNT}} \frac{1 + 2c_d^{CNT}}{1 - c_d^{CNT}}, \quad (7)$$

$$A = 10 \left(\frac{\varepsilon_a^2 - 1}{\varepsilon_a^2 + 1} \right)^{1/2}, \quad \beta = \frac{\sigma_d}{\sigma_p}, \quad \sigma_d = \sigma_{iso} + \frac{2}{3} (\sigma_{\parallel} - \sigma_{\perp}) S_d(E), \quad (8)$$

$$\sigma_{iso} = \frac{\sigma_{\parallel} + 2\sigma_{\perp}}{3}, \quad (9)$$

$$c_d^{CNT} = \frac{f_{LC} \rho_{LC}}{f_{LC} \rho_{LC} + f_p \rho_p} c_{CNT}, \quad c_p^{CNT} = \frac{f_p \rho_p}{f_{LC} \rho_{LC} + f_p \rho_p} c_{CNT}, \quad (10)$$

$$c_d = f_{LC} \frac{f_{LC} \rho_{LC} + f_p \rho_p}{\rho_{LC}}. \quad (11)$$

Здесь γ – показатель ослабления плёнки; l – её толщина; c_d – объёмный фактор заполнения плёнки каплями ЖК; Q – фактор эффективности ослабления отдельной капли; K_h – функция Хюлста; $k=2\pi n_p/\lambda$, λ – длина волны падающего света; a_{ef} – эффективное значения длины малой полуоси капель вдоль нормали к пленке; n_{d+CNT} и n_{p+CNT} – показатели преломления ЖК капель и полимерной матрицы при наличии нанотрубок; n_d и n_p – показатели преломления ЖК капель и полимерной матрицы в отсутствие нанотрубок; n_m – средний показатель преломления ЖК; Δn , n_{\perp} и n_{\parallel} – двулучепреломление, обыкновенный и необыкновенный показатели преломления жидкого кристалла; $S_d(E)$ – параметр порядка ЖК капель, зависящий от управляющего электрического поля E , e – безразмерное нормированное значение управляющего поля, ε_a – параметр анизотрии капель, определяемый как отношение большой оси капель в плоскости плёнки к малой оси вдоль нормали к плёнке; K – среднее значение модуля упругости ЖК; ε_0 – электрическая постоянная; $\Delta\varepsilon_{LC}$ – диэлектрическая анизотропия жидкого кристалла; σ_p и σ_d – электрические проводимости полимерной матрицы и капель жидкого кристалла; соответственно; σ_{\parallel} и σ_{\perp} – проводимости ЖК параллельно и ортогонально его оптической оси (директору), c_d^{CNT} и c_p^{CNT} – объёмные факторы заполнения капель жидкого кристалла и полимерной матрицы углеродными нанотрубками; c_{CNT} – объёмный фактор заполнения всего образца нанотрубками; f_{LC} и f_p – массовые доли ЖК и полимера; ρ_{LC} и ρ_p – их плотности, соответственно; ρ_{gr} – плотность графита.

Результаты

На рис. 2 представлены рассчитанные в рамках разработанной модели (соотношения (1)-(11)) зависимости коэффициента когерентного пропускания T_c от управляющего поля E для КПЖК плёнки без нанотрубок ($c_{CNT}=0$) и композитной КПЖК-УНТ плёнки при разных значениях объёмного фактора заполнения c_{CNT}

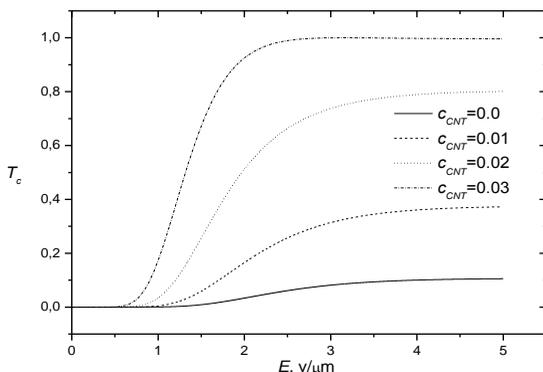


Рис. 2. Зависимости коэффициента когерентного пропускания T_c КПЖК плёнки от управляющего поля E при разных значениях фактора заполнения c_{CNT} нанотрубками

Расчёты выполнены для монодисперсных сферических капель при следующих параметрах: $n_{\perp}=1.52$, $n_{\parallel}=1.745$, $n_p=1.503$, $A=0.456$ ($\epsilon_a \approx 1$), $\sigma_p=10^{-9}$ См/м, $\sigma_{\parallel}=5.7 \times 10^{-8}$ См/м, $\sigma_{\perp}=2.6 \times 10^{-8}$ См/м, $K=1.17 \times 10^{-11}$ Н, $\Delta\epsilon_{LC}=14$, толщина плёнки $l=50$ мкм, длина волны падающего света $\lambda=0.6328$ мкм, $f_{LC}=0.4$, $f_p=0.6$, $\rho_{LC}=1.03$ г/см³, $\rho_p=1.18$ г/см³, радиус капель $a=2.5$ мкм.

Из рис. 2 видно, что допирование КПЖК плёнок углеродными нанотрубками позволяет существенно улучшать их электрооптический отклик: повышать светопропускание плёнок и снижать значения управляющего электрического поля .

Заключение

Разработанная модель позволяет проводить анализ электрооптического отклика в прямопрошедшем свете для КПЖК-УНТ плёнок в зависимости от их толщины, оптических параметров жидкого кристалла и полимера, их проводимостей, размеров ЖК капель, массовых долей компонент (ЖК, полимер, УНТ) в составе композита. Она позволяет определять оптимальные параметры плёнок для повышения их коэффициента пропускания и снижения управляющего электрического поля вследствие допирования капель ЖК и полимерной матрицы углеродными нанотрубками.

Благодарности. Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект № Ф20РА-003).

Список литературы

- [1] Yadav S. P. Carbon nanotube dispersion in nematic liquid crystals: An overview / S. P. Yadav, S. Singh // Progress in Mater. Sci. – 2016. – V. 80. – P. 38-76.
- [2] Wu Y. Effects of a chemically modified multiwall carbon nanotubes on electro-optical properties of PDLC films / Y. Wu, H. Cao, M. Duan, E. Li, H. Wang, Z. Yang, D. Wang, and W. He // Liquid Crystals – 2017. – V. 45(7). – P. 1023-1031.
- [3] Loiko V. A. Optical model to describe coherent transmittance of polymer dispersed liquid crystal film doped with carbon nanotubes / V. A. Loiko, A. V. Konkolovich, A. A. Miskevich, D. Manaila-Maximean, O. Danila, V. Cîrcu, A. Bărar // JQSRT – 2020. – V. 245. – P. 106892 (1-5).