



терий. Тем не менее по результатам наших исследований для ИК излучения можно сделать важный практический вывод: время облучения при выбранной плотности мощности 50 мВт/см^2 не должно превышать 10 мин при использовании глицерино-спиртового растворителя.

Авторы выражают признательность Л.Е. Долотову за разработку светодиодного облучателя и помощь при проведении экспериментов.

Представленные результаты получены в ходе работ по гранту CRDF RUB1-570-SA-04 при финансовой поддержке Palomar Medical Technologies, Burlington, USA.

Библиографический список

1. Ross E.V. Acne, Lasers and Light // *Advances in Dermatology*. 2005. Vol.21. P.1–32.
2. Nitzan Y., Dror R., Ladan H., Malik Z., Kimel S., Gottfried V. Structure-activity relationship of porphyrines for photoactivation of bacteria // *Photochem. Photobiol.* 1995. Vol.62. P.342–347.
3. Papageorgiou P., Katsambas A., Chu A.. Phototherapy with blue (415 nm) and red (660 nm) light in the treatment of *acne vulgaris* // *British. J. Dermatol.* 2000. №142. P.973–978.
4. Kjeldstad B., Johnsson A. An action spectrum for blue and near ultraviolet inactivation of *Propionibacterium acnes*: with emphasis on a possible porphyrin photosensitization // *Photochem. Photobiol.* 1986. Vol.43. P.67–70.
5. Simpson N. Antibiotics in acne: time for a rethink // *British. J. Dermatol.* 2001. №144. P.225–227.
6. Kawada A., Aragane Y., Sangen Y., Tezuka T. Acne phototherapy with a high-intensity, enhanced, narrow-band, blue light source: an open study and *in vitro* investigation // *J. Dermatol. Sci.* 2002. Vol.30. P.129–135.
7. Hongcharu W., Taylor C.R., Chang Y. D. Topical ALA-photodynamic therapy for the treatment of *acne vulgaris* // *J. Invest Dermatol.* 2000. Vol.115. P.183–192.
8. Tuchin V.V., Genina E.A., Bashkatov A.N., Simonenko G.V., Odoevskaya O.D., Altshuler G.B. A pilot study of ICG laser therapy of *acne vulgaris*: Photodynamic and photothermolysis treatment // *J. Lasers in Surg. and Med.* 2003. Vol.33, №5. P.296–310.
9. Genina E.A., Bashkatov A.N., Simonenko G.V., Odoevskaya O.D., Tuchin V.V., Altshuler G.B. Low-Intensity ICG-Laser Phototherapy of *Acne Vulgaris*: A Pilot Study // *J. Biomed. Opt.* 2004. Vol.9, №4. P.828–834.
10. Анфимова Н.А., Поткаев Н.Н., Ткаченко С.Б., Шугнина Е.А. Фотодинамическая терапия: патогенетическое обоснование эффективности при вульгарных угрях // *Эксперим. и клин. дерматокосметология*. 2005. №5. С.125–130.
11. Mariwalla K., Rohrer T. Use of lasers and light-based therapies for treatment of *acne vulgaris* // *J. Lasers in Surg. and Med.* 2005. Vol.37. P.333–342.
12. Ovchinnikov I.S., Shoub G.M., Tuchin V.V. Photodynamic effect of laser radiation and methylene blue on some opportunistic pathogenic microorganisms of oral cavity // *Proc. SPIE*. 2000. Vol.4001. P.390–392.
13. Genina E.A., Bashkatov A.N., Simichkin Yu.P., Kochubey V.I., Lakodina N.A., Altshuler G.B., Tuchin V.V. *In vitro* and *in vivo* study of dye diffusion into the human skin and hair follicles // *J. Biomed. Opt.* 2002. Vol.7. P.471–477.

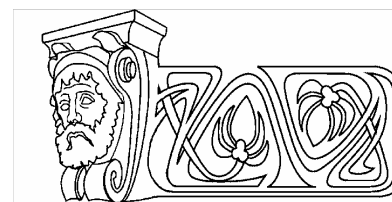
УДК 621.382.029.6

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В КАПСУЛИРОВАННЫХ ПОЛИМЕРОМ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛАХ: МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

А.В. Садовой, М.В. Медведев, В.Ф. Названов

Саратовский государственный университет,
кафедра физики твердого тела
E-mail: avsadovoy@info.sgu.ru

Проведено теоретическое исследование углового распределения рассеянного излучения слоями капсулированных полимером нематических жидких кристаллов для различных значений оптического пропускания. Расчет многократного рассеяния излучения проводился методом Монте-Карло, в качестве фазовой функции использовалось приведенное дифференциальное сечение рассеяния капель жидкого кристалла. Получены результаты, удовлетворяющие данным ранее проведенного эксперимента и расчета на основе приближения однократного рассеяния.



Multiple Light Scattering Investigation in Ppolymer Dispersed Liquid Crystals: Monte-Carlo Simulation

A.V. Sadovoi, A.V. Medvedev, N.F. Nazvanov

Theoretical investigation of angular dispersed of scattered light in polymer dispersed nematic liquid crystals with rather value of optical transmittance was presented in this article. Multiple light scattering was simulated by Monte-Carlo technique using differential cross section of liquid crystal droplet as a phase function. The obtained results have laid in the limits of experimental data and theoretical simulation based on anomalous diffraction approach.



Введение

В настоящее время капсулированные полимером жидкие кристаллы (КПЖК) являются перспективным материалом для развития элементной базы современной оптоэлектроники и информационных технологий. КПЖК представляют собой полимерную пленку с диспергированными в ней каплями жидких кристаллов (ЖК). В таких композициях сочетаются полезные качества, присущие как полимерам, так и ЖК, что позволяет разрабатывать на их основе гибкие дисплеи [1] и другие устройства обработки и отображения информации. Оптические и электрооптические свойства такого материала определяются в основном конфигурацией директора капель ЖК в полимере.

Наиболее распространенными методами описания рассеяния излучения в КПЖК являются приближения аномальной дифракции [2] и Рэлея–Ганса [3] для ЖК капель с размерами больше и меньше длины волны оптического излучения соответственно. Эти методы рассматривают рассеяние на одной капле ЖК и являются приближениями однократного рассеяния излучения. В работе [4] было введено понятие безразмерного электрического или магнитного полей, которое помогло связать однократное приближение рассеяния с влиянием управляющего поля на параметры капли ЖК.

В ряде работ были предприняты попытки улучшить приближение однократного рассеяния излучения введением усреднения по размерам капель [5], параметрам порядка капель [6] и применением теории эффективной среды [7]. Широко исследовалась также теория переноса излучения в приложении к КПЖК [8]. Все вышеперечисленные приближения хорошо описывают пропускание излучения через слой КПЖК, однако в случае углового распределения рассеянного излучения удовлетворяют эксперименту только в случаях низкой концентрации ЖК капель, большого пропускания света и малой толщины слоя КПЖК, то есть без учета влияния эффектов многократного рассеяния излучения в КПЖК.

Известны также работы, посвященные изучению многократного рассеяния излучения в КПЖК с помощью метода Монте-Карло [9–11]. Применение данного метода

моделирования рассеяния излучения в рассеивающих КПЖК слоях позволяет давать лучшее соответствие результатов расчета данным экспериментов.

Ранее в работе [12] нами были приведены результаты изучения углового распределения рассеянного излучения в сильно рассеивающих КПЖК слоях. Получено, что при значении пропускания КПЖК менее 90% приближение однократного рассеяния света не удовлетворяет экспериментальным данным углового распределения рассеянного излучения.

Настоящая работа посвящена моделированию углового распределения рассеянного излучения в капсулированных полимером жидких кристаллах методом Монте-Карло. Проведено сравнение результатов моделирования с ранее полученными данными эксперимента и расчета в приближении однократного рассеяния излучения [13].

Многократное рассеяние света в КПЖК

Расчеты проведены при предположении, что слой КПЖК состоит из нематических жидкокристаллических капель с радиусом $R = 2.4$ мкм, имеющих биполярную структуру [13]. Все капли однородно ориентированы в слое, но слой КПЖК имеет различную суммарную ориентацию директоров капель для различных величин управляющего поля и, следовательно, различных значений пропускания КПЖК слоя. Нами рассмотрены величины пропускания слоя $T = 10, 50$ и 90% . Показатели преломления полимерной матрицы, обыкновенного и необыкновенного луча в нематического ЖК принимались равными $n_p = 1.51$, $n_o = 1.51$ и $n_e = 1.71$ соответственно. Объемная доля ЖК в полимере составляла $C_v = 0.16$. Толщина слоя КПЖК равна $d_s = 107$ мкм. В модели излучение (с длиной волны $\lambda = 0.635$ мкм) падало по нормали к поверхности слоя КПЖК, параллельно направлению электрического поля, приложенного к образцу. Эффекты рассеяния на границах воздух – стеклянная подложка – слой КПЖК не учитывались.

Мы рассматривали падение на образец 1000 фотонов с максимальным числом актов рассеяния, равным 25.



При разыгрывании угла рассеяния фотона на ЖК капле в качестве фазовой функции принималась функция на базе дифференциального сечения рассеяния капли [13], которая записывается следующим образом:

$$\frac{\left[\frac{d\sigma}{d\Omega}\right]}{\sigma_0} = \frac{R^4 k^2}{4 \cdot (\pi R^2)} \left[|H(iv_e, kR \sin \delta)|^2 \cos^2(\alpha_0) + |H(iv_o, kR \sin \delta)|^2 \sin^2(\alpha_0) \right], \quad (1)$$

где $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ – дифференциальное сечение рассеяния капли ЖК, $\sigma_0 = \pi R^2$ – геометрическое поперечное сечение, \mathbf{k} – волновой вектор излучения, α_0 – угол поляризации.

$$H(iv_e, kR \sin \delta) = 2 \int_0^1 \left[1 - \exp(1 - x^2) \right]^{1/2} J_0(xkR \sin \delta) dx, \quad (2)$$

где δ – угол рассеяния излучения,

$$v_e = 2kR \left(\frac{n_e(\theta)}{n_o} - 1 \right), \quad (3)$$

$$n_e(\theta) = \left[\frac{\cos^2(\theta)}{n_o^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2} \right]^{-1/2}, \quad (4)$$

θ – угол между директором ЖК капли и направлением приложенного электрического поля, C_0 – функция Бесселя нулевого порядка.

Вид фазовой функции приведен на рис.1.

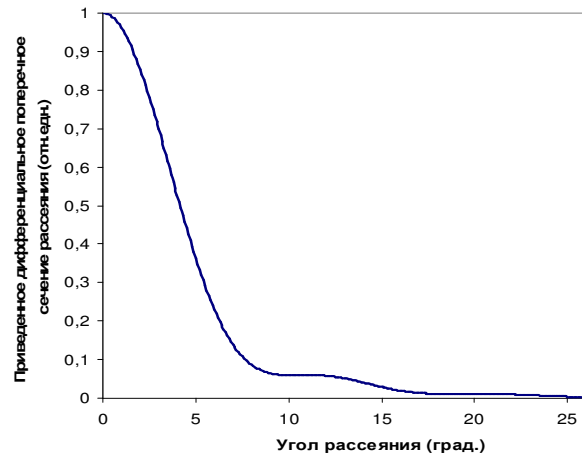


Рис. 1. Зависимость фазовой функции от угла рассеяния излучения ($n_p = 1.51, n_o = 1.51, n_e = 1.71, \alpha_0 = 0^\circ, \theta = 0^\circ, R = 2.4$ мкм)

Полученные результаты моделирования углового распределения рассеянного излучения методом Монте-Карло показаны на рис.2, на котором приведены ранее полученные результаты расчета в приближении однократного рассеяния излучения, а также результаты эксперимента.

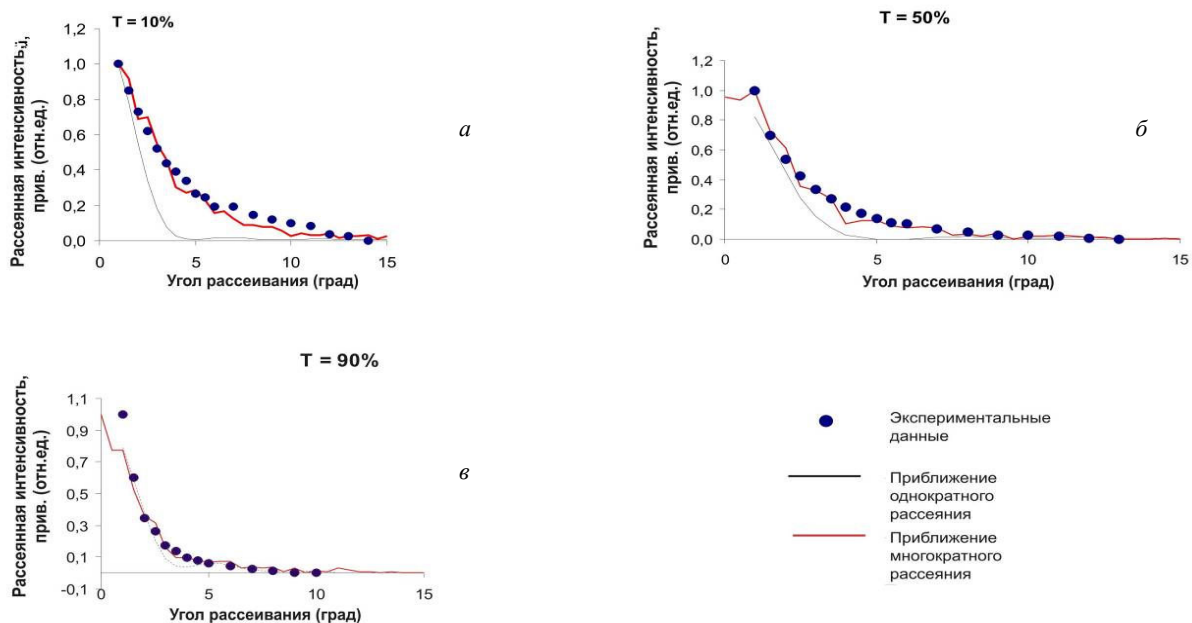


Рис. 2. Зависимости приведенного значения рассеянной интенсивности от угла рассеяния при пропускании слоя $T = 10\%$ (а), 50% (б), 90% (в)



Отметим, что приближение однократного рассеяния удовлетворяет данным эксперимента при $T = 90\%$, то есть при высоких управляющих полях. Моделирование же методом Монте-Карло удовлетворяет всем значениям пропускания КПЖК слоя. Стоит заметить, что при увеличении концентрации капель ЖК, толщины слоя КПЖК, разброса капель ЖК по размерам необходимо повышать точность метода моделирования многократного рассеяния с учетом указанных факторов.

Выводы

В работе приведены результаты моделирования многократного рассеяния излучения в слоях капсулированного полимером жидкого кристалла для различных величин пропускания 10%, 50% и 90% на базе метода Монте-Карло с постоянным шагом. В данной модели учитывалось лишь рассеяние, описываемое фазовой функцией, полученной на основе дифференциального сечения рассеяния ЖК каплей. Сравнение расчетов с данными эксперимента показано, что приближение однократного рассеяния излучения удовлетворяет данным эксперимента лишь при величине пропускания более 90%, что есть проявления эффектов многократного рассеяния излучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 07-02-01467а).

Библиографический список

1. Chari Rankin Ch.M., Johnson D.M. Single-substrate cholesteric liquid crystal displays by colloidal self-assembly // Appl. Phys. Lett. 2006. Vol.88. P.043502.
2. Light scattering from nematic droplets: Anomalous-diffraction approach // Phys. Rev. A. 1988. Vol.37, №10. P.4006–4015.
3. Žumer S., Doane J.W. Light scattering from a small nematic droplet // Phys. Rev. A. 1986. Vol.34, №4. P.3373–3386.
4. Kelly J.R., Palffy-Muhoray P. The optical Response of polymer dispersed liquid crystals // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 1994. №243. P.11–19.
5. Aphonin O.A., Nazvanov V.F. Light transmission, linear dichroism and birefringence of nematic/polymer dispersions // Liq. Cryst. 1997. Vol.23, №6. P.845–859.
6. Vicari L. Electro-optic phase modulation by polymer dispersed liquid crystals // J. Appl. Phys. 1997. Vol.81, №10. P.6621–6615.
7. Cox S.J., Reshetnyak V.Yu., Sluckin T.J. Effective medium theory of light scattering in polymer dispersed liquid crystal films // J. Phys. D: Appl. Phys. 1998. №31. P.1611–1625.
8. Dick V.P., Loiko V.A. Model for coherent transmittance calculation for polymer dispersed liquid crystal films // Liq. Cryst. 2001. Vol.28, №8. P.1193–1198.
9. Delica S., Blanca C.M. Monte Carlo model of light scattering in polymer dispersed liquid crystals: polarization effects and defects // Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2004. №412. P.501–511.
10. Kelly J.R., Wei W. Multiple scattering in polymer dispersed liquid crystals // Liquid Crystals. 1993. Vol.14, №6. P.1683–1694.
11. Neijen J., Botts H., Paulissen J. Multiple scattering of light from polymer dispersed liquid crystal material // Liq. Cryst. 1997. Vol.22, №3. P.255–264.
12. Садовой А.В., Названов В.Ф. Угловое распределение рассеянного света в капсулированных полимером жидких кристаллах // Проблемы оптической физики. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2005.
13. Жаркова М., Сонин А. Жидкокристаллические композиты. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1994.