

# 聚合物分散液晶透射光散射特性随角度-电压的变化

赵 云<sup>1</sup> 张 斌<sup>1</sup> 王 芬<sup>1</sup> 潘雪丰<sup>1</sup> 陶卫东<sup>1</sup> 董建峰<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>宁波大学理学院, 浙江 宁波 315211)  
(<sup>2</sup>宁波大学信息学院, 浙江 宁波 315211)

**摘要** 采用聚合物相分离法制备聚合物分散液晶(PDLC)薄膜,通过改变散射角,对散射光强随电压的变化进行了测试。实验结果表明,在角度小于 $26^\circ$ 时,外加电压为10 V处出现一个散射强度极小值;当角度超过 $26^\circ$ 时,外加电压为10 V处散射光强最大。在不同的散射角下,散射光强随外加电场的变化趋势有明显差异。散射角在 $0^\circ\sim 5^\circ$ 范围内蓝光的光强随外加电压的增加一直增大;在 $6^\circ\sim 25^\circ$ 范围内,散射光强随外加电压的增大先增大后减小,并且最大波峰时的电压随着角度的增加而减小;当散射角大于 $26^\circ$ 时,蓝光的光强随着电压的增大而减小。采用单散射理论对实验现象进行了分析和讨论。

**关键词** 散射;聚合物相分离;散射几率;瑞利散射;反常衍射理论;聚合物分散液晶

**中图分类号** TN873.93 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.s107001

## Scattering Properties of Polymer Dispersed Liquid Crystal with Different Angles and Voltages

Zhao Yun<sup>1</sup> Zhang Bin<sup>1</sup> Wang Fen<sup>1</sup> Pan Xuefeng<sup>1</sup> Tao Weidong<sup>1</sup> Dong Jianfeng<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>School of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)  
(<sup>2</sup>Institute of Information, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China)

**Abstract** The scattering property of polymer dispersed liquid crystal (PDLC) film is tested at different angles and voltages. The film is prepared via polymerization induced phase separation method. At the 10V voltage, scattering intensity attains to the minimum when the angle is less than  $26^\circ$ . In contrast, the maximum appears when the angle degree exceeds  $26^\circ$ . In addition, the data depending on changes of applied electric field reveals a significant difference of scattering spectra in different angles. Blue light intensity increases at higher level of external voltage between  $0^\circ\sim 5^\circ$ . Ranging from  $6^\circ\sim 25^\circ$ , the intensity of scattered light increases with voltage at first and then decreases. And the magnitude of voltage in the big wave peak increases when angle degree decreases. When the scattering angle is greater than  $26^\circ$ , the intensity of blue light decreases with the increase of voltage. Single scattering theory is adopted to discuss and analyze the phenomenon.

**Key words** scattering; polymerization induced phase separation; scattering probability; Rayleigh scattering; abnormal diffraction theory; polymer dispersed liquid crystal

**OCIS codes** 290.2558; 300.6470; 240.0310; 310.6860

## 1 引 言

聚合物分散液晶(PDLC)是一种新型液晶功能材料,具有制备工艺简单、响应时间快、无需偏振器件、易于制成大面积器件等优点<sup>[1~3]</sup>,已经广泛应用

于光阀、相位光栅、投影显示、光开关和高清晰度电视等方面<sup>[4~6]</sup>,近年来一直受到人们的关注。PDLC制备是将预聚物与液晶按一定的质量或者体积比混合,采用适当的方法使其聚合,并使液晶从聚合物中

收稿日期: 2012-02-01; 收到修改稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(61078060)资助课题。

作者简介: 赵 云(1988—),男,硕士研究生,主要从事新型聚合物分散液晶方面的研究。E-mail: zhaoyun930@126.com

导师简介: 陶卫东(1969—),男,教授,硕士生导师,主要从事光学与光电子学方面的研究。

E-mail: taoweidong@nbu.edu.cn

析出成微米量级的微滴,液晶微滴被聚合物包裹在其中。目前 PDLC 的制法已多样化,总结起来主要是相分离法<sup>[7]</sup>,包括聚合相分离法(PIPS)、热致相分离法(TIPS)和溶剂蒸发引发相分离法(SIPS)。

目前关于 PDLC 散射的研究主要是在同一电压不同角度下进行的,然而最近报道了一种基于 PDLC 的新型荧光开关<sup>[8]</sup>,是针对同一角度不同电压下散射方面的研究,而目前对于不同角度不同电压下 PDLC 光散射特性研究较少。故在此文章的基础上上对 PDLC 散射特性进行了初步测试与研究,并给出相应的分析和讨论。以往关于光散射的理论大多建立在微观液晶取向的基础上<sup>[9,10]</sup>,即当电场加到足够强时,液晶微滴的取向与电场取向一致,此时散射较小,当电场强度较小时,则液晶与电场取向不一致,表现为不同程度的散射。故此时散射是电压和取向矢  $n$  的函数,涉及到散射模型有单散射模型和多散射模型,主要的处理方法有瑞利散射理论<sup>[11]</sup>和反常衍射理论<sup>[12]</sup>(ADA)。瑞利散射理论主要用来处理液晶微滴半径比较小的情况,反常衍射理论则是处理半径较大的液晶液滴。本文采用聚合物相分离法(PIPS)制备 PDLC,根据制备出来的 PDLC 特有的结构,利用泊松几率分布并结合单液滴的散射理论模型对其加电场时透射光的散射特性作了理论分析。

## 2 器件制备

先将切好的氧化铟锡(ITO)玻璃用清水洗净,投掷于体积比为 1:1 的乙醇和氨水混合溶液中清洗 3 min,取出来后用擦镜纸擦干,然后将液晶(TEB30A)和紫外胶(BBC UV GLUE 102)以 1:1 的体积比混合并搅拌均匀,用吸管吸取少量的混合溶液均匀涂抹于 ITO 玻璃的导电面。另取一 ITO 玻璃覆盖在样品表面,同时使两块 ITO 玻璃导电面相对,之后用紫外光曝光 3 min,固化后形成 PDLC 膜,如图 1 所示。测量膜厚约为 40  $\mu\text{m}$ 。用偏光显微镜(Nikon eclipse e600 pol)放大 500 倍,得到液滴形貌,如图 2 所示。

## 3 实验测试与讨论

图 3 所示为对 PDLC 进行测试的实验光路。用 DHDM-W450-100 mW 的半导体激光器发出的 440 nm 蓝光经偏振棱镜调节光强后垂直于样品入射,由 Ocean Optics USB4000 光纤光谱仪在样品另



图 1 PDLC 实物图  
Fig. 1 Photo of PDLC

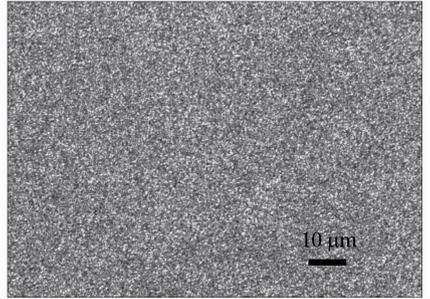


图 2 PDLC 在 500 倍显微镜下的照片  
Fig. 2 Microscopes photograph of PDLC enlarging 500 times

一面接收透射光,在 PDLC 的两片 ITO 玻璃上接可调变压器,调节光纤探头的方位角测试不同散射角下的透射光谱,并分别对 3°、5°、6°、15°、25°、26°、35°、45° 散射角下的透射光谱随外加电压进行了研究,测试中电压变化范围为 0~140 V,间隔为 10 V,实验结果如图 4 所示。

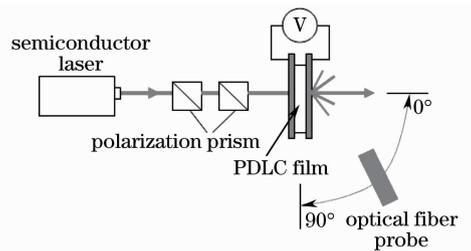


图 3 测试装置  
Fig. 3 Test device

## 4 结果分析与讨论

### 4.1 结果分析

对图 4 数据进行提取,取中心波长为 440.56 nm 数据进行数据分析,具体数据见表 1。

实验发现在散射角度为 0°~5° 范围内,光强随电压增大而增大(10 V 除外)。在 6°~25° 范围内,光强随电压的增大先增大后减小(10 V 处有一极小值),并且从表 1 可知,在 6° 时光强达到最高点时的

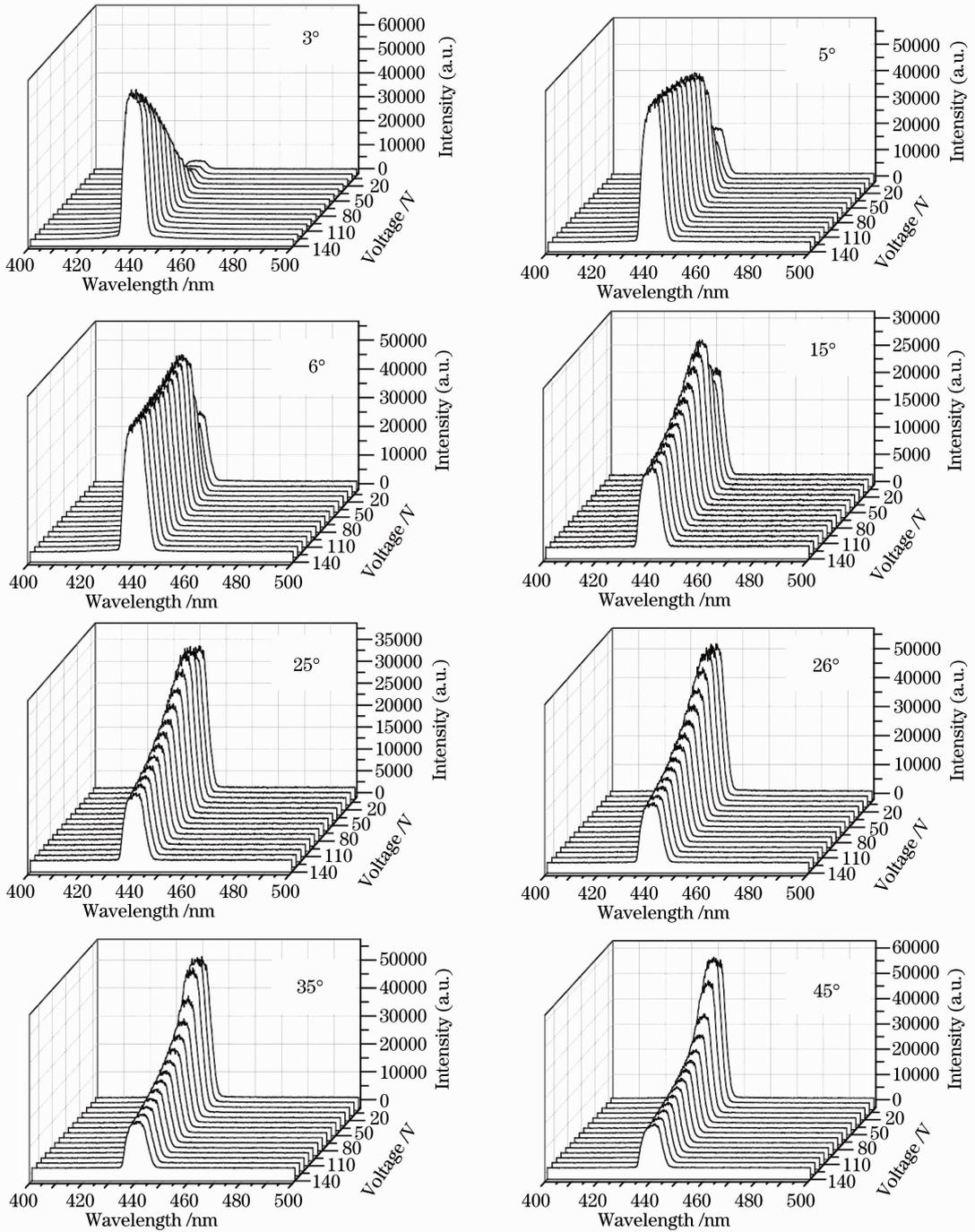


图 4 不同散射角下透射光谱随外加电压的变化

Fig. 4 Dependence of transmission spectrum on external voltage with different scattering angles

表 1 440.56 nm 处数据

Table 1 Data at 440.56 nm

Angle / (°)	Voltage / V	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
3		4341	4272	5240	7198	11464	17135	22447	29527	36148	41448	47002
5		19099	15949	24434	39593	46992	49337	50283	51653	53204	53497	54095
6		26070	24077	36197	49775	52794	52571	52321	51354	50738	50525	49970
15		21329	20338	24841	29271	28155	26334	24151	22496	21006	19527	19611
25		34143	34108	36324	35237	32841	29931	27666	25554	24012	22435	20852

Angle / (°) \ Voltage / V	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
26	52585	53894	51669	49630	44121	40244	36625	34067	31800	29101	27553
35	52161	53548	51670	43355	36996	33189	29963	27659	25540	24170	22568
45	55948	58809	52083	40719	34510	30248	28503	26975	25218	23848	22431

电压为40 V,在 15°时最大光强出现在外加电压为30 V处,而在 25°时 20 V 处光强最大,可以看出最大光强处对应的电压随角度的增加向低电压逐渐偏移。随着角度的继续增加,光强随着外加电压的增大而减小。另外从表 1 可知,散射角在 0~26°范围内 10 V 处有光强最低值,当角度超过 26°时 10 V 处光强最大。

#### 4.2 讨 论

在聚合物分散液晶中,液晶液滴并不是大小相等、完全相同的存在于聚合物网络中,而是大小不等,并且液滴半径小于 10 μm,如图 2 所示。液滴的分布情况决定着 PDLC 的光电性质,假设液晶液滴是随机分布,那么它遵循泊松分布<sup>[13]</sup>

$$p(n, a) = \frac{a^n \exp(-a)}{n!}, \quad (1)$$

式中  $p(0, a)$  表示透射光没有被散射,  $n$  表示散射光被散射的次数,根据朗伯定律,对其进行变换,使其变为透射率  $T$  和散射次数  $n$  的函数,即

$$p(T, n) = \frac{[-\ln(T)]^n}{n!} T, \quad (2)$$

式中  $a = -\ln T$ ,对(2)式利用 Maple 软件进行作图,结果如图 5 所示。

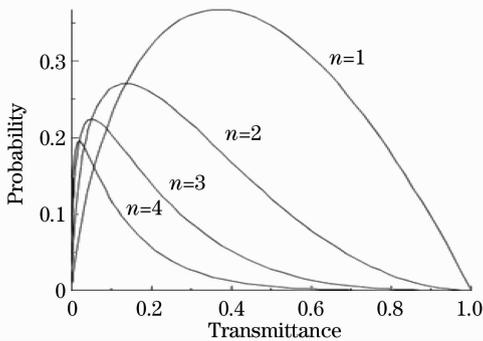


图 5 多散射几率

Fig. 5 Multiple scattering probability

由图 5 可知,随着透射率的增加,散射次数几率逐渐减少,单散射的几率在一定范围内越来越大,多散射的几率总体一直在下降。透射率在 0~0.4 范围内时,单散射的几率随着透射率的增加而增加,就意味着单散射的次数也随着在增加,当  $T > 0.4$  时,单散射的几率随着透射率的增加而减小,即单散射

的散射次数在下降。图 6 所示为液晶液滴单散射的散射横截面与角度分布情况。由图 6 可知,当散射角在 0°~20°之间时,液晶液滴单散射横截面随着角度的增加而减小,当散射角大于 20°时,单散射横截面基本为 0,且不随角度的变化而变化,说明单散射对大角度没有贡献。从图 6 还可看出,大角度的散射是靠多散射来实现的。然而在本实验中清楚地看到在 0°~5°之间光强随着电压增大而增大,这可能是由于半导体蓝光激光器的光斑较大以及激光器的发散性所致,导致在小角度范围内有“漏光”现象,而非散射所致,因此在实验中所有的散射现象都会有个角度推移。在散射角为 6°~25°时,单散射起主导作用,单散射的散射几率随着透射率的增加先增大后减小,对应着散射次数先增加后减小,这时单散射散射强度先增大后减小,在一般情况下电压和透射率是成正比关系的。所以当散射角超过 26°时,由于单散射作用贡献很小,光强主要是由多散射贡献,而多散射随着散射透射率的增加而减小,所以在 35°和 45°角时,散射光强随着电压的增加而减小。另外,实验发现 6°~25°范围内光强达最高点时电压随角度的增大而减小,这是由于角度的增大,单散射贡献逐渐减小,多散射贡献逐渐增加所致。

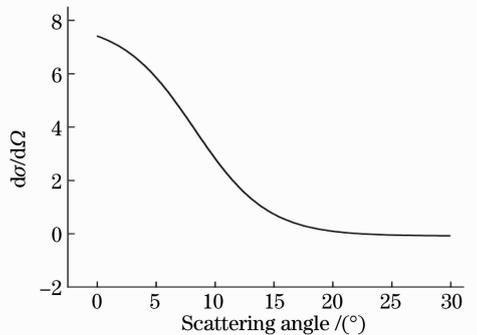


图 6 单散射图案

Fig. 6 Single scattering pattern

如上所述,液晶液滴大小并非完全一样,对于小液晶液滴,有效折射率为

$$n_{\text{effs}}(v) = n_o + (\bar{n} - n_o) \exp(-v^2/v_{0s}^2), \quad (3)$$

式中  $\bar{n} = (2n_o + n_c)/3$ 。对于大液晶液滴,有效折射率为

$$n_{\text{effl}}(v) = n_o + (\bar{n} - n_o) \exp(-v^2/v_{0l}^2). \quad (4)$$

由于液晶液滴的半径不同,有  $v_{0L} < v_{0S}$ , 所以有  $n_{\text{effS}} > n_{\text{effL}}$ , 另外有<sup>[14]</sup>

$$T(v) = T_{\text{max}} \exp\{\delta - \alpha_0 \{ [n_{\text{effS}}(v)/n_p - 1]^2 + (\zeta_L/\zeta_S) [n_{\text{effL}}(v)/n_{\text{effS}}(v) - 1]^2 \}\}, \quad (5)$$

式中  $\delta = \alpha_0 [n_0/n_p - 1]^2$ ,  $\alpha_0, \zeta_L/\zeta_S$  与 PDLC 本身的结构有关, 是 PDLC 本身的属性。

由(3)~(5)式可知, 当  $v = v_{0L} \sqrt{\ln(v_{0S}^2/v_{0L}^2)}$  时,  $T(v)$  最小。

实验表明, 在实验中 10 V 处有透射光强最低值。当角度在  $0^\circ \sim 5^\circ$  范围内, 透射光有“漏光”现象, 故在  $3^\circ, 5^\circ$  时 10 V 处有最小光强。当角度在  $6^\circ \sim 25^\circ$  范围内时, 单散射起主要作用, 随着透射率的降低单散射几率变小, 导致单散射次数变少, 所以此时该电压下光强最弱。因此在实验中  $6^\circ, 15^\circ, 25^\circ$  角在 10 V 的时候有个光强最低值。随着角度的继续增大, 多散射贡献逐渐增大并起主要作用, 在 10 V 的时候透射率最低, 这时多散射强度最大, 所以在  $26^\circ, 35^\circ, 45^\circ$  时 10 V 处散射光强最高。

## 5 结 论

对用紫外光固化制作的 PDLC 的散射特性做了初步的实验测试和分析。结果表明, 对于入射的 440 nm 蓝光在  $0^\circ \sim 5^\circ$  范围内透射光强随电压增加而增加,  $6^\circ \sim 25^\circ$  角范围内光强随电压增加先增大后减小, 而在  $26^\circ$  角以后光强随电压增加一直减小。研究结果为今后进一步设计研制新型的 PDLC 器件提供了一定的参考。

## 参 考 文 献

- Xie Jianhui, Huang Ziqiang. Preparation of PDLC films with low-threshold voltage and high-CR[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2011, **26**(1): 49~53
- 谢建辉, 黄子强. 低阈值高对比度 PDLC 薄膜的制备[J]. *液晶与显示*, 2011, **26**(1): 49~53
- Zheng Jihong, Zhong Yangwan, Wen Ken *et al.*. Diffraction and properties of holographic polymer dispersed liquid crystal switchable lens[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(3): 1831~1838
- 郑继红, 钟阳万, 温 垦 等. 电控聚合物分散液晶全息透镜及特

- 性研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(3): 1831~1838
- Cao Xu, Liu Wenju, Wang Jie *et al.*. Matching between polymer and liquid crystal mixture in PDLC preparation [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2006, **21**(5): 414~417
- 曹 须, 刘文菊, 王 杰 等. PDLC 制备过程中聚合物和液晶的选择[J]. *液晶与显示*, 2006, **21**(5): 414~417
- Huang Ziqiang, Yang Wenjun, Zeng Bo *et al.*. Modification of scattering theory on powered nematic droplets and parameter fitting[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(5): 689~693
- 黄子强, 杨文君, 曾 勃 等. 激励态向列微滴散射理论的修正及其参量拟合[J]. *中国激光*, 2005, **32**(5): 689~693
- Ren Hongwen, Huang Ximin, Wang Zongkai *et al.*. Fabrication of PDLC grating and its optical diffractive properties[J]. *Chinese J. Light Scattering*, 1997, **9**(2-3): 352~354
- 任洪文, 黄锡珉, 王宗凯 等. 聚合物分散液晶(PDLC)光栅的制备及其光衍射特性[J]. *光散射学报*, 1997, **9**(2-3): 352~354
- Yu Tianchi, Fan Zhixin, Zhang Cuiyun *et al.*. Ideal model of polymer dispersed liquid crystal for enhanced scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1757~1760
- 于天池, 范志新, 张翠云 等. 聚合物分散液晶增强散射的理想模型[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1757~1760
- Wenbo Li, Hui Cao, Miki Kashima *et al.*. Control of the microstructure of polymer network and effects of the microstructures on light scattering properties of UV-cured polymer-dispersed liquid crystal films[J]. *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, 2008, **46**: 2090~2099
- Wang Fen, Tan Binghui, Pan Xuefeng *et al.*. Study on a kind of fluorescent switch based on PDLC[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(4): 520~523
- 王 芬, 谭炳辉, 潘雪丰 等. 一种基于聚合物分散液晶的荧光开关研究[J]. *光电子·激光*, 2011, **22**(4): 520~523
- F. Bloisi, C. Ruocchio, P. Terrecuso *et al.*. Angular dependence of light transmittance in polymer dispersed liquid crystals[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, **54**(5): 5242~5248
- Ren Hongwen, Huang Ximin, Ling Zhihua *et al.*. Orientation effects of liquid crystal molecules under electric field in PDLC film[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 1998, **13**(8): 33~39
- 任洪文, 黄锡珉, 凌志华 等. 聚合物分散液晶膜中液晶分子的电场的取向效应[J]. *液晶与显示*, 1998, **13**(8): 33~39
- G. Paul Montgomery, Jr. Angle-dependent scattering of polarized light by polymer-dispersed liquid-crystal firms[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1988, **5**(4): 774~784
- Paul S. Drzaic. Droplet density, droplet size, and wavelength effects in PDLC light scattering [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 1995, **261**(1): 383~392
- J. R. Kelly, Wei Wu. Multiple scattering effects in polymer dispersed liquid crystals [J]. *Liquid Crystals*, 1993, **14**(6): 1683~1694
- Jose A. Ferrari, Enrique A. Dalchiele *et al.*. Effect of size polydispersity in polymer-dispersed liquid-crystal films[J]. *J. Appl. Phys.*, 2008, **103**(8): 084505