

小型聚合物分散液晶薄膜光开关的研制

李雪莹¹ 曹峰梅¹ 孙云峰²

¹北京理工大学光电学院 光电成像技术与系统教育部重点实验室, 北京 100081

²北京利云技术开发公司, 北京 100192

摘要 介绍了一种新型柔性液晶薄膜光开关的设计与制作。该薄膜型光开关利用聚合物分散液晶(PDLC)材料的电光特性,实现光开关的功能。描述了光聚合引发相分离法制备小型PDLC光开关的方法,包括材料选择、工艺路线和制备流程,并给出了测试方法与对比分析结果,得到了较优的制备方法。提出并实现了小体积驱动的制作以及一种较稳固的电极引出方式。实验结果表明,直径为10 mm的圆形PDLC光开关,阈值电压为4.316 V,饱和电压为13.938 V,开启响应时间为2.6 ms,关闭响应时间为96.7 ms,对比度为11.46,具有小型、低压驱动的特点。

关键词 光学器件;光开关;光聚合引发相分离;聚合物分散液晶;薄膜;小型

中图分类号 O753.2; TN491 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.022304

Preparation of Miniature PDLC Film Optical Switch

Li Xueying¹ Cao Fengmei¹ Sun Yunfeng²

¹Key Laboratory of Photoelectronic Imaging Technology and System, Ministry of Education
School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

²Beijing Liyun Technology, Beijing 100192, China

Abstract A novel optical switching based on polymer dispersed liquid crystal (PDLC) is presented. Utilizing the electro-optic properties of PDLC, the optical switching function is realized. The PDLC films are prepared by photo-polymerization induced phase separation (PIPS), and the detailed process including the material selection, process route and preparation flow is described. The electro-optic properties of PDLC are tested, compared and analyzed, and a better preparation method is obtained. A small volume driving scheme of optical switching is proposed and realized, and a stable method to extract the electrode is given. The experimental results show that the circular optical switching diameter is 10 mm, the threshold voltage is 4.316 V, the saturation voltage is 13.938 V, the turn-on response time is 2.6 ms, the turn-off response time is 96.7 ms, and the contrast is 11.46. The optical switch has the miniature and low-voltage-driven features.

Key Words optical devices; optical switch; photo-polymerization induced phase separation; polymer dispersed liquid crystal; thin films; miniaturization

OCIS Codes 230.2090; 230.3720; 310.3840; 310.6860

1 引言

随着全光网络的迅速发展,高性能、低成本、小体积光电器件的研制越来越受到科研人员的关注。液晶(LC)光学元件具有控制电压低、电光特性优良、制作工艺简单等优点。同时,液晶在近红外光波长有高穿透率,其元件具有低插入损耗及低极化相关损耗,并且有着很大的工作带宽与便于小型化的优势,使得基于液晶材料的光电器件在波分复用光通信系统中具有重要的应用前景。

20世纪80年代中期聚合物分散液晶(PDLC)材料的出现开辟了液晶领域研究的新阶段^[1-6],使用PDLC制作光学器件是当前的研究热点^[7-13]。使用PDLC材料的可变光衰减器,在国外大都是采用平面光波导型或光纤

收稿日期: 2013-09-02; 收到修改稿日期: 2013-10-29; 网络出版日期: 2014-01-19

作者简介: 李雪莹(1989—),女,硕士研究生,主要从事光学材料方面的研究。E-mail:lixu_bit@163.com

导师简介: 曹峰梅(1970—),女,博士,副教授,主要从事光电成像方面的研究。E-mail:liuba@bit.edu.cn

(通信联系人)

玻璃毛细管进行研究, Oudlette^[11]实现了平面光波导型阵列化器件的制作。仲志成等^[12]采用体硅微细加工技术制作了液晶可变光衰减器原型器件, 驱动电压范围9~57 V。郑继红等^[13]研究了PDLC材料在1550 nm的电光特性, 并制作了在此波段下工作的PDLC光衰减器样品, 线性工作区域为20~70 V, 工作电压较高。

目前PDLC光学器件存在驱动电压高且体积大的问题, 使得对其的研究仍局限在实验室阶段。针对以上问题, 本文介绍了一种基于PDLC材料的小型结构柔性光开关, 它由电极薄膜、PDLC材料和小型驱动部件组成。采用不同面电阻的电极薄膜和不同尺寸的玻璃微珠, 通过光聚合引发相分离(PIPS)制备PDLC薄膜, 并对其进行了测试与对比分析, 选取了合适的材料制备出PDLC光开关。该种薄膜型光开关的特点是结构简单, 采用激光切割技术进行切割, 形状多变体积小, 驱动电压低, 电极稳固。

2 薄膜型PDLC光开关的制作

2.1 工艺路线和制备流程

采用紫外光引发相分离法制备PDLC薄膜, 制备流程如图1所示。首先, 调配出液晶预聚物溶液后, 通过电磁振动(EMS)使其混合均匀; 其次, 采用辊压法对氧化钢锡(ITO)-聚对苯二甲酸类塑料(PET)进行液晶灌注, 通过紫外光固化法(PIPS), 控制一定的光强、温度与固化时间, 制备出均匀的PDLC薄膜; 再次, 采用激光切割的方法对其进行分割, 得到小面型的液晶薄膜, 通过控制激光功率与切割速度, 分离出单层的ITO-PET作为电极部分; 最后, 给电极加上金属引脚引出与驱动模块相连。

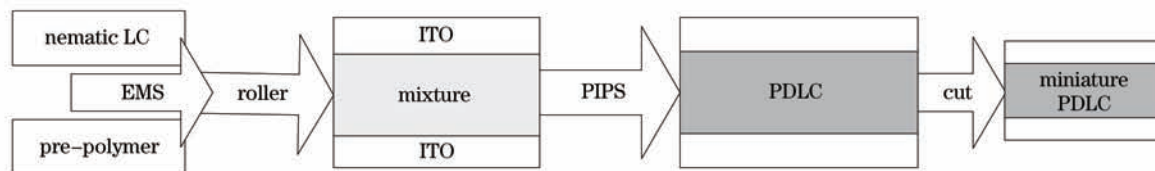


图1 PDLC薄膜制备流程

Fig.1 Preparation process of PDLC film

2.2 PDLC的制备

2.2.1 PDLC配方选择与用量

实验中采用的液晶材料为SLC1717(双折射 $\Delta n = n_e - n_o = 0.201$, 清亮点温度 $TN-I=365$ K, 石家庄永生华清液晶有限公司); 选择的光聚合单体为丙烯酸-3,5,5-三甲基己酯(TMHA)、1,4-丁二醇二丙烯酸酯(BDDA)、甲基丙烯酸异冰酯(IBMA, Sigma - Aldrich)、聚乙二醇二丙烯酸酯600(PEGDA600, SATOMER); 选择的光引发剂材料为安息香双甲醚(Irgacure 651, 靖江宏泰化工有限公司)^[14]。

为得到低压驱动的效果, 将聚合物单体与液晶按4:6的质量比例混合^[13]。如表1所示按质量比将TMHA(12%)、BDDA(4%)、IBMA(20%)、PEGDA600(4%)、液晶1717(60%)配成均相溶液, 按光聚合单体总质量的5%加入光引发剂Irgacure 651, 按总质量的0.5%加入玻璃微珠。将配好的溶液置于震荡台上震荡至均相。

表1 配方及用量(质量分数, %)

Table1 Formula and amounts (mass fraction, %)

TMHA	BDDA	IBMA	PEGDA600	LC1717
12	4	20	4	60

2.2.2 样品制备

选择市面上主流的三种不同面电阻的ITO-PET材料, 面电阻值分别为45, 100, 110 Ω/cm^2 。选择三种不同尺寸的玻璃微珠, 直径分别为7, 20, 45 μm 。按表2参数选择玻璃微珠与ITO面电阻, 采用辊压法制备五组样品A、B、C、D、E。利用滴管吸取少量样品均匀涂于ITO-PET膜镀有ITO面的一端, 将另一张ITO-PET从该端开始缓慢覆盖其上, 使两ITO面相对, 盖好后使用滚压设备将其顺同一方向滚压一次。压均匀的液晶膜置于紫外光下固化, 紫外光强采用2 mW/cm^2 , 温度控制在0 $^\circ\text{C}$, 固化时间为10 min。

2.2.3 PDLC切割

通过控制激光功率与激光切割速度, 切割出小型PDLC与电极部分。

表2 样品制备参数

Table 2 Parameters for sample preparation

Number	Thickness / μm	ITO sheet resistance /(Ω/cm^2)
SampleA	7.5	45
SampleB	20	45
SampleC	45	45
SampleD	20	110
SampleE	20	100

激光能量密度与激光功率的关系为

$$P = \frac{\sigma \times S}{t},$$

式中 P 为激光功率, σ 为激光能量密度, S 为激光照射面积, t 为激光照射时间。

切割时需要考虑激光强度对液晶与电极材料的损伤情况。由上式可以看出,根据切割机激光聚集点光斑的面积与激光能量密度,通过控制激光照射时间(即切割速度),可以达到控制激光功率大小的目的。

使用最大输出功率 60 W 的 CO_2 功率可调激光切割机(东莞振华电子科技有限公司)进行分割,电极部分仅需切割下单层的 ITO-PET 膜,且不能破坏另一层的 ITO 层。切穿 PDLC 薄膜与电极部分的激光参数按表 3 设置。实验表明,采用该种切割方法不会损伤液晶与光开关的效果,且可获得任意形状和大小的 PDLC 光开关。

表3 激光参数设置

Table3 Laser parameters

Material	Laser power /W	Cutting speed /(mm/s)
PDLC	13.5	170
Electrode	7	200

2.2.4 PDLC 电极引出

目前 PDLC 电极多采用导电胶布与铜网引出,常因接触不良导致驱动出现问题,且 PDLC 的面型越小,电极引脚越小,引出越困难。针对此现象设计并实现了一种新型的电极引出方式。采用环氧树脂与银粉(南京中贝电子有限公司,体电阻 $5 \times 10^{-3} \Omega/\text{cm}^3$)按质量比 1:10 混合搅拌 10 min 以上直至均匀,将配成的胶体涂覆于铜电极与 ITO 电极上,厚度为 0.1~0.2 mm,然后将铜电极与 ITO 电极合拢,并使用夹具夹好,在室温下固化 5 h。

经应力测试,结果表明此方法制作的电极引脚较为稳固,抗剪性大于 50 kg/cm^2 ,可在铜电极上外接导线与驱动电路相连。

3 PDLC 测试

PDLC 膜的光开关作用是通过电场控制来实现的,如图 2 所示。聚合物为折射率各向同性材料,折射率为 n_o ,而液晶为各向异性材料,具有寻常光折射率 n_o 和非寻常光折射率 n_e 。聚合物的折射率与液晶材料寻常光的折射率 n_o 大致相等。在零电场条件下,液晶微滴的指向矢随机分布,液晶微滴和聚合物的折射率不相同,光线通过液晶膜时发生散射,称为关态;当施加足够高的电场时,液晶分子指向矢平行于电场方向,此时液晶微滴的寻常光折射率 n_o 与聚合物的折射率 n_p 近似相等,入射光线不会发生散射,光线透过液晶膜,称为开态^[5]。根据以上性质,通过 LCT-5016C 液晶综合参数仪(长春联诚仪器有限公司)对 PDLC 的电光性能进行测试。测试仪结构如图 3 所示。

该测试系统主要包括主机、计算机、信号系统三部分。该系统计算机的输出信号经过信号放大器来驱动 PDLC 薄膜,将外电场加在 PDLC 膜的 ITO 透明电极上。该系统的显微镜装备有一个光敏二极管,以便记录透过样品的光线强度的变化情况并输入计算机系统。测试样品时将制得的样品放在偏光显微镜下,对样品施加一个连续变化的电场,记录样品透射率随着电场的变化。对所得的 PDLC 薄膜材料的透射率以空

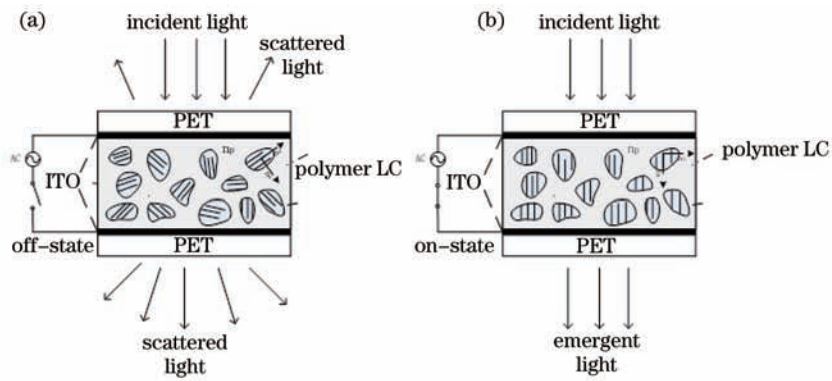


图2 PDLC结构与工作原理

Fig.2 Construction and principle of PDLC optical switch

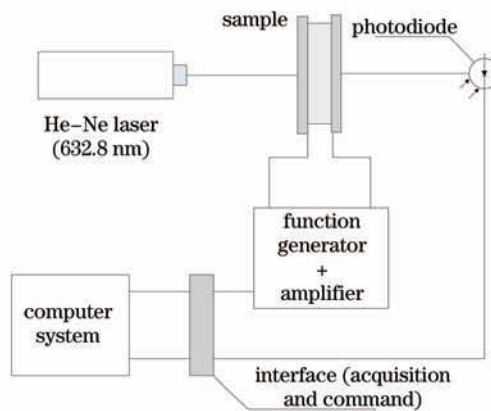


图3 液晶综合参数测试仪结构图

Fig.3 Schematic of LC integrated parameters tester

气的透射率为 100%做归一化处理。

3.1 薄膜厚度对 PDLC 薄膜的影响

对样品 A、B、C 进行 PDLC 薄膜电光性能测试,获得电压-透射率曲线如图 4 所示。PDLC 电光参数如表 4 所示,其中 V_{th} 表示阈值电压, V_{sat} 表示饱和电压, T_{min} 表示最小透射率, T_{max} 表示最大透射率, C_r 表示对比度, T_{on} 表示开启响应时间, T_{off} 表示关闭响应时间。

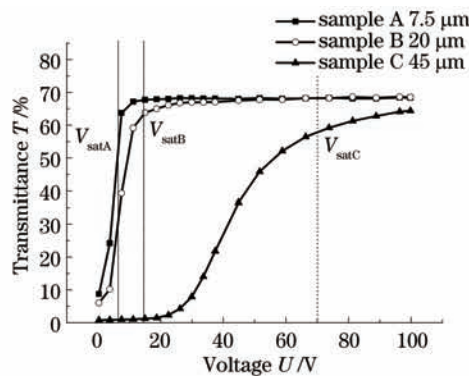


图4 不同膜厚 PDLC 样品的 U-T 曲线

Fig.4 Transmittance test curves of PDLC samples of different film thicknesses

根据以上数据可以得到,在所研究的比对方案中,玻璃微珠尺寸越大,膜厚越大,对比度随之增大,但驱动电压也显著增大。7.5 μm 的玻璃微珠驱动电压虽低,但是关态时的透射率太高,对比度太低。选择玻璃微珠尺寸为 20 μm 制备的 PDLC 驱动电压与对比度相对理想,可以满足光开关与低驱动的效果。

3.2 ITO-PET 面电阻对 PDLC 薄膜的影响

对样品 D、E、B 进行 PDLC 薄膜电光性能测试,获得电压-透射率曲线如图 5 所示。PDLC 电光参数如表 5

表4 不同膜厚PDLC样品的电光参数

Table 4 Electro-optic properties of PDLC samples of different film thicknesses

Thickness / μm	V_{th} /V	V_{sat} /V	V_{min} /%	V_{max} /%	V_r	V_{on} /ms	V_{off} /ms
7.5	2.774	7.257	8.74	68.51	7.83	2.3	61.5
20	4.316	13.938	5.98	68.53	11.46	2.6	96.7
45	29.436	70.059	0.792	64.44	81.34	4.9	12.4

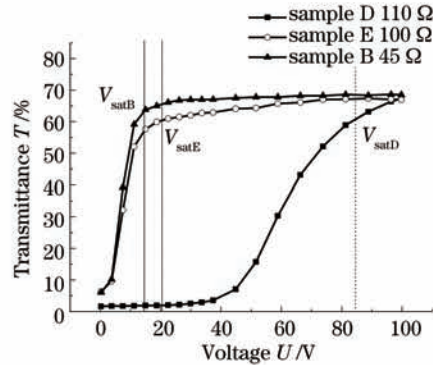


图5 不同ITO面电阻的PDLC样品的U-T曲线

Fig.5 Transmittance test curves of PDLC samples prepared by different ITO-PETs

所示。

根据以上数据可以得到,在所研究的比对方案中,ITO的面电阻越高,驱动电压越大,这是由于外加的驱动电压在ITO面上存在一定的压降,且ITO面电阻越大,压降越大,加在聚合物液晶膜两侧的电压越小,导致驱动电压越大。

表5 不同ITO面电阻的PDLC样品的电光参数

Table5 Electro-optic properties of PDLC samples prepared by different ITO-PETs

ITOsheet resistance /(Ω/cm^2)	V_{th} /V	V_{sat} /V	T_{min} /%	T_{max} /%	C_r	T_{on} /ms	T_{off} /ms
110	46.135	84.34	1.62	67.29	41.63	2.9	12
100	4.764	21.461	6.30	67.57	10.73	2.2	126.4
45	4.316	13.938	5.98	68.53	11.46	2.6	96.7

测试结果表明,采用面电阻 $45 \Omega/\text{cm}^2$ 的ITO-PET膜制备的PDLC效果较理想,阈值电压为4.316 V,饱和电压为13.938 V。采用 $20 \mu\text{m}$ 的玻璃微珠, $45 \Omega/\text{cm}^2$ 的ITO-PET膜制备了直径为10 mm的PDLC光开关,其开关状态如图6所示。

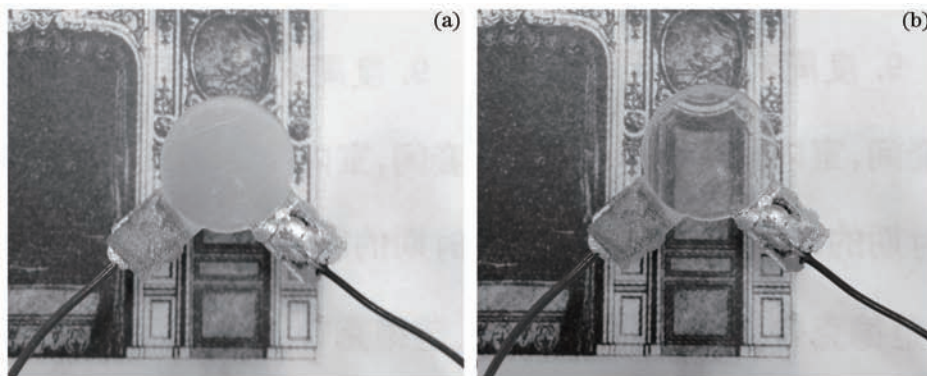


图6 PDLC开关态对比。(a)关态;(b)开态

Fig.6 (a) On-state and (b) off-state of PDLC optical switch

4 PDLC 驱动设计

采用 $20 \mu\text{m}$ 玻璃微珠,面电阻 $45 \Omega/\text{cm}^2$ 的ITO-PET制备的PDLC薄膜,针对其参数设计驱动电路。设

计出的驱动电路输出电压幅值 ± 20 V的方波,驱动频率为50 Hz。设计框图如图7(a)所示。

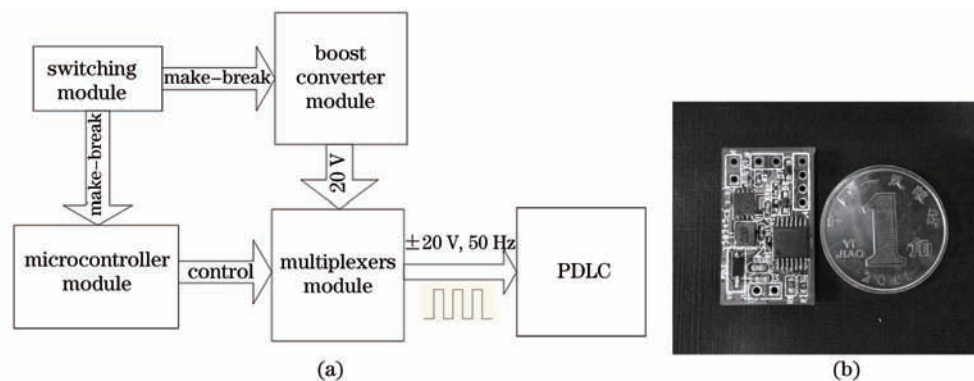


图7 PDLC驱动。(a)驱动框图;(b)驱动实物图

Fig.7 Driving diagram of PDLC. (a) Driver diagram; (b) photograph

该驱动包括四个模块,分别为开关模块、升压模块、单片机模块和多路传输模块。开关模块采用键位开关、金属氧化物半导体(MOS)管等控制3.7 V供电电压的通断与稳压。升压模块采用直流-直流(DC-DC)升压器将供电电压从3.7 V放大到20 V。单片机模块采用MSP430系列单片机,通过C语言编程控制其产生时序波形,用来控制多路传输器。多路传输模块通过单片机的控制,输出频率为50 Hz,幅值为 ± 20 V的方波。

通过印刷电路板(PCB)设计,最终设计出尺寸为22.6 mm \times 13.3 mm的印刷电路板,为目前用于驱动PDLC的较小的驱动模块,如图7(b)所示。由于PDLC驱动时几乎无电流产生,不存在散热问题,且仅需3.3~3.7 V的供电电压,因此普适性较高,易于整合到其他电路中。

5 结 论

利用PDLC材料,研制出一种完整的PDLC柔性光开关,具有小型、低电压驱动的特点,该种光开关工作时无需偏振片,且制备时不需要对薄膜进行取向处理,设计简单,结构小巧。通过控制分子链较长的聚合物单体与分子链较短的聚合物单体的配比,得到了驱动电压较低的PDLC材料,这是由于分子链长的聚合物单体含量的增加会导致PDLC材料的聚合物网眼增大;聚合物网眼的增大引起PDLC材料电光性能发生变化,阈值电压、饱和电压和开态响应时间的值随聚合物网眼结构的增大而减小。通过电光性能测试,得到其阈值电压为4.316 V,饱和电压为13.938 V,开启响应时间为2.6 ms,关闭响应时间为96.7 ms,对比度为11.46。该光开关具有小型驱动模块,电路面积仅为22.6 mm \times 13.3 mm,与目前市面上驱动电压高达75 V的PDLC模块相比,驱动电压仅为20 V,因此功耗更低,体积更小。针对小型PDLC光开关,提出了一种新型的电极引出方式,加强了电极引脚与电路部分的接触,且稳固性较高。作为光学器件,该种薄膜光开关在光学耦合器、光控开关、电子窗帘及波分复用光通信系统等方面具有广泛的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Doane J W. Polymer Dispersed Liquid Crystal Displays. In Bahadur B(ed.) Liquid Crystals-Applications and Uses [M]. Singapore: World Scientific Publishing, 1990. 361-395.
- 2 Drzaic P S. Polymer dispersed nematic liquid crystal for large area displays and light valves [J]. J Appl Phys, 1986, 60 (6): 2142-2148.
- 3 Seeboth A. Orientation layers for liquid crystals in liquid crystal displays [J]. Displays, 1999, 20(6): 131-136.
- 4 Spruce G, Pringle R D. Polymer dispersed liquid crystal (PDLC) films [J]. Electronics & Communication Engineering Journal, 1992, 4(2): 91-100.
- 5 Schadt M. Liquid Crystal Displays In Stegemeyer H (ed.) Liquid Crystals [M]. New York: Springer, 1994. 195-226.
- 6 Kato K, Tanaka K, Date M. Reflective liquid crystal color display technologies [J]. Electronics and Communications in Japan, 1998, 81(8): 32-40.
- 7 Fan Zhixin, Xie Yijun, Wei Xiangdong, *et al.*. Piezo-optical effect of polymer dispersed liquid crystal films [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0131005.

- 范志新, 解一军, 魏向东, 等. 聚合物分散液晶膜的压光效应[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0131005.
- 8 Li Zhenyuan, Fan Zhixin, Li Jinwei, et al.. Polarization microscopy study on piezo-optical effect of polymer dispersed liquid crystal films [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(8): 0816001.
- 黎振远, 范志新, 李金伟, 等. 用偏光显微术研究聚合物分散液晶压光效应膜[J]. 光学学报, 2011, 31(8): 0816001.
- 9 Zhang Menghua, Zheng Jihong, Tang Pingyu, et al.. High efficiency nano-silver-doped holographic polymer dispersed liquid crystal grating [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(1): 0105002.
- 张梦华, 郑继红, 唐平玉, 等. 纳米银掺杂的高效率全息聚合物分散液晶光栅制备[J]. 光学学报, 2013, 33(1): 0105002.
- 10 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.
- 11 Oudlette F. Dispersion cancellation using linearly chirped Bragg grating filters in optical waveguide [J]. Opt Lett, 1987, 12(10): 847-849.
- 12 Zhong Zhicheng, Liu Caixia, Zhang Xindong, et al.. A novel variable optical attenuator based on PDLC [J]. Chinese J Sensors and Actuators, 2006, 19(5): 1744-1746.
- 仲志成, 刘彩霞, 张歆东, 等. 基于PDLC的可变光衰减器的研制[J]. 传感技术学报, 2006, 19(5): 1744-1746.
- 13 Zheng Jihong, Gu Lingjuan, Zhang Xingde, et al.. The study of electrooptical characteristics of polymer dispersed liquid crystal at 1550 nm [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 25(8): 1095-1098.
- 郑继红, 顾玲娟, 张兴德, 等. 聚合物弥散液晶材料在 1550 nm 的电光特性研究[J]. 光学学报, 2005, 25(8): 1095-1098.
- 14 Kasima Miki. The Effect of Molecular Structure of Curable Monomerson Electro-Optical Properties of PDLC Film [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2010. 26-28.
- 鹿岛美纪. 聚合单体分子结构对聚合物分散液晶膜的电光性能的影响[D]. 北京: 北京科技大学, 2010. 26-28.
- 15 P C Wang, A G MacDiarmid. Integration of polymer-dispersed liquid crystal composites with conducting polymer thin films toward the fabrication of flexible display devices [J]. Displays, 2007, 28(3): 101-104.