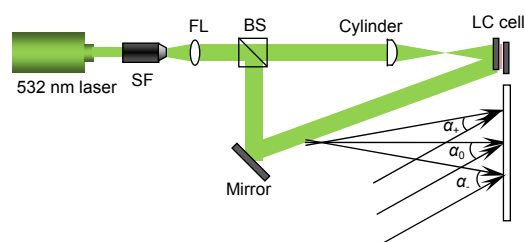




聚合物分散液晶电控全息变间距光栅

陆飞跃*, 郑继红, 王康妮, 高辉, 庄松林

教育部光学仪器与系统工程研究中心; 上海市现代光学系统重点实验室; 上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093



摘要: 本文报道了一种基于聚合物分散液晶的电控全息变间距光栅。采用柱面波和平面波干涉得到具有变间距的干涉条纹, 并将此条纹记录于聚合物分散液晶材料中。实验分析研究了该光栅的空间频率、衍射特性和电场调控特性。光栅的空间频率变化范围和趋势与理论计算公式相匹配, 实验结果表明光栅衍射效率与曝光光强和时间存在一定的关系。空间频率在 $530 \text{ mm}^{-1} \sim 650 \text{ mm}^{-1}$ 内的光栅衍射效率能达到 70% 以上。光栅的阈值电压为 $2.4 \text{ V}/\mu\text{m}$, 上升沿和下降沿时间分别为 $300 \mu\text{s}$ 和 $750 \mu\text{s}$ 。该光栅不但具备了普通变间距光栅的优点, 而且还具备了聚合物分散液晶的电场调控的特性, 在光纤通信, 光电探测及光谱探测等领域具有一定的应用前景。

关键词: 液晶; 全息光栅; 电控; 变间距; 光学器件

中图分类号: TN253

文献标志码: A

Electrically controlled holographic varied line-spacing grating based on polymer dispersed liquid crystal

Feiyue Lu*, Jihong Zheng, Kangni Wang, Hui Gao and Songlin Zhuang

Engineering Research Center of Optical Instrument and System, Ministry of Education; Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System; School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China

Abstract: Electrically controlled holographic varied-line-spacing (VLS) grating based on polymer dispersed liquid crystal (PDLC) is reported. Varied-line-spacing interference pattern is generated through interference between cylindrical wave and plane wave, and recorded in PDLC. Characteristics, such as spatial frequency, diffraction and electric-optic, are analyzed by experiments. The results show that the trend and range of grating period match well with the theoretical simulation. The relationships between diffraction efficiency and exposure intensity as well as exposure time are studied. The grating diffraction efficiency can be achieved more than 70% with spatial frequency from 530 mm^{-1} to 650 mm^{-1} . Meanwhile, the grating has good electrically controlled property. The threshold voltage is $2.4 \text{ V}/\mu\text{m}$, and the rise time and fall time are $300 \mu\text{s}$ and $750 \mu\text{s}$, respectively. The grating not only has advantages of ordinary VLS grating but also has electric-optic characteristics of PDLC. It has potential applications in the fields of optical fiber communication, photoelectric detection and spectrograph.

Keywords: liquid crystals; holographic gratings; electric control; varied line-spacing; optical devices

DOI: 10.3969/j.issn.1003-501X.2017.03.011

Citation: *Opto-Elec Eng*, 2017, **44**(3): 351–355

收稿日期: 2016-08-30; 收到修改稿日期: 2016-11-06

* E-mail: feiyuelu@126.com

1 引言

变间距光栅由于具有自聚焦、像差校正、高分辨率等优点^[1-2],近年来被广泛研究。由于光栅间距的变化,同一波长的入射光在不同的间距处产生的衍射角不同,从而实现了聚焦和产生像散的作用。国内的研究始于八十年代,刘正坤等^[3]分析计算了不同条件下变间距光栅的衍射特性,并设计了变间距光栅的传感器;靳飞飞等^[4]利用光栅扫描电子束光刻的方法制作得到自聚焦的变间距光栅,利用其同时具有的色散和聚焦双重作用应用于光谱分析。国内已报道制作变栅距光栅的方法主要是机械刻划和全息光刻^[5-6]两种。由于机械加工精度不够高,操作复杂,所以其空间频率不可能做得很高,制作成本也相对较高。而传统的全息光刻法制备的变间距光栅,其光学性能不能实时调控^[7-8]。本文中,利用电控的聚合物分散液晶(polymer dispersed liquid crystal, PDLC)作为全息干涉条纹的记录材料,制备得到电控可调谐变间距光栅。

PDLC 是由高分子的聚合物单体和低分子的液晶均匀混合而成^[7-9]。将其放置在两束相干光形成的干涉场中,在亮条纹处聚合物单体吸收能量发生聚合反应,迫使液晶向暗条纹处扩散,随着反应的进行,最终得到了聚合物(亮条纹)和液晶(暗条纹)交替的周期性变化光栅。本文通过实验验证了 H-PDLC 变间距光栅周期的理论计算公式,研究分析了光栅的一级衍射效率、阈值驱动电压以及响应时间,并且通过改变曝光时间和强度,进一步优化了光栅的性质。由于液晶的电场调控特性^[10-12],用聚合物分散液晶材料制备的体全息变间距光栅,不但具备了普通变间距光栅的特性,而且继承了空间频率高、衍射效率电场可调、响应时间快等优点。

2 变间距光栅的制作

陈建文等^[13]就提出了在全息干涉仪的一条光路中插入一柱透镜,使得由柱面镜透射的物光与另一条光路中的平面参考光发生干涉,得到条纹间距可变的干涉图形。利用波动理论,推导并得出干涉条纹间距:

$$d = \frac{1}{v_x} = \frac{\lambda}{\frac{n-1}{D(n-1)-R}x_i + \sin\alpha} \quad (1)$$

式中: v_x 为光栅的空间频率, λ 为激光波长, n 为柱透镜折射率, D 为柱透镜到全息记录平面的距离, R 为柱透镜的曲率半径, x_i 定义为干涉图样的横坐标,该

坐标与条纹方向垂直,其中 $x_i=0$ 对应干涉图样的中心位置, α 为两束光的夹角。利用 Matlab 模拟仿真,当 $\lambda=532 \text{ nm}$, $n=1.5$, $D=40.01 \text{ cm}$, $R=20 \text{ cm}$, $\alpha=17.55^\circ$ 时的干涉图样如图 1,从图 1 中可以看出,随着 x_i 的增大,周期 d 逐渐减小,即空间频率逐渐增大。

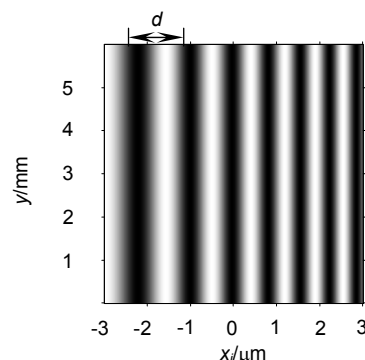


图 1 变间距干涉条纹模拟图。

Fig. 1 Simulated interference pattern of varied-line-spacing stripe.

在制备 H-PDLC 变间距光栅的实验中,将光引发剂 Rose Bengal、协引发剂 N-phenyl glycine、交联剂 N-vinyl pyrrolidone、表面活性剂 S-271、纳米银颗粒(直径 50 nm)、丙烯酸单体 EB8301、向列液晶(99.9% TEB50+0.1%CB15 的混合液晶)按 0.3:0.8:20:20:0.1:90:70 比重在避光条件下用超声乳化仪混合加热均匀,在暗室中静置 24 h~48 h 后,得到纳米银掺杂的 PDLC。

将上述材料填充到镀有氧化铟锡(indium tin oxide, ITO)导电膜的液晶盒中,液晶盒厚度控制为 20 μm ,将制作好的液晶盒放在 532 nm 光场中进行曝光。实验光路如图 2 所示,出射激光经过扩束准直系统扩束为直径 2 cm 的准直光,通过分光棱镜分成两束光,其中一束光经全反射镜调整,使两束光中心夹角为 $\alpha_0=17.55^\circ$,另一束光经过柱透镜后到达样品表面,柱透镜到样品表面的距离 $D=43.5 \text{ cm}$,最后两束光在样品表面形成变间距的干涉条纹。

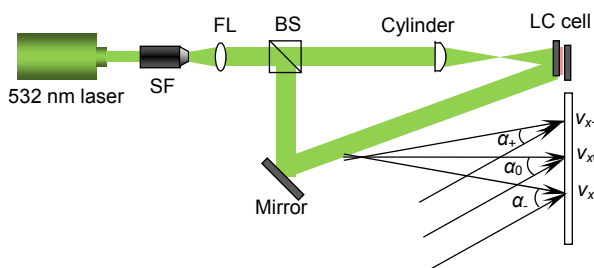


图 2 制作 H-PDLC 变间距光栅的全息光路。

Fig. 2 Experimental setup for fabricating VLS H-PDLC.

图2中, 两束光的夹角从上到下分别为 α_+ 、 α_0 、 α_- , 对应的干涉条纹空间频率依次为 ν_{x+} 、 ν_{x0} 、 ν_{x-} 。由于夹角 $\alpha_+ < \alpha_0 < \alpha_-$, 根据式(1), 在样品表面光栅空间频率 $\nu_{x+} > \nu_{x0} > \nu_{x-}$ 。

3 变间距光栅的性能测试

为了研究全息聚合物分散液晶(holographic polymer dispersed liquid crystal, H-PDLC)变间距光栅的特性, 主要做了以下的实验: 1) 测量变间距光栅的空间频率以验证实验数据与理论公式的匹配程度, 改变参数 D 、 α 的值, 探究其对 ν_{x+} 、 ν_{x0} 、 ν_{x-} 以及 $\Delta\nu_x = \nu_{x+} - \nu_{x-}$ 的影响; 2) 曝光强度和曝光时间对光栅衍射效率的影响; 3) 光栅的电控特性的测量。

3.1 光栅空间频率

将曝光好的液晶盒放在如图3所示的测试光路中。波长为532 nm的激光入射到样品上产生衍射, 为了得到光栅的空间频率, 测量0级透射光与+1级衍射光之间的距离 a 和样品到观察屏的距离 b , 计算得出一级衍射角 $\theta = \arctan(a/b)$, 根据光栅周期公式

$d \sin \theta = m\lambda$ 得出光栅空间频率 $\nu_x = 1/d = \sin \theta / \lambda$ 。调节移动平台, 步长 $\Delta x = 1 \text{ mm}$, 测量不同 x_i 对应的衍射角, 计算并绘制光栅空间频率 ν_x 随 x_i 变化的曲线。

本实验中使用的柱透镜的折射率 $n=1.516$ 、 $f'=200 \text{ mm}$, 图4为当 $D=43.5 \text{ cm}$, $\alpha=17.55^\circ$ 时, 实际测得的光栅空间频率与式(1)计算得到的理论空间频率的对比曲线, 曲线是理论的空间频率曲线, 圆圈为实验测得的数据点, 结果表明所制备的H-PDLC变间距光栅的空间频率变化与理论值基本相符。

为了调整光栅空间频率的变化范围以满足实际需要, 实验制备了当距离 D 恒定、 α 角变化时的光栅, 以及 α 恒定、 D 变化时的光栅, 同时模拟了两种条件下光栅空间频率的理论变化曲线如图5(a)和5(b)。从图中可看出, 当 $D=43.5 \text{ cm}$, α 分别为 17.55° 和 20.18° 时, 光栅空间频率的中心值 ν_{x0} 发生变化, 而 $\Delta\nu_x$ 几乎不变; 当 $\alpha=17.55^\circ$, D 分别为 37.2 cm 和 43.5 cm 时, 光栅空间频率的中心值 ν_{x0} 不发生变化, 而空间频率变化范围 $\Delta\nu_x$ 变化明显。因此, 可以通过调整 α 和 D 来改变H-PDLC变间距光栅的空间频率变化范围。

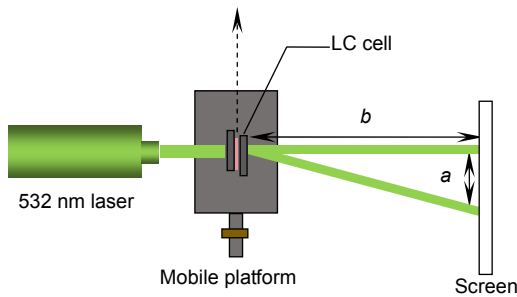


图3 变间距光栅的空间频率测量图。

Fig. 3 Measurement setup for line-spacing of grating.

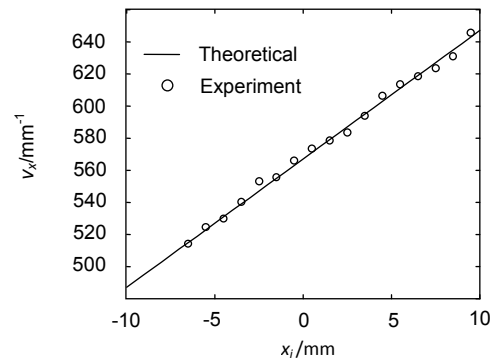


图4 光栅的空间频率变化曲线。

Fig. 4 Varied curve for line-spacing of grating.

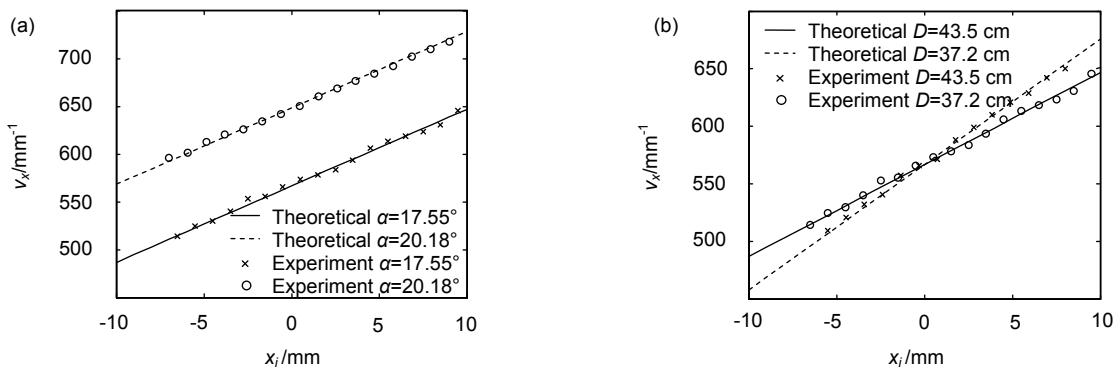


图5 不同参数下的光栅空间频率对比曲线。(a) $D=43.5 \text{ cm}$, $\alpha=17.55^\circ$ 和 20.18° 。(b) $\alpha=17.55^\circ$, $D=37.2 \text{ cm}$ 和 43.5 cm 。
Fig. 5 Line-spacing variation with different fabrication parameters. (a) $D=43.5 \text{ cm}$, $\alpha=17.55^\circ$ and 20.18° . (b) $\alpha=17.55^\circ$, $D=37.2 \text{ cm}$ and 43.5 cm .

3.2 光栅效率

衍射效率是决定光栅质量的主要参数,决定衍射效率的因素有很多,如材料配方、曝光时间、曝光光强等。因此针对曝光时间和曝光强度两个因素通过多组实验优化了光栅的衍射效率。实验中,使用波长为 532 nm 的激光垂直入射到液晶盒表面,分别探测光栅的 0 级透射光和+1 级衍射光光强,如图 6 所示。

本文中衍射效率的计算公式为 $\eta = I_1 / (I_0 + I_1)$, 式中 I_0 表示 0 级透射光强, I_1 表示+1 级衍射光强。调节移动平台,使激光入射到样品的不同位置,测得不同空间频率下的衍射效率。图 7 为曝光强度为 10 mW/cm²、15 mW/cm²、20 mW/cm²、28 mW/cm² 时,光栅的衍射效率曲线。当曝光强度为 10 mW/cm² 时,光栅衍射效率很低,此时材料没有充分反应;继续增强曝光强度,衍射效率逐渐升高;当增加到 20 mW/cm² 时,衍射效率达到最高,此时材料充分反应,随着光强的提升,光栅的散射增加,损耗增大,衍射效率下降。图 8 为曝光时间为 90 s、105 s、120 s、135 s 时,光栅的衍射效率曲线。随着曝光时间的增加,衍射效率不断提升,当增加到 120 s 时,衍射效率达到最高,

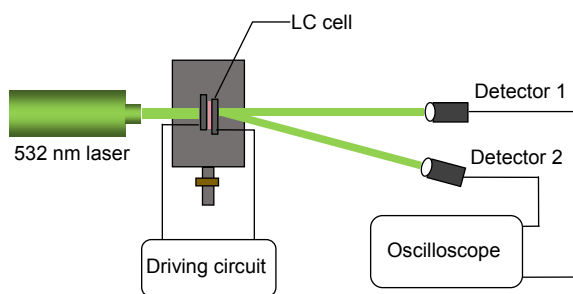


图 6 光栅衍射效率及光电特性测量光路图。

Fig. 6 Measurement setup for diffraction efficiency and electric-optic characteristic of grating.

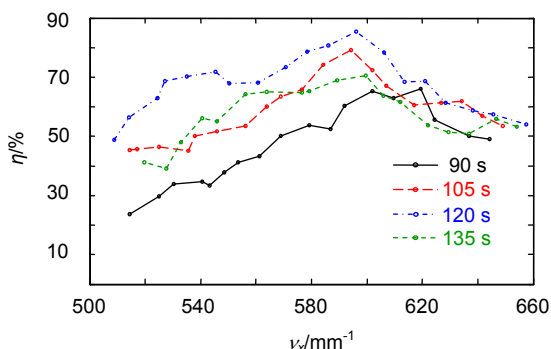


图 8 不同曝光时间的光栅衍射效率图。

Fig. 8 Diffraction efficiency of gratings with different exposure time.

此时材料充分反应,继续增加光强会使得光栅曝光过量。因此,当曝光时间为 120 s,曝光强度为 20 mW/cm² 时,可以制得平均衍射效率最高为 76% 的变间距光栅。

3.3 驱动电压与响应时间

为了测试 H-PDLC 变间距光栅的电控特性,在样品两端加上频率为 50 Hz 的可变电压,电压逐渐增加,测量光栅中心位置在不同电压下的衍射效率变化曲线,光栅中心位置的间距约为 1728 nm,空间频率为 578/mm⁻¹,如图 9 所示。实验中,测得当液晶盒两端电压加到 48 V 时,衍射效率降低为初始效率的 90%,由此计算得到阈值电压为 2.4 V/ μm 。当电压继续增大到 80 V 左右时,衍射效率降低到 7%,此后继续增大电压,衍射效率不再随电压的增大而改变。

响应时间同样是评价 H-PDLC 光栅的重要参数之一。在液晶盒两端加载 50 Hz、100 V 的交流电压,用光电探测器接收一级衍射光,并将衍射信号输入示波器,得到该光栅的响应时间。从图 10 中可以看出, H-PDLC 变间距光栅的响应时间小于 1 ms,其中上升沿时间约为 300 μs ,下降沿时间约为 750 μs 。

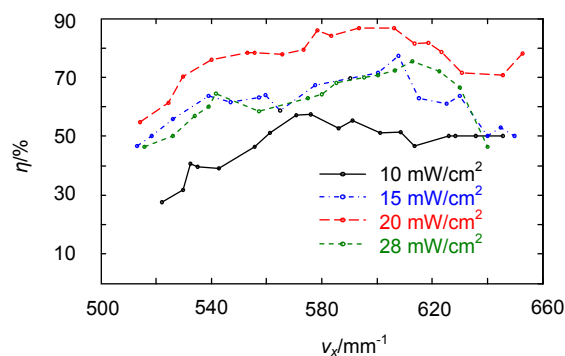


图 7 不同曝光强度的光栅衍射效率图。

Fig. 7 Diffraction efficiency of gratings with different exposure intensities.

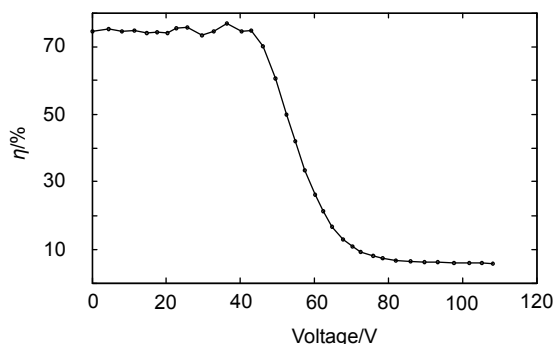


图 9 衍射效率随驱动电压的关系曲线。

Fig. 9 Measured diffraction efficiency as a function of driving voltage.

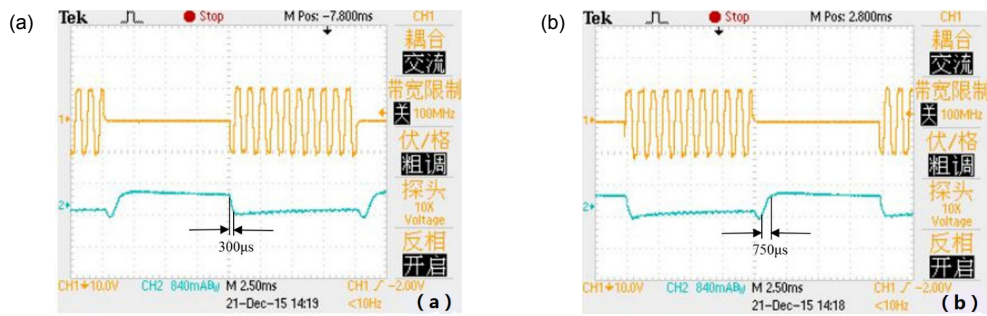


图 10 光栅的响应时间测量图。(a) 上升沿时间。(b) 下降沿时间。

Fig. 10 Measured response time of gratings. (a) Rise time. (b) Fall time.

4 结论

实验制备了电控的 H-PDLC 变间距光栅, 当曝光时间为 120 s、曝光强度为 20 mW/cm^2 时制得了平均衍射效率为 76% 的变间距光栅, 该光栅的阈值电压为 $2.4 \text{ V}/\mu\text{m}$, 响应时间能够控制在 1 ms 以下。该光栅同时具备变间距光栅栅距可调和 H-PDLC 衍射电控的优点, 在光纤通信尤其是波分复用、全光开关领域具有一定的前景, 此外在光谱分析、光电探测领域的应用研究也具有重要的意义。

基金项目

上海市教育委员会科研创新项目(14ZZ138); 上海市重点学科项目第三期项目资助(S30502)。

参考文献

- Hall J T. Focal properties of a plane grating in a convergent beam[J]. *Applied Optics*, 1966, **5**(6): 1051–1055.
- Shi Lun, Hao Defu. Theory and applications of varied line-space gratings[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2001, **9**(3): 284–287.
时轮, 郝德阜. 变栅距衍射光栅的原理及应用[J]. *光学精密工程*, 2001, **9**(3): 284–287.
- Liu Zhengkun, Tan Xin, Xu Xiangdong, et al. Study on resolving power of varied line-space grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(7): 1153–1157.
刘正坤, 谭鑫, 徐向东, 等. 变栅距光栅光谱分辨研究[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(7): 1153–1157.
- Jin Feifei, Liu Shibing, Zhu Xiaoli, et al. Design, fabrication and self-focusing properties of varied line-space grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(11): 48–52.
靳飞飞, 刘世炳, 朱效立, 等. 自聚焦变栅距光栅设计、制作及特性研究[J]. *光电工程*, 2009, **36**(11): 48–52.
- Shi Lun, Hu Dejin, Hao Defu. Phase scanning method for fabricating varied line-space gratings[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2004, **31**(11): 35–38.
时轮, 胡德金, 郝德阜. 相位扫描法制作变栅距光栅[J]. *光电工程*, 2004, **31**(11): 35–38.
- Lou Jun, Liu Ying, Fu Shaojun, et al. Design of varia-

ble-line-space plane gratings with holographic recording[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, **5636**: 551–559.

- Bai Huijun, Wang Yuefeng, Wang Junzhen, et al. Cross-talk analysis of spectral beam combining with volume bragg gratings[J]. *Optical Instruments*, 2012, **34**(5): 61–65.
白慧君, 汪岳峰, 王军阵, 等. 激光体光栅光谱合成的串扰分析[J]. *光学仪器*, 2012, **34**(5): 61–65.
- Liu Chao, Sun Qi, Chai Yating, et al. Impact of tilted fiber bragg grating period on its transmission spectrum[J]. *Optical Instruments*, 2014, **36**(1): 58–61.
刘超, 孙祺, 柴雅婷, 等. 倾斜光纤光栅周期对其透射谱的影响[J]. *光学仪器*, 2014, **36**(1): 58–61.
- Lucchetta D E, Karapinar R, Manni A, et al. Phase-only modulation by nanosized polymer-dispersed liquid crystals[J]. *Journal of Applied Physics*, 2002, **91**(9): 6060–6065.
- Ma Ji, Liu Yonggang, Yu Tao, et al. Preparation of two-dimensional electrically tuning polymer/liquid crystal grating by holography[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2005, **20**(2): 115–118.
马骥, 刘永刚, 于涛, 等. 全息法制备二维电调谐聚合物/液晶光栅[J]. *液晶与显示*, 2005, **20**(2): 115–118.
- Ma Ji, Liu Yonggang, Ruan Shengping, et al. Preparing polymer/liquid crystal grating by photolithography[J]. *Journal of Functional Materials and Devices*, 2003, **9**(2): 309–312.
马骥, 刘永刚, 阮圣平, 等. 光刻法制备聚合物/液晶光栅[J]. *功能材料与器件学报*, 2003, **9**(2): 309–312.
- Liu Jian, Wang Mingle, Gao Liude, et al. Orientation mode of azobenzene mesogens and their effects on the orientation stability[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(6): 902–906.
刘剑, 王明乐, 高刘德, 等. 偶氮苯基晶元取向方式对其取向稳定性影响[J]. *光子学报*, 2011, **40**(6): 902–906.
- Chen Jianwen, Fu Shufen, Zhang Dake, et al. Producing grating with variable spacing[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 1986, **13**(5): 291–294, 309.
陈建文, 傅淑芬, 张大可, 等. 制作变间距光栅的新方法[J]. *中国激光*, 1986, **13**(5): 291–294, 309.
- 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.
- Song Jing, Ma Ji, Liu Yonggang, et al. Preparation and electric-optical characteristic of polymer network stabilized liquid crystal grating[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 141–144.
宋静, 马骥, 刘永刚, 等. 聚合物网络稳定液晶光栅的制备与特性研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 141–144.