

文章编号:1007-2780(2018)10-0844-07

液晶分子取向对液晶/聚合物光栅电光特性以及激光出射特性的影响

李小平¹, 胡五生¹, 刘明欢^{2,3*}, 刘永刚², 宣 丽²

(1. 济源职业技术学院, 济源 459000;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 长春 130033;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:报道了液晶分子不同取向对液晶/聚合物光栅电光特性以及激光出射的影响。通过扫描电子显微镜观察液晶/聚合物光栅的截面,成功观察到了光栅的体光栅结构。液晶分子垂直光栅矢量排列时,由于光栅形貌变差,衍射效率由液晶分子沿光栅矢量排列时的 83.2%降低至 72%,同时散射损耗由 11.8%增加至 19.1%。液晶分子垂直光栅矢量时,液晶/聚合物光栅的调谐电场由液晶分子沿光栅矢量时的 13.6 V/ μm 下降至 3.1 V/ μm 。液晶沿光栅矢量排列时,激光出射阈值更低,为利于激光出射的方向。本文工作为进一步加深对液晶/聚合物光栅以及染料掺杂分布式反馈选频的理解和认识,提供了指导和借鉴。

关键词:液晶/聚合物光栅;液晶分子取向;调谐;分布反馈

中图分类号:O753.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/JYXS20183310.0844

Effect of liquid crystal orientation on LC/polymer grating electro-optical properties and lasing emission properties

LI Xiao-ping¹, HU Wu-sheng¹, LIU Ming-huan^{2,3*}, LIU Yong-gang², XUAN Li²

(1. Jiyuan Vocational and Technical College, Jiyuan 459000, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We report the effect of distinct LC orientations on LC/polymer grating electro-optical properties and lasing emission. The volume grating configuration was observed successfully by observing the cross section using a Scanning Electron Microscope. The diffraction efficiency decreased from 83.2% to 72% and the scatterings increased from 11.8% to 19.1% when LC changed the orientation from parallel to perpendicular to the grating vector because of worse morphology. The tuning electric field decreased from 13.6 V/ μm to 3.1 V/ μm when LC changed the orientation from parallel to

收稿日期:2018-04-19; **修订日期:**2018-07-01.

基金项目:国家自然科学基金(No.11704378, No.11604327, No.61775212)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No.11704378, No.11604327, No.61775212)

* 通信联系人, E-mail: liuminghuan13@mails.ucas.edu.cn

perpendicular to the grating vector. The lasing threshold was lower when LC was parallel to the grating vector, which was helpful to lasing emission. The work in this paper provides guidance to the physical insights of LC/polymer grating and dye-doped distributed feedback lasing emission.

Key words: LC/polymer grating; LC orientation; tuning; distributed feedback

1 引言

液晶/聚合物光栅由于优良的电光特性,近些年来受到国内外科学研究工作者的广泛关注^[1]。液晶/聚合物光栅是由全息干涉曝光预聚物混合溶液,得到的液晶层与聚合物层交替排列的光栅结构。全息曝光时,在相长干涉区,光敏单体发生光聚合,形成致密的聚合物层,并且,相消干涉区的光敏单体也在化学势的驱动下向相长干涉区扩散;与此同时,为保持体系化学势的平衡,不参加光化学反应的液晶被排挤扩散到相消干涉区。最终,形成液晶层与聚合物层交替排列的一维周期性结构^[2]。液晶/聚合物光栅通常为体光栅结构,衍射效率理论上可以达到100%。由于正性向列相液晶分子的存在^[3-5],液晶/聚合物光栅可以被电场、磁场等外场调谐。将激光染料掺杂在预聚物混合溶液中,制备成光栅后,横向光泵浦可以实现亚纳米线宽激光出射^[6]。基于液晶/聚合物光栅选频的有机激光器,由于其制备简单、易于集成等特点,在光通讯、显示等诸多领域存在光明的应用前景^[7]。

液晶/聚合物光栅中,液晶分子通常有较高的取向度。由于全息干涉,光化学反应阶段,聚合物层间形成大量聚合物拉丝,对液晶分子形成锚定作用,因此液晶分子在聚合物拉丝的束缚作用下,沿光栅矢量方向排列^[8]。拉曼光谱分析证明了非倾斜透射式液晶/聚合物光栅中,液晶分子确实沿光栅矢量方向排列^[9]。Takeshi Karasawa等人系统研究了材料体系对液晶/聚合物光栅光电特性的影响^[10]。但文献中,更多的报道停留在液晶分子沿光栅矢量排列情况的讨论^[11]。主要原因是使用的五官能度的丙烯酸酯光敏单体对液晶分子的束缚作用过强,液晶分子只能沿着光栅矢量排列。液晶分子垂直光栅矢量排列时,对液晶/聚合物光栅光电特性以及激光掺杂激光出射的影响国内并未见诸报道。因此,选择合适的预聚物体系,使液晶/聚合物光栅中液晶分子垂直光栅矢量

排列的研究,对于更加深入了解液晶分子与聚合物的作用机理,以及液晶分子取向对激光染料掺杂的激光出射,具有一定的指导意义。

本论文通过选用双官能度光敏单体,利用预聚物混合体系在不同温度下的黏度变化,成功制备了液晶分子垂直光栅矢量排列的液晶/聚合物光栅。全息曝光制备液晶/聚合物光栅时,使用632.8 nm He-Ne激光器以Bragg角入射对光栅的演化特性进行了监测,并利用扫描电子显微镜SEM对光栅的截面形貌进行了表征。通过施加电场,比较了液晶分子不同取向时,液晶/聚合物光栅的电场调谐特性。在预聚物混合溶液中添加激光染料DCM,横向光泵浦下,比较了液晶分子取向对激光出射特性的影响。论文探究了不同温度下,液晶发生不同分子取向时,液晶/聚合物光栅的衍射、散射以及电光调谐特性,并比较了液晶分子取向对激光出射特性的影响。

2 实验

2.1 材料

制备液晶聚合物光栅的预聚物混合溶液由光敏单体、液晶分子、交联剂、光引发剂以及共引发剂组成。光敏单体是由西亚科技有限公司提供的双官能度丙烯酸酯单体 phthalic diglycol diacrylate (PDDA, 58.8%质量分数)。实验中使用的液晶分子TEB-30A(石家庄永生华清液晶有限公司, 29.4%质量分数)寻常光 n_o 。折射率为1.522,双折射 Δn 为0.17@20℃。交联剂N-vinylpyrrolidone (NVP, 9.8%质量分数)、共引发剂N-phenylglycine (NPG, 1.5%质量分数)以及光引发剂Rose Bengal (RB, 0.5%质量分数)均由Aldrich公司提供。将预聚物的各组分混合在密闭容器中,并在暗室条件下搅拌24 h,以获得均匀的混合物。将两块含有ITO层(氧化铟锡, Indium tin oxide)的玻璃基板面对面排列,制备成液晶盒,液晶盒的厚度由9 μm厚的隔叠物控制。在暗室条件下,将预聚物混合溶液通过毛细

扩散作用,均匀灌注整个液晶盒。

2.2 液晶/聚合物光栅制备及监测

实验中,532 nm 连续运转的 s 偏振 Nd^{3+} : YAG 激光器(长春新产业)经过显微物镜压缩束腰,空间滤波以及准直透镜准直后出射均匀的平面波,如图 1 所示。平面波经过非偏振分束棱镜(NPBS)分束后,分为强度比为 1 : 1 的物光束和参考光束。物光束和参考光束经过反射镜反射后,在样品处重新汇合。实验中的制备激光强度,由光路中的可调节衰减片控制。液晶/聚合物光栅的周期 Λ 由激光波长 λ_w 以及物光束与参考光束的夹角 θ 决定。

$$\Lambda = \frac{\lambda_w}{2\sin(\frac{\theta}{2})} \quad (1)$$

连续运转的 632.8 nm He-Ne 激光以 Bragg 角入射,以监测液晶/聚合物光栅的演化过程。使用偏振分束棱镜(PBS)分别对透射光以及衍射光进行分束,并使用光电探测器监测透射光以及衍射光中的 S 以及 P 分量。

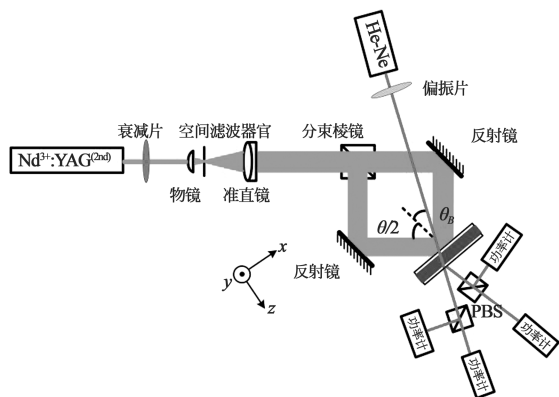


图 1 液晶/聚合物光栅制备以及监测光路示意图

Fig.1 Schematic illustration setups of the LC/polymer grating fabrication and characterization

2.3 液晶/聚合物光栅电场调谐

图 2 为液晶/聚合物光栅的电场调谐示意图。调节偏振片的方向,使液晶/聚合物光栅的衍射光强达到最大值,使用光电探测器记录衍射光强以及透射光强。将可调谐调压器的电极分别夹在 ITO 玻璃基板,对液晶/聚合物光栅施加电场,记录衍射光强以及透射光强随电场的变化情况。

2.4 染料掺杂液晶/聚合物光栅的激励与光谱探测

将激光染料 DCM 按照 0.5% 质量分数掺杂在预聚物混合溶液中,并搅拌均匀,制备 DCM 掺

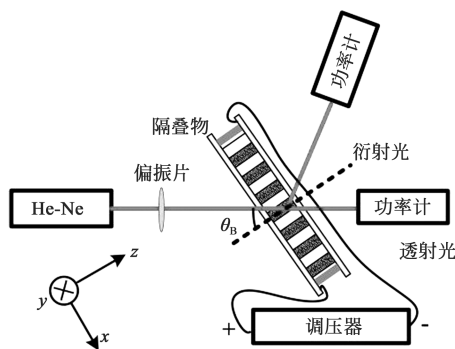


图 2 液晶/聚合物光栅电场调谐示意图

Fig.2 Schematic illustration of the LC/polymer grating tuning

杂的液晶/聚合物光栅。脉宽 10 ns,重复频率为 10 Hz 的脉冲运转的 532 nm Nd^{3+} : YAG 激光器(长春新产业)作为激励光源。激光经过可调狭缝后,经非偏振分束棱镜分为两束。一束用作激励光,另一束经光电探测器接收,用以监测激励激光能量。光路中的衰减片以及偏振片,分别对激光的能量以及偏振态进行调节。激励光束经柱面透镜整形后形成条状光斑,对染料掺杂液晶/聚合物光栅进行横向激励,激光在侧面出射,并由光纤接收器耦合至光谱仪,光谱仪的分辨率为 0.23 nm。

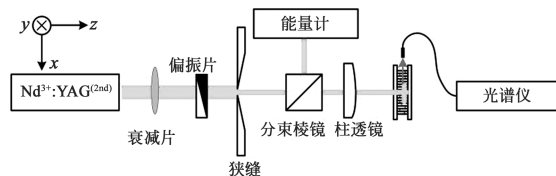


图 3 染料掺杂液晶/聚合物光栅的激励与光谱探测光路示意图

Fig.3 Schematic illustration of the dye-doped LC/polymer grating excitation and detection

3 结果与讨论

3.1 衍射与损耗

图 4 为全息曝光发生光化学反应时,液晶/聚合物光栅衍射效率随时间的变化关系,实验是在 16 °C 以及 26 °C 条件下进行的。光栅的衍射效率 η 定义为衍射光强 I_{dif} 与入射光强 I_{inc} 的比值。液晶/聚合物光栅的衍射效率在经历数秒的氧抑制阶段,开始上升^[11]。当制备温度为 16 °C 时,在经过 13 s 的氧抑制阶段,开始发生相分离,即 p 光

和 s 光的衍射效率开始出现不一致。p 光的衍射效率随时间逐渐增大,直至达到最大衍射效率 83.2% 时不再发生变化;s 光的衍射效率随时间增大至极值 18.9% 后,又缓慢下降至 5.6%。p 光衍射效率 η_p 与 s 光衍射效率 η_s 的比值 η_p/η_s , 达到 14.9。当制备温度为 26 °C 时,在经过 12 s 的氧抑制阶段,开始发生相分离,即 p 光和 s 光的衍射效率开始出现不一致。制备温度分别为 16 °C 与 26 °C 时,氧抑制阶段时间不同,是由于反应速率不同导致的。s 光的衍射效率随时间逐渐增大,直至达到最大衍射效率 72.0% 时不再发生变化;p 光的衍射效率随时间增大至极值 13.1% 后,又缓慢下降至 4.5%。s 光衍射效率 η_s 与 p 光衍射效率 η_p 的比值 η_s/η_p , 达到 16。s 光衍射效率不为 0,主要是由于聚合物层 n_p 与液晶寻常光折射率 n_o 失配引起的。根据各向异性耦合波理论^[12-13],16 °C 时,液晶/聚合物光栅中的液晶分子沿光栅矢量排列;26 °C 时,液晶/聚合物光栅中的液晶分子垂直光栅矢量排列。

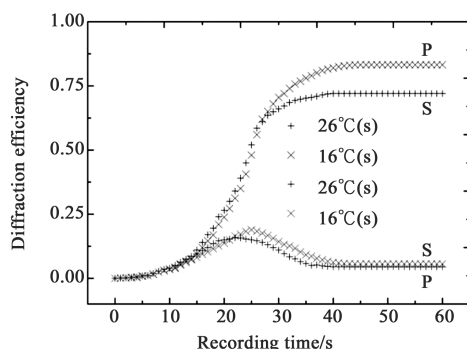


图 4 液晶/聚合物光栅衍射效率的时间演化特性
Fig. 4 Time evolution properties of LC/polymer grating diffraction efficiency

全息曝光发生光化学反应时,液晶/聚合物光栅散射损耗随时间的变化关系,如图 5 所示。光栅的散射损耗 α 定义为:

$$\alpha = \frac{I_{\text{inc}} - (I_{\text{dif}} + I_{\text{tra}} + I_{\text{ref}})}{I_{\text{inc}}}, \quad (2)$$

其中, I_{inc} 为入射光强, I_{tra} 为透射光强, I_{dif} 为衍射光强, I_{ref} 为反射光强。液晶/聚合物光栅的散射损耗随时间缓慢上升,直至达到最大值时,不再发生变化。当制备温度为 16 °C 时, p 光的散射损耗为 11.8%; 当制备温度为 26 °C 时, s 光的散射损耗为 19.1%。图 6 为液晶分子不同取向时,液晶/

聚合物光栅结构示意图。当制备温度为 16 °C 时,液晶分子沿光栅矢量排列,如图 6(a) 所示;当制备温度为 26 °C 时,液晶分子垂直光栅矢量排列,如图 6(b) 所示。

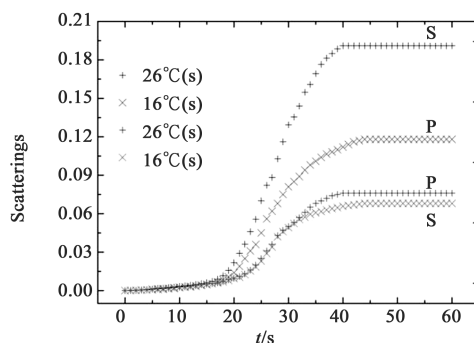


图 5 液晶/聚合物光栅散射损耗的时间演化特性
Fig. 5 Time evolution properties of LC/polymer grating scatterings

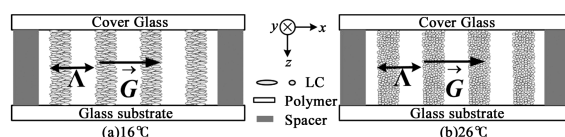


图 6 液晶分子不同取向的液晶/聚合物光栅结构示意图
Fig. 6 Schematic illustration of the LC/polymer grating with distinct LC orientations

3.2 形貌与电场调谐特性

评价光栅体系的 Klein-Cook Q 参数为^[14]

$$Q = \frac{2\pi\lambda_p L}{n_{\text{ave}} \Lambda^2}, \quad (3)$$

其中, $\lambda_p = 632.8$ nm 为探测光波长, $L = 9$ μm 为光栅厚度, $n_{\text{ave}} = 1.548$ 为光栅的平均折射率, $\Lambda = 594$ nm 为光栅周期。将各参数代入后,得到 Q 值为 65.5。根据经验公式, Q 大于 4π , 为体光栅结构。文献中报道的液晶/聚合物光栅的形貌,为通过扫描电子显微镜 (SEM) 以及原子力显微镜 (AFM) 观察到的液晶聚合物光栅形成过程中的表面起伏,并不能真实反应光栅的形貌^[15]。因此本论文中,通过 SEM 观察光栅的截面形貌,成功获得了液晶/聚合物光栅体光栅特性。实验中,需将液晶/聚合物光栅拆解,并置放于乙醇中 24 h,以溶解液晶,进行 SEM 观察前,需将光栅进行镀金处理,增强光栅的导电性,获得清晰的光栅形貌。

图 7 为光栅的截面形貌图,可以清晰的看到液晶/聚合物光栅的体光栅结构。液晶分子垂直光栅矢量以及平行光栅矢量排列,分别如图 7(a)以及 7(b)所示。液晶分子垂直光栅矢量时,光栅容易发生形变,并且液晶与聚合物间的界面比较模糊,这将降低光栅的衍射效率并增加损耗,与 3.1 小节中的结果一致。不同制备温度下液晶分子发生不同取向,主要是由于温度变化导致体系粘度变化,聚合物拉丝对液晶分子的锚定发生了变化。

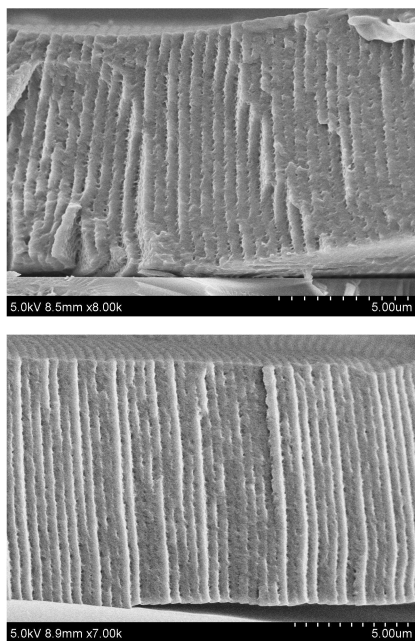


图 7 液晶/聚合物光栅形貌。(a) 液晶分子垂直光栅矢量; (b) 液晶分子沿光栅矢量。

Fig.7 Morphology of LC/polymer grating with LC perpendicular (a) and parallel to the grating vector (b)

由于正性向列相液晶分子的存在,液晶/聚合物光栅可以被电场调谐。液晶/聚合物光栅的电场调谐特性如图 8 所示。液晶分子垂直光栅矢量排列时,衍射效率降至 90% 以及 10% 时的场强分别为 1.1 V/μm 以及 3.1 V/μm。液晶分子平行光栅矢量排列时,衍射效率降至 90% 以及 10% 时的场强分别为 6.7 V/μm 以及 13.6 V/μm。液晶分子垂直光栅矢量排列时,液晶分子更加容易调谐,同时说明液晶分子的排列不是很稳定,即聚合物拉丝对液晶分子的锚定作用变弱。

3.3 染料掺杂液晶/聚合物光栅激射

根据 Kogelnik 关于分布式反馈激光的耦合

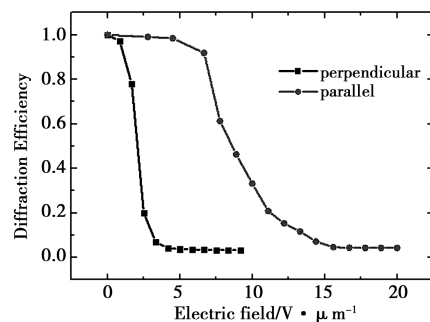


图 8 液晶/聚合物光栅的调谐特性

Fig.8 Tuning properties of LC/polymer grating

波理论^[16],激光出射的波长 λ_{las} 为^[17]

$$\lambda_{\text{las}} = \frac{2n_{\text{eff}}\Lambda}{m}, \quad (4)$$

其中, n_{eff} 为光波模式的有效折射率, Λ 为光栅周期, m 为光波模式的衍射级次。染料掺杂的液晶分子沿光栅矢量排列的液晶/聚合物光栅的激射光谱(16 °C, 10.2 μJ/pulse), 如图 9 所示。由于液晶分子垂直光栅矢量排列时, 结果类似, 这里不再赘述。激光模式的衍射级次为 3 级, 光栅周期为 591 nm。其中, 实线为实验数据点的高斯拟合曲线。激光出射的中心波长为 609.9 nm, 光谱的半高宽(Full Width at Half Maximum, FWHM)为 0.55 nm, 激光的品质因子 $\lambda_{\text{las}}/\Delta\lambda$ 高达 1 100, 优于文献中报道的结果, 即激光的单色性很高^[18]。

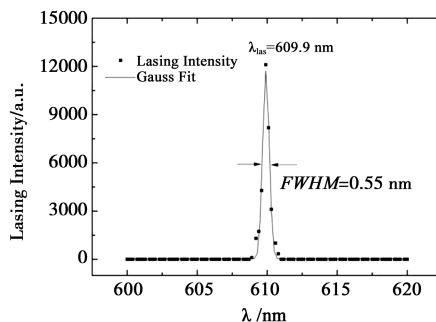


图 9 液晶/聚合物光栅的激射光谱

Fig.9 Lasing emission properties of LC/polymer grating

液晶/聚合物光栅激射强度随激励脉冲能量的变化关系, 如图 10 所示。其中, 实线为数据点的线性拟合。实验中, 液晶分子沿光栅矢量以及垂直光栅矢量时, 激光出射的中心波长均在 610 nm 左右。当未达到激光出射的阈值时, 器件的

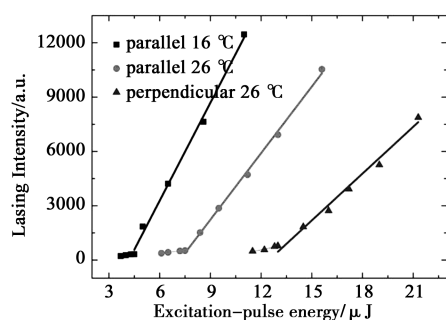


图10 液晶/聚合物光栅激光强度随激励脉冲能量变化关系

Fig.10 Lasing intensity as a function of excitation-pulse energy

出射强度几乎不随激励能量变化。达到激光出射的阈值时,激光出射强度随着激励能量的增加而线性增大。液晶分子垂直以及平行于光栅矢量排列时,激光出射阈值分别为 13.2 以及 4.5 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 。为消除温度对激光出射阈值的影响,测量了 26 °C 时,液晶分子沿光栅矢量排列时,激光的出射特性。26 °C 时,液晶分子沿光栅矢量排列时,激光的出射阈值为 7.5 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 。通过比较可

以看出,液晶分子沿光栅矢量排列时,激光出射阈值较低。因此,沿光栅矢量方向的液晶排列更有利于获得低阈值的激光出射。

4 结 论

本论文系统探讨了液晶分子不同取向,对液晶/聚合物光栅光电特性以及染料掺杂液晶/聚合物光栅激光出射的影响。利用不同制备温度下,预聚物混合溶液的粘度变化,以及聚合物拉丝对液晶分子锚定作用的变化,成功制备了液晶分子垂直光栅矢量的液晶/聚合物光栅。当液晶分子垂直光栅矢量排列时,光栅形貌变差,光栅的散射损耗由 11.8% 上升至 19.1%,衍射效率由 83.2% 下降至 72%。并且,液晶分子的调谐场强由 13.6 $\text{V}/\mu\text{m}$ 降低至 3.1 $\text{V}/\mu\text{m}$ 。液晶分子平行于光栅矢量排列时,更加有利于获得低阈值的激光出射,激光出射阈值低至 4.5 $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 。在下一步工作中,我们将深入探讨,不同温度下,液晶分子发生不同排列的物理机理。

参 考 文 献:

- [1] PENG H Y, YU L, CHEN G N, *et al.* Low-voltage-driven and highly-diffractive holographic polymer dispersed liquid crystals with spherical morphology [J]. *RSC Adv.*, 2017, 7(82): 51847-51857.
- [2] BUNNING T J, NATARAJAN L V, TONDIGLIA V P, *et al.* Holographic polymer-dispersed liquid crystals (H-PDLCs) [J]. *Annu. Rev. Mater. Sci.*, 2000, 30(1): 83-115.
- [3] 许忠保,王双迎,刘文超,等.基于液晶空间光调制器的多焦菲涅尔透镜 [J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(10): 156-161. XU Z B, WANG S Y, LIU W C, *et al.* Multifocal Fresnel lens based on liquid crystal spatial light modulator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 156-161. (in Chinese)
- [4] 冯奇斌,尹慧娟,程鑫,等.用于视角偏转的光学膜表面微结构设计 [J]. *光学 精密工程*, 2016, 24(5): 1009-1014. FENG Q B, YIN H J, CHENG X, *et al.* Design of optical film with microstructure for viewing angle deflection [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 1009-1014. (in Chinese)
- [5] 季洪雷,周青超,潘俊,等.量子点液晶显示背光技术 [J]. *中国光学*, 2017, 10(5): 666-680. JI H L, ZHOU Q C, PAN J, *et al.* Advances and prospects in quantum dots based backlights [J]. *Chin. Opt.*, 2017, 10(5): 666-680. (in Chinese)
- [6] 邓舒鹏,李文萃,黄文彬,等.基于透射式液晶/聚合物光栅的分布反馈式激光器的研究 [J]. *物理学报*, 2011, 60(5): 056102. DENG S P, LI W C, HUANG W B, *et al.* Distributed-feedback lasing from dye-doped holographic polymer dispersed liquid crystal transmission grating [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2011, 60(5): 056102. (in Chinese)
- [7] KUEHNE A J C, GATHER M C. Organic lasers: recent developments on materials, device geometries, and fabrication techniques [J]. *Chem. Rev.*, 2016, 116(21): 12823-12864.
- [8] CAPUTO R, DE SIO L, VELTRI A, *et al.* Development of a new kind of switchable holographic grating made of liquid-crystal films separated by slices of polymeric material [J]. *Opt. Lett.*, 2004, 29(11): 1261-1263.
- [9] FASANELLA A, CASTRIOTA M, CAZZANELLI E, *et al.* Molecular orientation of E7 liquid crystal in POLIC-

- RYPS holographic gratings; a micro-Raman spectroscopic analysis [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2012, 558(1): 46-53.
- [10] TAKESHI K, YOSHINAO T. Effects of material systems on the polarization behavior of holographic polymer dispersed liquid crystal gratings [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1997, 36: 6388-6392.
- [11] 黄文彬, 邓舒鹏, 刘永刚, 等. 全息液晶/聚合物透射光栅光学各向异性的研究 [J]. *物理学报*, 2012, 61(9): 094208. HUANG W B, DENG S P, LIU Y G, *et al.* Study on anisotropic diffraction properties of holographic dispersed liquid crystal transmission grating [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2012, 61(9): 094208. (in Chinese)
- [12] HUANG W B, LIU Y G, DIAO Z H, *et al.* Theory and characteristics of holographic polymer dispersed liquid crystal transmission grating with scaffolding morphology [J]. *Appl. Opt.*, 2012, 51(18): 4013-4020.
- [13] MONTEMEZZANI G, ZGONIK M. Light diffraction at mixed phase and absorption gratings in anisotropic media for arbitrary geometries [J]. *Phys. Rev. E*, 1997, 55(1): 1035-1047.
- [14] PENG H Y, NI M L, BI S G, *et al.* Highly diffractive, reversibly fast responsive gratings formulated through holography [J]. *RSC Adv.*, 2014, 4(9): 4420-4426.
- [15] PENG H Y, YU L, CHEN G N, *et al.* Low-voltage-driven and highly-diffractive holographic polymer dispersed liquid crystals with spherical morphology [J]. *RSC Adv.*, 2017, 7(82): 51847-51857.
- [16] KOGELNIK H, SHANK C V. Stimulated emission in a periodic structure [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 18(4): 152-154.
- [17] LIU M H, LIU Y G, ZHANG G Y, *et al.* Organic holographic polymer dispersed liquid crystal distributed feedback laser from different diffraction orders [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2016, 49(46): 465102.
- [18] LUCCHETTA D E, VITA F, CASTAGNA R, *et al.* Laser emission based on first order reflection by novel composite polymeric gratings [J]. *Photon. Nanostruct.-Fundam. Appl.*, 2012, 10(1): 140-145.

作者简介:李小平(1975—),女,河南济源人,副教授,1996 年于河南师范大学获学士学位,主要研究液晶自适应光学和光学设计。E-mail: humengjia@126.com

刘明欢(1990—)男,吉林公主岭人,博士,2018 年于长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事全息液晶/聚合物光栅,全息偏振光栅以及有机半导体激光器等方面的研究。E-mail: liuminghuan13@mails.ucas.edu.cn