

# 胆甾相液晶激光效率的提高研究

罗吉祥<sup>1,2</sup> 黄玉华<sup>1,2</sup> 叶丽慧<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>浙江省光信息检测与显示技术研究重点实验室, 浙江 金华 321004

<sup>2</sup>浙江师范大学信息光学研究所, 浙江 金华 321004

**摘要** 为了提高掺杂染料的胆甾相液晶的激光效率,通过采用电击摩擦处理来改善染料掺杂胆甾相液晶内部分子的排列,结果表明对于不同厚度的胆甾相液晶样品,其内部分子排列的改善都能提高其输出激光效率,且样品越厚,经过电击摩擦后激光效率提高的倍数越大。这是因为在没有经过电击摩擦处理前,胆甾相液晶分子因不能理想排列而形成缺陷,造成光散射,降低激光效率。且样品越厚,其内部缺陷越多,光散射引起的损耗也越大,对激光效率的降低越严重。经过处理后,内部分子排列得到大幅改善,损耗极大降低,激光效率被提高,且电击摩擦对厚的胆甾相液晶样品内部分子排列的改善更显著,因此经过电击摩擦后,厚的样品的激光效率提高的更大。

**关键词** 激光光学;胆甾相液晶;激光效率;摩擦;染料;厚度

中图分类号 O43; TN248

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.071601

## Laser Enhancement in Dye-Doped Cholesteric Liquid Crystals

Luo Jixiang<sup>1,2</sup> Huang Yuhua<sup>1,2</sup> Ye Lihui<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Optical Information Detecting and Display Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

<sup>2</sup>Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China

**Abstract** In order to enhance the laser efficiency of dye-doped cholesteric liquid crystals, cholesteric liquid crystal is switched on and off by electric field and then treated by doing rubbing on the surface. The results show that the laser efficiency can be enhanced after the rubbing treatment no matter the thickness of cholesteric liquid crystal sample is thin or thick. Moreover, the laser efficiency in a thicker sample is increased more obviously. The reason is that, before rubbing treatment, liquid crystal molecules deviate from the ideal alignment direction. As a result, more or less defects are formed inside the samples, which induce light scattering and reduce its laser efficiency. More defects can be formed in a thicker sample, therefore, the optical loss induced by the light scattering is larger. Consequently, the laser efficiency in a thicker sample is decreased more compared with the ideal state. After the treatment, the alignment of cholesteric liquid crystal molecules is more or less improved and the optical loss caused by light scattering is reduced. The samples' quality is improved and the optical loss is reduced more significantly for a thicker sample. Thus, the laser efficiency is enhanced, more significantly in a thicker sample after the treatment.

**Key words** laser optics; cholesteric liquid crystal; laser efficiency; rubbing; dyes; thickness

**OCIS codes** 160.3710; 140.3460; 350.3390

## 1 引言

胆甾相液晶(CLC)是一种具有自组装螺旋结构的液晶相,在其内部,液晶分子沿着螺旋轴旋转排列。因为液晶分子具有高的双折射率,这种液晶分子周期性排列使得液晶的有效折射率也成周期性变化,从而形成光子带隙,相当于一维光子晶体<sup>[1-3]</sup>。与常规的光子晶体相比,胆甾相液晶具有很多独特的特点,比如胆甾

收稿日期: 2015-02-06; 收到修改稿日期: 2015-02-19; 网络出版日期: 2015-06-26

基金项目: 国家自然科学基金(61275141)

作者简介: 罗吉祥(1989—),男,硕士研究生,主要从事液晶材料及特性等方面的研究。E-mail: zero\_degree@sina.cn

导师简介: 黄玉华(1971—),女,教授,硕士生导师,主要从事光学液晶材料及光学器件等方面的研究。

E-mail: hyh@zjnu.cn(通信联系人)

相液晶反射带只反射与其螺旋结构旋向一致的圆偏振光,而与其螺旋结构旋向相反的圆偏振光则会顺利透过,尤其胆甾相液晶的光子反射带很容易受外加电场、磁场、光和热等因素的影响而改变<sup>[4-7]</sup>,这些特性使得它在光开关、可调滤波器、显示等方面[8-9]具有潜在的应用价值而备受关注。

近年来研究发现通过在胆甾相液晶中掺杂激光染料可以获得激光,由于胆甾相液晶激光具有体积小,制作简单,成本低等优点,因此受到广泛地研究。对胆甾相液晶激光的研究大致可以分成两个方面:1)是研究胆甾相液晶激光的可调性,主要是通过改变手性分子的浓度<sup>[10-12]</sup>,电场、磁场、光及压力等因素来调节激光的波长<sup>[6,13-16]</sup>;2)是提高胆甾相液晶激光的效率,人们已经采用各种方式来提高胆甾相液晶激光效率,包括采用反射镜和缺陷模式多层膜等方法<sup>[17-19]</sup>来提高激光效率。然而,目前胆甾相液晶激光的效率仍然很低,有待进一步提高。

为了进一步提高胆甾相液晶激光的效率,用电击摩擦处理染料掺杂的胆甾相液晶样品,通过改善胆甾相液晶样品内部分子排列来提高激光效率,结果表明经过电击摩擦处理后,胆甾相液晶样品内部分子排列得到了不同程度地改善,且样品越厚,电击摩擦后样品内部分子排列改善越明显,相应地,其激光效率也得到了不同程度地提高,样品越厚,经过电击摩擦处理后激光效率提高倍数越大,并对产生该现象的物理机制进行了分析。

## 2 样品制备

实验中采用向列相液晶 E44 作为掺杂主体,向其中添加质量分数为 41% 的具有旋光性的手性分子 CB15 和质量分数为 1.7% 的激光染料 DCM。为了使几种材料混合均匀,将混合物放置到磁力加热搅拌器上充分搅拌约 4 h,其中磁力搅拌器的加热温度设置为 65 °C。然后在各向同性状态下,用毛细玻璃管将混合物缓慢注入到液晶盒中,灌注好的样品以 1 °C/min 的速度下降至室温。实验中使用了 5、10 和 15 μm 三种厚度的液晶盒,所使用的液晶盒内部聚酰亚胺膜的取向为反平行方向,且与玻璃基板之间成 3° 的夹角。

样品冷却至室温后,对样品采用电击摩擦方法进行处理。其具体过程如下:首先给样品施加一个频率为 1 kHz,电场强度足以使得胆甾相液晶分子长轴旋转到沿电场方向排列的交流电压,反复开关电源数次,再对胆甾相液晶盒表面施加一定大小的压力并对其进行摩擦处理,在摩擦时应注意保持每次摩擦的方向为单向摩擦,几分钟后再垂直于该方向作单向摩擦,如此交替进行几次即可停止,将摩擦完成后的样品静置样品几小时便可。

## 3 实验装置

如下图 1 所示为实验装置图,其中从调 Q Nd:YAG 脉冲激光器(Continuum, Minilite I)输出的 532 nm 激光作为抽运光,其脉宽为 6 ns。实验中,所采用的重复频率为 1 Hz,其原因是为了避免样品因激光迅速加热漂白而被破坏。抽运光被分束器分成两束光,其中一束光由光电探测器(THORLABS, DET36A/M)接收并连接到示波器(Tektronix, TDS1001B-SC)用于检测抽运光的强度,另一束光经透镜聚焦到染料掺杂的胆甾相液晶样品上,且与样品成 30° 的夹角。激光沿垂直于玻璃基板方向从样品中发射出来后,用透镜聚焦后被收集到光纤光谱仪中(Ocean Optics, USB4000, 分辨率  $R=0.2$  nm)进行测量。

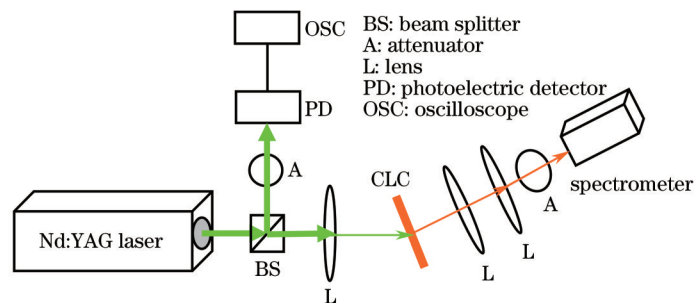


图 1 实验装置图

Fig.1 Experimental setup

## 4 结果与讨论

图2所示为染料掺杂胆甾相液晶在19℃时的透射光谱(黑线)和激光光谱(红线),可以看到染料掺杂胆甾相液晶透射光谱在590 nm附近存在突变,这是胆甾相液晶样品光子反射带的长波长边沿。在抽运光的激发下,其输出激光波长位于该边沿处,约为590 nm,半峰全宽(FWHM)约为1 nm,且激光的输出方向与液晶盒玻璃表面垂直,这是因为激光染料分子均匀分布于胆甾相液晶样品,无论抽运光以什么角度入射到样品中,受激发的激光染料分子都会因为受激而发出荧光。该荧光可以分解成右旋和左旋圆偏振光。当荧光的偏振方向与胆甾相液晶旋向相反时,荧光便会直接透射出去,而与胆甾相液晶旋向一致且在反射带内时,荧光则会在胆甾相液晶里来回多次反射并被不断放大,最后形成激光,并从反射带长波长边沿(该样品为590 nm处)射出,因为该处的光子数密度发生突变,适合激光的产生和输出。众所周知,激光的出射方向总是平行于谐振腔平面法线方向,由于胆甾相液晶具有平面螺旋结构,其提供的分布式反馈腔平行于玻璃基板表面,因此,胆甾相液晶激光方向垂直于玻璃基板。

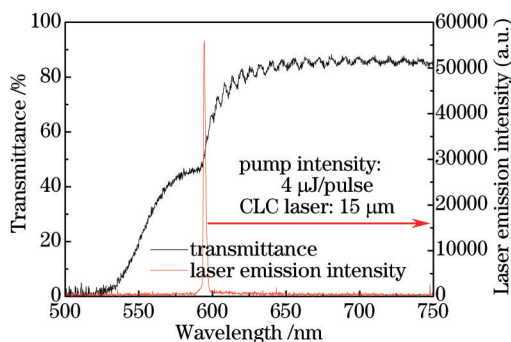


图2 染料掺杂胆甾相液晶在19℃时的透射光谱(黑线)与激光光谱(红线)

Fig.2 Transmission spectrum (black line) and laser spectroscopy (red line) of dye-doped cholesteric liquid crystal at 19 °C

采用图1中的实验装置测量了染料掺杂胆甾相液晶样品摩擦前后的激光强度随抽运激光能量的变化,在这里选用了5、10、15 μm三种厚度的样品,测量结果如图3所示。图3(a)、(b)和(c)分别为5、10、15 μm样品处理前后的激光强度随抽运脉冲激光能量的变化曲线图,其中黑线为样品处理前的结果,红线为样品处理后的

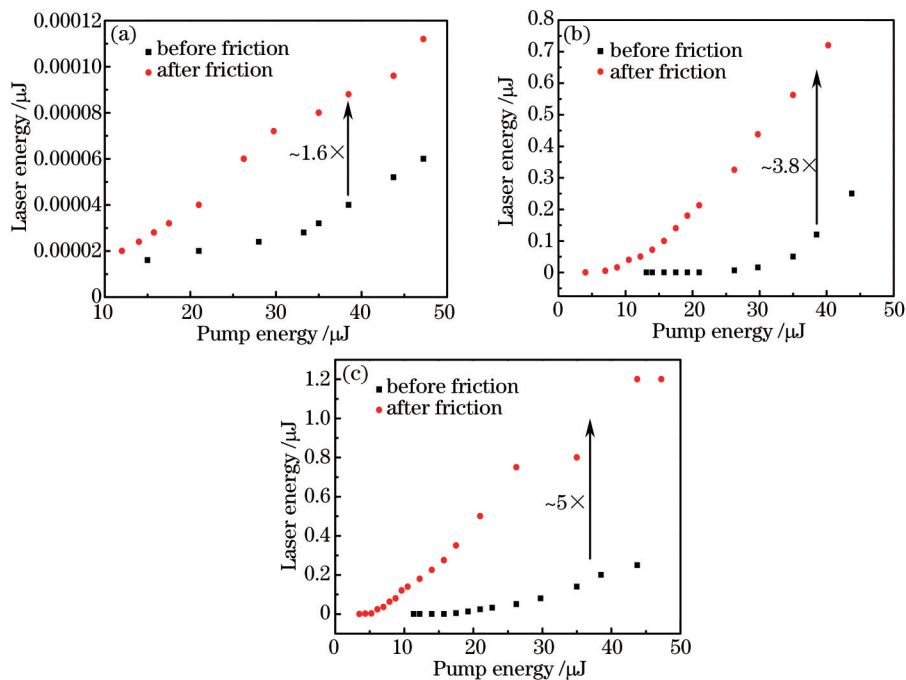


图3 摩擦处理前后染料掺杂胆甾相液晶激光强度随抽运光强变化对比图。(a) 5 μm对比图; (b) 10 μm对比图; (c) 15 μm对比图

Fig.3 Pump intensity dependence of laser intensity of dye-doped cholesteric liquid crystal in contrast diagram before and after treatment. (a) 5 μm in contrast; (b) 10 μm in contrast; (c) 15 μm in contrast

结果。从图中可以看出,三种不同厚度的掺杂染料的胆甾相液晶样品经过摩擦处理后,激光阈值都有所降低,激光效率相对于摩擦处理前也都有不同程度的增加,且样品厚度越大,激光阈值降低得越多,激光效率增加得也越大。从图3中可以看到,5  $\mu\text{m}$ 的样品经过电击摩擦处理后激光阈值从14  $\mu\text{J/pulse}$ 降低到10  $\mu\text{J/pulse}$ ,激光效率增加了1.6倍,10  $\mu\text{m}$ 和15  $\mu\text{m}$ 样品经过摩擦处理后,阈值分别从12、10  $\mu\text{J/pulse}$ 降低到3、2.5  $\mu\text{J/pulse}$ ,其激光效率分别增加了3.8和5倍,显然,样品越厚,经过摩擦处理后激光效率增加的倍数越大。

为了理解上述现象的物理机制,用偏光显微镜观察了不同厚度的样品摩擦前后的偏光显微图,如图4所示,并且测量了样品摩擦前后的透射光谱图,如图5所示。图4(a)、(b)和(c)分别为摩擦前5、10和15  $\mu\text{m}$ 样品的偏光显微图,(d)、(e)和(f)分别为摩擦后5、10和15  $\mu\text{m}$ 样品的偏光显微图。可以看到,电击摩擦前,5  $\mu\text{m}$ 的样品比较均匀,很少有10和15  $\mu\text{m}$ 样品摩擦前所示的丝状线条的结构,即缺陷,10  $\mu\text{m}$ 样品里则有少量的缺陷,15  $\mu\text{m}$ 样品内缺陷更多。而经过电击摩擦处理后,三个厚度的样品都比较均匀,很少有缺陷。

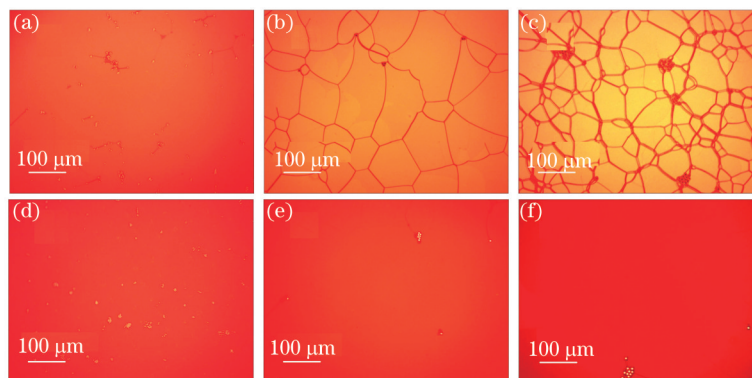


图4 摩擦前后样品偏光显微图。(a)、(b)和(c)分别为摩擦前5、10和15  $\mu\text{m}$ 样品偏光显微图;(d)、(e)和(f)分别为摩擦后5、10和15  $\mu\text{m}$ 样品偏光显微图

Fig.4 Polarizing micrograph of the samples before and after treatment. (a), (b) and (c) respectively for polarizing micrograph of 5, 10 and 15  $\mu\text{m}$  samples before treatment; (d), (e) and (f) respectively for polarizing micrograph of 5, 10 and 15  $\mu\text{m}$  samples after treatment

图5为采用光谱仪(Ocean Optics USB2.0)测量得到的不同厚度样品摩擦处理前后的透射光谱。图5中

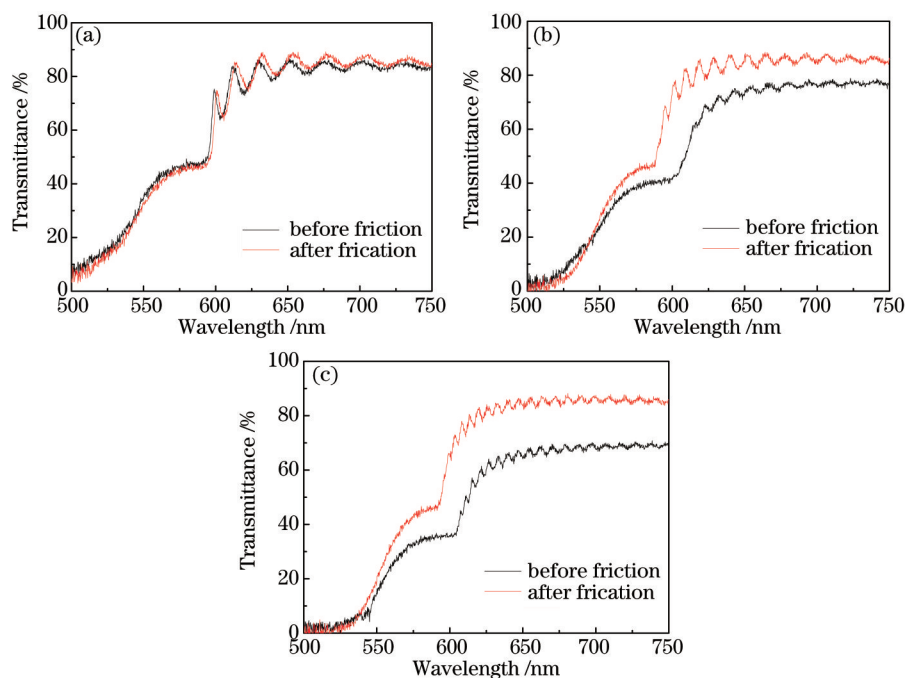


图5 摩擦前后样品透射谱。(a)、(b)和(c)分别为5、10和15  $\mu\text{m}$ 样品透射谱(其中黑线表示摩擦前的数据,红线表示摩擦后的数据)

Fig.5 Transmission spectra of the samples before and after treatment. (a), (b) and (c) respectively for transmission spectra of 5, 10 and 15  $\mu\text{m}$  samples (black line for before treatment, red line for after treatment)



(a)、(b)和(c)分别为5、10和15  $\mu\text{m}$  厚度样品的透射光谱,图中黑线和红线分别为摩擦处理前后样品的透射光谱,可以看到,摩擦处理前,样品越厚,透射率越低,5、10和15  $\mu\text{m}$  三个样品的最大透射率分别为80%、70%和60%,这是因为摩擦处理前,样品越厚,里面的缺陷越多,对光的散射也越大,因此透射率越低。经过摩擦处理后,三个样品的最大透射率都约为80%,可见越厚的样品经过摩擦处理后透射率变化越明显,因为摩擦处理极大地改善了样品,尤其是厚的样品里的分子排列结构,减少或消除了样品里的缺陷,使得光散射被降低,因此使得样品的透射率被提高,特别是厚的样品的透射率提高得更显著。这也正是经过摩擦处理后激光效率提高且越厚的样品激光效率提高越大的原因。

胆甾相液晶分子在手性分子螺旋扭转力的作用下沿螺旋轴旋转排列,除此之外,液晶分子的排列还受液晶盒玻璃基板内表面所涂的取向膜提供的锚定能量的影响。液晶分子所受锚定能量足够强时,则液晶分子在锚定能量的作用下能有序地形成平面螺旋结构,且螺旋轴垂直于玻璃基板表面,随着液晶分子所受锚定能量的减弱,液晶分子排列的有序性会越来越差,以至于胆甾相液晶无法形成完好的平面螺旋结构,而形成缺陷,这些缺陷会对光产生散射从而对光的传播造成损失。液晶分子所受锚定能量越弱,则形成的缺陷越多,对光的散射也越大。由于取向膜所提供的锚定能量是有限的,只能影响到靠近液晶盒表面的胆甾相液晶分子,当液晶分子离液晶盒表面距离增加时,液晶盒表面取向膜为液晶分子提供的锚定能量急剧降低,对其的取向作用力大幅减小。因此对于厚度较小的胆甾相液晶样品,大部分液晶分子依靠液晶盒基板上取向膜的作用便可形成较好的平面螺旋结构,而厚的样品中则会存在大量取向不理想的液晶分子,并以缺陷的形式存在。且样品厚度越大,内部缺陷数量越多,对光的损耗也越大,从而降低其输出的激光效率。

而在对胆甾相液晶样品进行电击摩擦处理过程中,液晶分子在受电场作用后势能增大,分子排列变得非常不稳定,此时在外力作用下容易发生流变,使得有序度增加,从而使其平面螺旋结构得到一定程度地改善,缺陷数量也相应减少,对光的损耗也降低,因此有效输出激光效率增加。从图4可以看到,电击摩擦对厚的胆甾相液晶样品的内部分子排列改善更显著,因此厚的染料掺杂胆甾相液晶样品经电击摩擦处理后相对于处理前的激光效率的提高倍数相对较薄样品的激光效率要高。

## 5 结 论

采用电击摩擦法对染料掺杂胆甾相液晶样品进行处理来提高激光效率。结果表明,无论胆甾相液晶样品的厚度为多少,经过电击摩擦处理后都能在一定程度上提高其激光效率,且样品越厚,激光效率提高得越多。其原因是在没有经过电击摩擦处理前,胆甾相液晶分子排列总是不能完全沿着螺旋轴理想旋转排列,在其内部总是或多或少地存在部分液晶分子偏离其理想排列位置而形成缺陷,从而造成光散射,降低激光效率。且胆甾相液晶样品厚度越大,其内部缺陷越多,光散射引起的损耗也越大,因此与理想状态相比,对激光效率的降低越多。经过电击摩擦处理后,胆甾相液晶内部分子排列得到很大改善,因光散射而引起的光损耗极大降低,因此激光效率被提高,且电击摩擦对厚胆甾相液晶样品内部分子排列的改善更显著,相应的激光效率提高得更多。

## 参 考 文 献

- 1 Andresen E R, Thogersen J, Keiding S R. Spectral compression of femtosecond pulses in photonic crystal fibers [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(15): 2025-2027.
- 2 Konorov S O, Sidorov B D A, Zheltikov A M, *et al.*. Self-phase modulation of submicrojoule femtosecond pulses in a hollow-core photonic-crystal fiber[J]. *Appl Phys Lett*, 2004, 85(17): 3690-3692.
- 3 Zentgraf T, Christ A, Kuhl J, *et al.*. Tailoring the ultrafast dephasing of quasiparticles in metallic photonic crystals[J]. *Phys Rev Lett*, 2004, 93(24): 243901.
- 4 Huang Y, Zhou Y, Wu S T. Lasing in dye-doped photonic liquid crystal devices[J]. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 2006, 453(1): 251-262.
- 5 Morris S M, Ford A D, Pivnenko M N, *et al.*. Enhanced emission from liquid-crystal lasers[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(2): 023103.
- 6 Chanishvili A, Chilaya G, Petriashvili G. Phototunable lasing in dye-doped cholesteric liquid crystals[J]. *Appl*

- Phys Lett, 2003, 83(26): 5353–5355.
- 7 Chanishvili A, Chilaya G, Petriashvili G, *et al.*. Widely tunable ultraviolet–visible liquid crystal laser[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(5): 051107.
- 8 Zhou Y, Huang Y, Lin T H, *et al.*. Direction controllable linearly polarized laser from a dye–doped cholesteric liquid crystal[J]. Opt Express, 2006, 14(12): 5571–5580.
- 9 Huang Y, Sun Q, Zhang S. Widely tunable optical filter with variable bandwidth based on spatially distributed cholesteric liquid crystal[J]. Optical Engineering, 2013, 52(4): 044003.
- 10 Wang C T, Lin T H. Multi–wavelength laser emission in dye–doped photonic liquid crystals[J]. Opt Express, 2008, 16(22): 18334–18339.
- 11 Huang Y, Zhou Y, Wu S T. Spatially tunable laser emission in dye–doped photonic liquid crystals[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(1): 011107.
- 12 Munoz F A, Palffy M P, Zaheri B. Ultraviolet lasing in cholesteric liquid crystals[J]. Optics Letters, 2001, 26(11): 804–806.
- 13 Park B, Kim M, Kim S W, *et al.*. Electrically controllable omnidirectional laser emission from a helical–polymer network composite film[J]. Advanced Materials, 2009, 21(7): 771–775.
- 14 Fakelmann H, Kom S T, Munoz A, *et al.*. Tunable mirrorless lasing in cholesteric liquid crystalline elastomers[J]. Advanced Materials, 2001, 13(14): 1069–1072.
- 15 Kurihara S, Hatae Y, Yoshioka T, *et al.*. Photo–tuning of lasing from a dye–doped cholesteric liquid crystals by photoisomerization of a sugar derivative having plural azobenzene groups[J]. Appl Phys Lett, 2006, 88(10): 103121–103123.
- 16 Liu Yongjun, Wang Feiru, Sun Weimin, *et al.*. Tunable capability of dye–doped cholesteric liquid crystal lasers[J]. Journal of Physics, 2013, 62(7): 76101.  
刘永军, 王斐儒, 孙伟民, 等. 胆甾相液晶激光器的调谐特性研究[J]. 物理学报, 2013, 62(7): 76101.
- 17 Blinov L M, Cipparrone G, Lazarev V V, *et al.*. Planar amplifier for a microlaser on a cholesteric liquid crystal[J]. Appl Phys Lett, 2007, 91(6): 061102.
- 18 Zhou Y, Huang Y, Wu S T. Enhancing cholesteric liquid crystal laser performance using a cholesteric reflector[J]. Opt Express, 2006, 14(9): 3906–3916.
- 19 Zhou Y, Huang Y, Ge Z, *et al.*. Enhanced photonic band edge laser emission in a cholesteric liquid crystal resonator[J]. Phys Rev E, 2006, 74(6): 061705.

栏目编辑: 张浩佳