

文章编号: 0258-7025(2010)04-0975-04

# 染料掺杂扭曲向列相液晶器件的激光辐射

岱 钦 乌日娜 徐送宁 全 薇

(沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要** 研究了掺杂激光染料 DCM 和手性剂 CB15 的向列相液晶器件的激光辐射行为。制作了反平行摩擦处理的器件,得到了扭曲向列相液晶平面织构态。采用固体 Nd:YAG 倍频 532 nm 波长激光作为抽运光源,测量并分析了器件的受激辐射光谱。当抽运光较弱,小于 18.0  $\mu\text{J}$  时,观察到染料 DCM 较宽的荧光辐射谱。随着抽运光的逐渐增强,以波长 606 nm 为中心出现了较尖锐的受激辐射峰,具有明显的阈值特性和方向性。最小半峰全宽(FWHM)大约为 10 nm。

**关键词** 激光光学;扭曲向列相液晶;激光辐射;平面织构态;分布反馈

中图分类号 O753 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.0975

## Laser Emission of Dye-Doped Cholesteric Liquid Crystal Devices

Dai Qin Wu Rina Xu Songning Quan Wei

(School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China)

**Abstract** We investigate the lasing action of the nematic liquid crystal device, which is added laser dye DCM and chiral compound CB15. The anti-parallel rubbing device is manufactured and the planar texture state of cholesteric liquid crystal is achieved. The emission spectra is measured and analyzed using a frequency-doubled Nd:YAG pulsed laser ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) as pumping source. Broad fluorescence radiation spectra of DCM is observed under lower pumping energy. When pumping energy is larger than 18.0  $\mu\text{J}$ , dramatic narrowing spectra which has the obvious threshold and the direction characteristics is observed with centre wavelength of 606 nm. The full width at half maximum (FWHM) is about 10 nm.

**Key words** laser optics; cholesteric liquid crystal; laser emission; planar texture; distributed feedback

## 1 引 言

液晶既有液体的流动性,又有晶体的各向异性,是物质的第四态。目前,液晶显示已经成为平板显示的主流。作为光学器件的应用也在迅速发展,例如空间光调制器、光开关等。液晶材料的研究和应用领域不仅仅局限于此,还需研究人员的进一步开发<sup>[1]</sup>。

近来,随机激光器的理论和实验研究成了激光物理、光电材料领域的热门课题<sup>[2,3]</sup>。随机激光器和传统的激光器比较,它是利用无序介质的多次散射和激光增益介质提供光学反馈放大,因此不需要另加谐振腔。这种激光器具有体积小、可以在非常小的尺寸上制作(约几十微米)等优点,在光子集成、

平面显示、军事应用、光子动力学医疗等领域具有潜在的应用前景。研究人员分别对激光无序介质的选取制作以及输出激光参数的控制方式进行了大量的理论和实验研究。由于液晶具有随着温度相态变化以及随着电场分子排列发生变化等特性,使它成为目前倍受关注的随机激光介质<sup>[4~6]</sup>。混合激光染料的扭曲向列相液晶(胆甾相液晶)、近晶相液晶以及聚合物分散液晶器件均能实现受激辐射<sup>[7~13]</sup>。本文在向列相液晶中掺杂激光染料 DCM 和手性剂 CB15,制作了上下玻璃基板取向层反平行摩擦处理的器件。以 DCM 作为增益介质,利用扭曲向列相液晶的螺旋周期结构形成分布反馈放大,在固体 Nd:YAG 倍频 532 nm 波长激光的抽运作用下,测量

收稿日期: 2009-05-31; 收到修改稿日期: 2009-06-29

基金项目: 国家自然科学基金(60777011)资助课题。

作者简介: 岱 钦(1977—),男,博士,副教授,主要从事固体激光技术方面的研究。E-mail: daiqin2003@126.com

了器件的受激辐射光谱特性,并对器件中产生激光辐射的原因进行了深入分析。

## 2 实 验

在向列相液晶 TEB30A(石家庄华清公司)中掺杂质量分数为 18.9%的手性剂 CB15(石家庄华清公司)和质量分数为 0.4%的染料 DCM,混合均匀。把 PI(联信公司提供)取向膜涂覆在 ITO 基板上,经过固化和摩擦处理后,使上下玻璃基板的摩擦方向反平行制作液晶器件,厚度为 20  $\mu\text{m}$ 。把混合材料加热至 65  $^{\circ}\text{C}$ ,利用毛细作用注入到液晶器件中。在正交偏光显微镜下观察液晶分子排列。以脉冲频率为 5 Hz,固体 Nd:YAG 倍频 532 nm 波长激光为抽运光源。利用 HR 4000 (ocean co ltd)光谱仪测量器件的辐射光谱特性。测量实验装置如图 1 所示。抽运光的入射方向与样品表面法线成 45 $^{\circ}$ 角。光谱仪的探测光纤沿着扭曲向列相液晶的螺旋轴方向,即垂直样品表面方向设置。

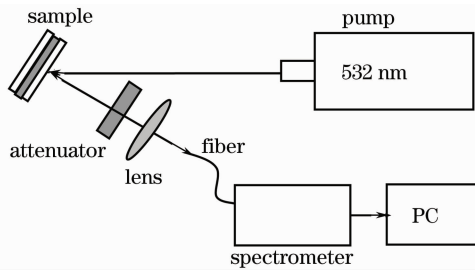


图 1 辐射光谱测量装置

Fig. 1 Experimental setup for measuring the emitted spectra

## 3 实验结果和讨论

器件偏光显微镜照片(放大 100 倍)如图 2 所示,在正交偏光显微镜下观察有许多不同规则形状的区域、晶畴。畴之间有暗色线状边界、晶界。晶畴尺寸较大,大约几百微米。由此可以判断,器件形成了扭曲向列相液晶平面织构态(planar texture)<sup>[14]</sup>。扭曲向列相液晶处于平面织构态时,可以认为是由很多类似的液晶薄层重叠而成。每个液晶薄层中,可以认为液晶分子的指向矢量(光轴)一致。相邻两层的液晶分子光轴扭曲成一固定角度,这样液晶分子沿着螺旋轴(垂直玻璃基板方向)逐渐发生扭转。在上(下)玻璃基板附近,由于取向层的锚定能较大,液晶分子扭曲角小;而在液晶层中间厚度的位置,取向层的锚定能较小,液晶分子的扭曲角较大。分子排列模型如图 3 所示。因此,沿着螺旋轴的方向可

由液晶层产生布拉格多重反射,即具有选择反射特性,选择反射与液晶层螺距相同波长的光。

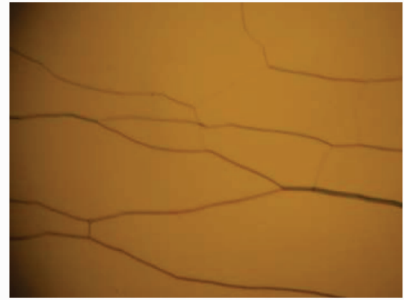


图 2 器件偏光显微镜照片

Fig. 2 Polarization micrograph of the devices

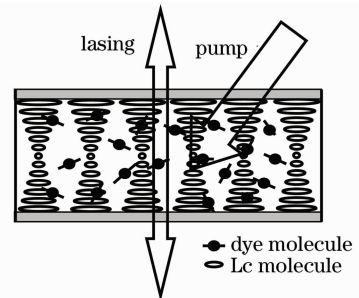


图 3 平面织构态分子排列模型

Fig. 3 Molecular alignment mode of the planar texture state

测得器件辐射谱随抽运光的能量变化情况如图 4 所示。抽运能量较低时,观察到了染料 DCM 的荧光光谱,谱线较宽。当抽运能量逐渐增大到 18.0  $\mu\text{J}$ 时,从 DCM 的光谱中以 606 nm 为中心突起一个小峰。抽运能量达到 18.9  $\mu\text{J}$ 时,此峰强度迅速增大,宽度变窄。抽运能量进一步增大,辐射越来越强,辐射谱宽度也越来越窄。改变探测角度,发现在垂直玻璃基板的方向,也就是器件螺旋轴的方向,测得的辐射光强度最大。

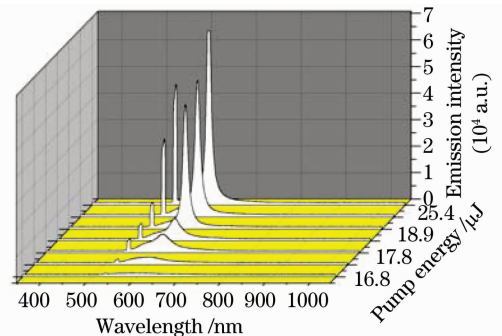


图 4 辐射谱随抽运光能量的变化

Fig. 4 Emission spectra as a function of pump energy

由图 5 可以看出器件中辐射光的输出行为。通过对辐射光谱线宽度变化的分析,随着抽运速率的

增加和辐射光经历了小信号增益和受激辐射过程。在阈值附近,辐射光的谱线宽度有明显的变化,由此也可求得辐射光的阈值,约为  $18.9 \mu\text{J}$ 。抽运能量进一步增大,激光辐射峰强度还会有继续增大,线宽也有进一步变小的空间,最终将达到饱和。但抽运能量过大,产生的热量过高,可能会导致扭曲向列相液晶的螺距随温度发生变化,进而影响辐射激光特性。

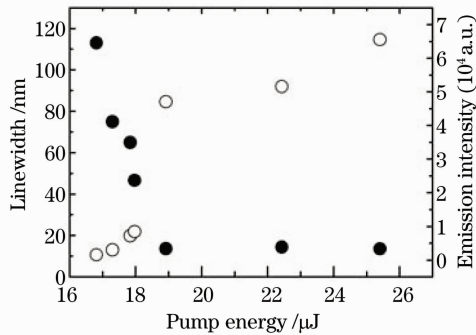


图 5 辐射谱峰值强度及线宽随抽运能量的变化  
Fig. 5 Change in emission intensity and spectral linewidth as a function of pump energy

扭曲向列相液晶平面排列态器件的每个液晶薄层中液晶分子的指向矢量(光轴)一致,相邻两层液晶分子的指向(光轴)之间有一定的夹角。因此根据刘劲松等<sup>[15~17]</sup>提出的随机激光器时域理论,可以把平面态排列扭曲向列相液晶看成空间位置有序、光轴空间方向无序的一维散射介质。由数值计算得出,随着无序度的增加,在这种介质中光场的分布从有序变为随机。当无序度达到一定值时,导致光场 Anderson 局域化出现,这种局域化使光在局域处得到相干反馈放大。

由于平面态扭曲向列相液晶器件的螺旋周期性排列,形成了自组装的一维光子带隙结构。即具有选择反射特性,选择反射中心波长为  $\lambda_0 = \langle n \rangle p$ , 带宽为  $\Delta\lambda = n_e - n_o$  ( $n_e$  为液晶分子长轴方向的折射率,  $n_o$  为液晶分子短轴方向的折射率,  $\langle n \rangle$  为平均折射率)。在反射禁带边界处,光子态密度发散增长,增益增强。当增益超过损耗时产生激光<sup>[11~13]</sup>。根据布拉格模型(Bragg mode),沿着器件螺旋轴的方向产生的光强最大<sup>[8]</sup>,与实验现象相符。

## 4 结 论

研究了掺杂激光染料 DCM 和手性剂 CB15 的向列相液晶器件中的激光辐射行为。经过取向层反平行摩擦处理,实现了扭曲向列相液晶平面织构态分子排列。由扭曲向列相液晶螺旋周期结构提供分

布反馈,以激光染料 DCM 为增益介质,得到了激光辐射,辐射中心波长为 606 nm。测得激光辐射最小线宽大约 10 nm。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Fuzi. New directions in recent liquid crystal studies—the progress in foundational research of non-display application of liquid crystals[J]. *Progress in Physics*, 2008, **28**(2): 107~128
- 2 杨傅子. 近期液晶研究中的几个新方向—液晶非显示应用基础研究的进展[J]. *物理学进展*, 2008, **28**(2): 107~128
- 3 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Incoherent radiation of amplifying random media[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 364~369
- 4 叶云霞, 范滇元. 增益随机散射介质中的非相干辐射[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3): 364~369
- 5 Zhang Yu, Wang Gang, Cui Yiping *et al.*. Electrochemical deposition and stimulated emission of zinc oxide thin films[J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(1): 97~100
- 6 张宇, 王刚, 崔一平等. 氧化锌薄膜的电化学沉积法制备及受激发射研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(1): 97~100
- 7 Wang Kejia, Wang Hong, Liu Jinsong. Recent development of random lasers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2003, **40**(2): 51~61
- 8 王可嘉, 王宏, 刘劲松. 随机激光器的最新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2003, **40**(2): 51~61
- 9 Zhou Libing, Liu Jinsong, Wang Kejia *et al.*. Research progress of random laser action in liquid crystal [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(9): 16~24
- 10 周利兵, 刘劲松, 王可嘉等. 液晶随机激光辐射研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(9): 16~24
- 11 He Benqiao, Liao Qing, Huang Yong. Random lasing in a cholesteric liquid crystal polymer solution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1477~1480
- 12 何本桥, 廖青, 黄勇. 胆甾型液晶溶液膜中的随机激光[J]. *中国激光*, 2008, **35**(10): 1477~1480
- 13 T. Matsui, R. Ozaki, K. Funamoto *et al.*. Flexible lasers made from cholesteric liquid crystal polymers[J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2004, **413**: 507~514
- 14 L. M. Blinov, G. Cipparrone, V. V. Lazarev. Lasing in cholesteric liquid crystal cells; competition of Bragg and leaky modes[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, **101**: 053104
- 15 A. Chanishvili, G. Chilaya, G. Petriashvili. Phototunable lasing in dye-doped cholesteric liquid crystals[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, **83**(26): 5353~5355
- 16 D. E. Lucchetta, L. Criante, O. Francescangeli *et al.*. Compact lasers based on HPDLC gratings[J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **441**: 97~109
- 17 Yohko Hatae, M. Moritsugu, T. Ogata *et al.*. Photochemical modulation of the wavelength of lasing from a dye-doped cholesteric liquid crystal[J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2005, **443**: 87~94
- 18 Huang Yuhua, Zhou Ying, Wu Shintson. Lasing in dye-doped photonic liquid crystal devices[J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2006, **453**: 251~262
- 19 Zhou Ying, Huang Yuhua, A. Rapaport *et al.*. Experimental investigation of laser emission of dye-doped cholesteric liquid crystals with a cholesteric reflector[J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2006, **454**: 377~385
- 20 Zhang Jun, Li Qing, Wei Jing *et al.*. Research on the formation and phase transition of reflective CHLCD multi-domain structure [J]. *Optoelectronic Technology*, 2005, **25**(4): 226~228
- 21 张俊, 李青, 韦静等. 反射型胆甾相液晶显示器件多畴结构的形成及相变的研究 [J]. *光电子技术*, 2005, **25**(4): 226~228

- 15 Liu Jinsong, Wang Chun, Xiong Zheng. Origin of light localization from orientational disorder in one and two-dimensional random media with uniaxial scatterers[J]. *Phys. Rev. B*, 2006, **73**(19): 195110
- 16 Liu Jinsong, Xiong Zheng. Theoretical investigation on the threshold property of localized modes based on spectral width in two-dimensional random media [J]. *Opt. Commun.*, 2006, **268**(2): 294~299
- 17 Chun Wang, Jinsong Liu, Kejia Wang *et al.*. Threshold gain behavior of lasing modes in two-dimensional active random media [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(4): 215~218