

染料掺杂胆甾相液晶激光器的特性研究

乌日娜¹, 李漫¹, 史瑞新², 郭小娇¹, 岱钦¹, 姚俊¹

(1. 沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159; 2. 吉林大学口腔医学院, 吉林 长春 130021)

摘要: 研制了染料掺杂胆甾相液晶激光器, 测试分析了器件激光输出特性。将激光染料 DCM、手性剂 S-811、液晶 TEB30A 按一定比例混合, 注入摩擦取向的液晶盒中, 形成平面态排列的胆甾相液晶激光器件。利用 532 nm 波段的 Nd:YAG 脉冲倍频激光泵浦液晶器件, 获得了禁带边沿激光输出, 测量分析了激光能量阈值特性与激光光斑能量分布特点。液晶激光器在光子禁带边沿 607 nm 和 680 nm 处获得激光输出, 线宽小于 0.5 nm。在液晶器件中, 光子禁带边缘处光子态密度最大, 此处器件阈值较低, 容易产生激光辐射。

关键词: 染料液晶激光器; 光子禁带; 能量阈值

中图分类号: TN241; O752+.2 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0305002

Research of dye-doped cholesteric nematic liquid crystal laser characteristic

Wu Rina¹, Li Man¹, Shi Ruixin², Wu Xiaojiao¹, Dai Qin¹, Yao Jun¹

(1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;
2. School and Hospital of Stomatology, Jilin University, Changchun 130021, China)

Abstract: Dye-doped cholesteric liquid crystal laser was designed and manufactured, and the output characteristic of the device was measured and analyzed. The cholesteric liquid crystal laser device of planar alignment state texture was prepared by doping laser dye DCM and chiral compound S-811 into nematic liquid crystal TEB30A. By using doubled frequency 532 nm Nd:YAG pulsed laser as pumping source to pump the device, the band edge lasing emission was obtained at 607 nm and 680 nm. The line-width was less than 0.5 nm. Then the energy threshold characteristic of the laser and the energy distribution of the lasing spot were measured and analyzed. In the liquid crystal device, photonic density of states is greatest at the edge of the photonic band gap, threshold is lower and laser radiation is obtained easily.

Key words: dye-doped liquid crystal laser; photonic band edge; energy threshold

收稿日期: 2016-07-05; 修订日期: 2016-08-03

基金项目: 国家自然科学基金(61378075); 辽宁省高校杰出青年学者成长计划(LJQ2015093);

沈阳理工大学激光与光信息辽宁省重点实验室开放基金

作者简介: 乌日娜(1978-), 女, 副教授, 博士, 主要从事光电功能材料及器件方面的研究。Email: wurina2007@126.com

0 引言

胆甾相液晶可实现自组装的一维光子晶体结构,具有选择反射带^[1-2]。染料掺杂胆甾相液晶器件中,在一定泵浦光的作用下,光子禁带边缘处产生激光辐射,具有制备工艺简单、泵浦阈值低、体积小、易于集成等优势,近年来备受关注^[3-4]。

Lin Shihung 等^[5]研究了含有光致异构材料的胆甾相液晶激光器的激光调谐特性。Hiroyuki Yoshida 等^[6]通过在胆甾相液晶层下放置一层活性聚合物提供辅助增益,降低了胆甾相液晶激光器的激光辐射阈值。张伶俐等^[7]制备了基于多层膜结构 ITO 玻璃基板的胆甾相液晶激光器,获得了低阈值激光输出,激光峰位于 600 nm 和 650 nm,并通过电压控制在单模和多模发射间进行切换。Lin Jahon 等^[8]研究了不同温度下光子禁带长波和短波边缘激光辐射模式的竞争,以及激光强度和波长随温度变化情况。刘丽娟等^[9]以 DCJTI 为工作物质,制备了基于聚合物支撑形貌光栅的分布反馈式激光器,得到中心波长为 648 nm 激光,阈值为 0.65 J/pulse,转化效率为 1.6%,线宽为 0.3 nm。罗吉祥等^[10]采用电击摩擦法,对染料掺杂胆甾相液晶样品进行处理,使胆甾相液晶内部分子排列得到改善,器件的激光效率得到明显提高。

文中设计制作了 DCM 染料掺杂胆甾相液晶激光器,分析了器件的光子带隙结构,采用 532 nm 脉冲激光作为泵浦光源,获得了 607 nm 和 680 nm 激光输出,对输出激光能量阈值特性与激光光斑能量分布进行了测量和分析。

1 实验

实验将向列相液晶 TEB30A(清亮点 61℃,黏度为 42 mm²/s@20℃,折射系数为 $n_e=1.692, n_o=1.522, \Delta n=0.170$)、手性剂 S-811(4-(4-乙氧基)苯甲酰氧基苯甲酸(S)(+)-2-辛醇脂)和激光染料 DCM 分别按 73.3 wt%、25.7 wt%、1 wt% 比例混合均匀,在玻璃基板上旋涂 PI 取向剂,300℃高温下固化 2 h,进行摩擦处理,利用隔热物制作成反平行液晶盒,液晶盒厚度 40 μm,将混合液晶注入到液晶盒内,完成胆甾相液晶激光器的制备。

利用偏光显微镜(LEXT QLS4100)观察样品织构,利用紫外分光光度计(UV757CRT)测量器件光子禁带结构。

将器件放置两周时间使器件形成大面积较好的平面排列态结构。利用脉冲重复频率 5 Hz 的 532 nm Nd:YAG 倍频脉冲激光泵浦液晶器件,泵浦光的入射方向与样品表面法线方向约成 45°,利用光纤光谱仪(Avantes)沿垂直样品表面方向探测输出激光。激光实验测试装置如图 1 所示。

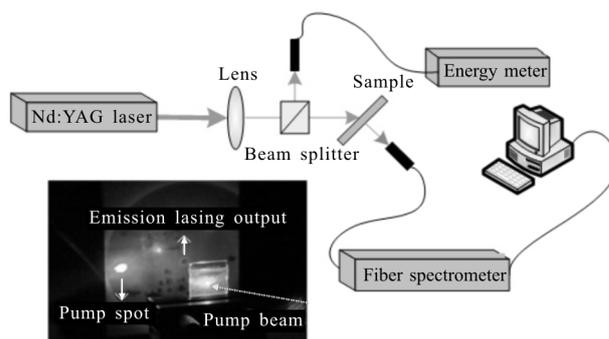


图 1 实验及探测装置

Fig.1 Framework of experiment and detection device

2 结果与分析

样品织构测量结果如图 2 所示,由图 2(a)可以看出器件形成了较大面积的平面排列态织构^[11]。染料液晶器件的透射光谱如图 2(b)所示,由图可以看

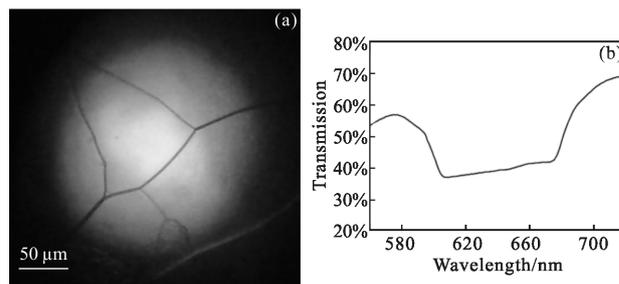


图 2 器件织构和透射谱(a)平面排列态织构(b)光子禁带
Fig.2 Texture and transmission spectrum of sample (a) planar alignment state texture (b) photonic band gap

出光子禁带结构,光子禁带的两个边缘分别位于 608.5 nm 和 673.5 nm。胆甾相液晶具有选择反射特性,能选择性的反射与液晶分子相同取向的圆偏振光。样品选择反射中心波长可以用 $\lambda_0=\langle n \rangle p$ 计算,其反射带宽为 $\Delta\lambda=\Delta n \cdot p$ 。其中 $\langle n \rangle=(n_e+n_o)/2, \Delta n=n_e-n_o$ (向列相液晶 TEB30A 的折射率分别为 $n_e=1.692, n_o=$

1.522)。螺距 p 的计算公式为 $p=1/(HTP \cdot c)$, 其中 HTP 显示了手性剂的扭曲能力, c 为手性剂所占的质量百分比。实验过程中选用的手性剂 S-811 的 HTP 值为 $10.1/\mu\text{m}^{-1}25^\circ\text{C}$, 经计算可得螺距的理论值约为 385 nm 。这与实验结果相匹配。

泵浦光的入射方向与样品表面法线方向成 45° 时, 在液晶器件后面白屏可观察到红色激光光斑, 如图 3 所示。利用光纤光谱仪探测输出激光波长, 在短波边沿 607 nm 和长波边沿 680 nm 处同时探测到激光峰输出, 输出激光光谱如图 4 所示。器件在一定的

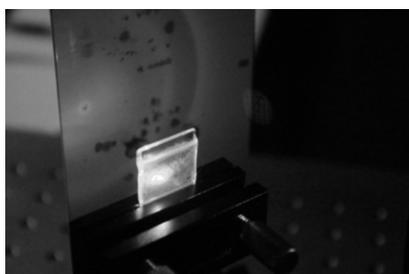


图 3 输出激光光斑图

Fig.3 Output laser spot

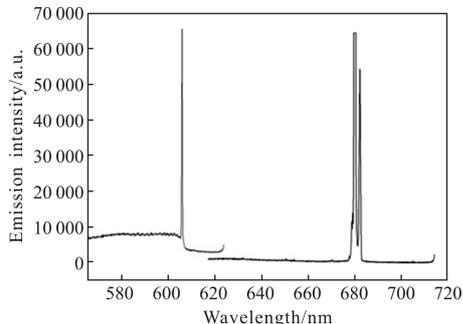


图 4 器件激光辐射谱图

Fig.4 Laser radiation spectrum of sample

泵浦激励下, 在器件光子禁带外的染料荧光会顺利透过, 而在光子禁带内且与胆甾相液晶旋向一致的荧光会在器件中来回多次反射获得增益放大。由光子态密度理论, 光子禁带边沿, 光子的群速度趋于零, 可以存在很长的光程, 光子发生多重反射, 形成驻波相干, 加强了增益。而在整个禁带里面, 群速度为虚数, 不会有光子存在, 光子禁带边沿光子数密度发生突变, 适合激光的产生和输出。光子禁带长波边沿和短波边沿处的激光辐射之间存在竞争^[8]。光子禁带长波边沿出现两个峰或多个峰的原因, 染料液晶器件平面态排列不均匀, 使得液晶畴的螺旋轴

取向不完全一致, 有效螺距值有所浮动。

为测量输出激光的能量阈值特性, 实验针对短波边沿 607 nm 处的激光辐射峰进行数值研究。输出激光强度随泵浦能量的变化如图 5 所示, 在较低泵浦光能量下, 染料液晶器件辐射光呈现一个较宽的自发辐射谱。当泵浦光能量增加到 5.5 mJ 时, 光子数密度显著增加, 禁带边沿出现激光, 在白屏上能观察到激光光斑。随着泵浦能量的增大, 器件输出激光强度增强。而泵浦光能量过大器件将产生热效应, 影响激光输出。由于泵浦染料液晶器件时采用了光阑等装置, 入射到染料液晶器件的光斑尺寸相对较小, 因此实际作用到器件的泵浦光能量相对实验测得的泵浦能量数据要小, 但这不影响激光阈值特性的分析。对于长波边沿 680 nm 处的激光辐射, 其能量阈值特性具有相同的趋势。

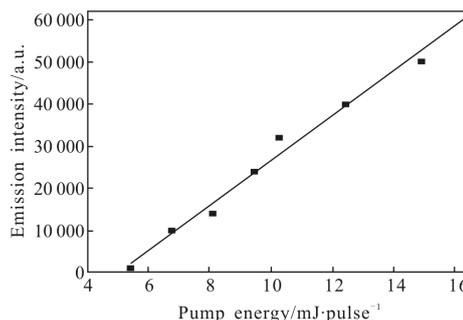


图 5 器件的输出能量与泵浦能量的关系

Fig.5 Relationship between the output energy and pumping energy

实验采用激光光束分析仪 (LBA-USB-L230) 测量了器件激光辐射形成的光斑的全部空间特征, 即能量分布情况, 结果如图 6 所示, 可以看出, 输出激光近似为高斯分布。此时泵浦光单次泵浦能量约为 12.6 mJ 。

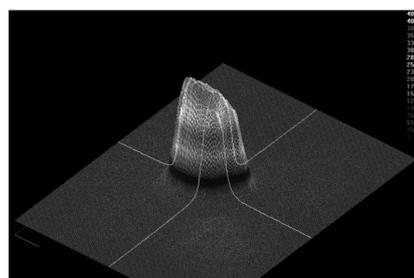


图 6 激光光斑能量分布

Fig.6 Energy distribution of the lasing spot

3 结论

将向列相液晶 TEB30A、手性剂 S-811、激光染料 DCM 分别按 73.3 wt%、25.7 wt%、1 wt% 的比例混合均匀注入反平行液晶盒,制成染料掺杂胆甾相液晶激光器件。采用 532 nm 波段脉冲激光对器件进行泵浦,在光子禁带的长波和短波边沿同时获得稳定的激光输出,输出激光波长分别为 680 nm 和 607 nm。激光阈值能量为 5.5 mJ,线宽小于 0.5 nm。测量分析了激光光斑能量分布。在光子禁带边沿处光子态密度最大,此处器件阈值最低最容易产生激光。

参考文献:

- [1] Yuko Matsuhisa, Huang Yuhua, Zhou Ying, et al. Cholesteric liquid crystal laser in a dielectric mirror cavity upon band-edge excitation[J]. *Optics Express*, 2007, 15(2): 616-622.
- [2] Tong Qing, Rong Xing, Zhang Xinyu, et al. Large-area arrayed liquid crystal device for measuring and regulating polarization state of incident light [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 474-478. (in Chinese)
佟庆, 荣幸, 张新宇, 等. 用于测量和调控入射光偏振态的大面积阵列液晶器件 [J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 474-478.
- [3] Kopp V I, Fan B, Vithana H K M, et al. Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystal[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(1): 1707-1709.
- [4] Liu Yongjun, Sun Weimin, Liu Xiaoqi, et al. Investigation of the tunable laser of one-dimensional photonic crystal with dye-doped nematic liquid crystal defect layer [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(11): 114211. (in Chinese)
刘永军, 孙伟民, 刘晓颀, 等. 向列相液晶染料可调谐激光器的研究[J]. 物理学报, 2012, 61(11): 114211.
- [5] Lin S H, Shyu C Y, Liu J S, et al. Photo erasable and photo rewritable spatially-tunable laser based on a dye-doped cholesteric liquid crystal with a photoisomerizable chiral dopant[J]. *Optics Express*, 2010, 18(9): 9496-9503.
- [6] Yoshida H Y, Shiozaki Y, Inoue Y, et al. Threshold improvement in uniformly lying helix cholesteric liquid crystal laser using auxiliary π -conjugated polymer active layer [J]. *J Appl Phys*, 2013, 113(20): 203105.
- [7] Zhang Lingli, Sun Xiudong, Liu Yongjun, et al. Cholesteric liquid crystals laser with external cavity[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2013, 28(5): 679-682. (in Chinese)
张伶俐, 孙秀冬, 刘永军, 等. 具有外部谐振腔的胆甾相液晶激光器的研究[J]. 液晶与显示, 2013, 28(5): 679-682.
- [8] Lin J H, Chen P Y, Wu J J. Mode competition of two bandedge lasing from dye doped cholesteric liquid crystal laser[J]. *Optics Express*, 2014, 22(8): 9932-9941.
- [9] Liu Lijuan, Huang Wenbin, Diao Zhihui, et al. Low threshold distributed feedback laser based on scaffolding morphologic and holographic polymer dispersed liquid crystal gratings[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(19): 101-106. (in Chinese)
刘丽娟, 黄文彬, 刁志辉, 等. 基于聚合物支撑形貌液晶/聚合物光栅的低阈值分布反馈式激光器 [J]. 物理学报, 2014, 63(19): 101-106.
- [10] Luo Jixiang, Huang Yuhua, Ye Lihui. Laser enhancement in dye-doped cholesteric liquid crystals [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(7): 184-189. (in Chinese)
罗吉祥, 黄玉华, 叶丽慧. 胆甾相液晶激光效率的提高研究[J]. 激光与光电子进展, 2015, 52(7): 184-189.
- [11] Dai Qin, Wu Xiaojiao, Wu Jie, et al. Preparation and research of dye-doped chiral nematic liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2014, 29(6): 922-925. (in Chinese)
岱钦, 邬小娇, 吴杰, 等. 染料掺杂手性向列相液晶激光器的制备和研究[J]. 液晶与显示, 2014, 29(6): 922-925.