

文章编号:1007-2780(2014)06-0922-04

染料掺杂手性向列相液晶激光器的制备和研究

岱 钦, 鄒小娇, 吴 杰, 毛有明, 乌日娜*
(沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:设计制作了 PM597 染料掺杂手性向列相液晶器件,研究了其激光辐射行为。混合激光染料 PM597、手性剂 S-811、向列相液晶 TEB30A,制成平面态织构的手性向列相液晶激光器件。采用固体 Nd : YAG 倍频 532 nm 波长激光作为抽运光,在光子禁带短波和长波边沿同时获得波长分别为 571.1、615.5 nm 的激光输出。对于器件产生激光辐射的机理,采用光子态密度理论进行了分析,根据实际样品各成分的配比,模拟出态密度随波长的变化曲线。在器件中,光子禁带边沿处光子态密度最大,此处器件阈值较低,容易产生激光辐射。

关 键 词:手性向列相液晶;染料掺杂液晶激光器;光子态密度;光子禁带

中图分类号:TN241;O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20142906.0922

Preparation and research of dye-doped chiral nematic liquid crystal

DAI Qin, WU Xiao-jiao, WU Jie, MAO You-ming, WU Ri-na*
(School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: Dye-doped chiral-nematic liquid crystal laser was designed and manufactured, and the laser radiation was researched. The chiral-nematic liquid crystal laser device of planar texture was prepared by doping laser dye PM597 and chiral compound S-811 into nematic liquid crystal TEB30A. By using a second harmonic Q-switched Nd : YAG pulsed laser ($\lambda = 532$ nm) as pumping source, the laser of 571.1, 615.5 nm are obtained at the short-wave and long-wave of the photonic band edges. The theory of density of optical state is used to prepare dye-doped cholesteric liquid crystal laser. According to the proper proportion of device component, the curve of density of state varying with the wavelength is simulated. In the device, density of optical state is maximum at the wave of the photonic band edge, threshold is lower and laser radiation is obtained easily.

Key words: chiral-nematic liquid crystal; dye-doped liquid crystal laser; density of optical state; photonic band edge

1 引 言

目前随着液晶相关理论的健全,一系列基于液晶特殊光学性能的器件已被开发出来,并广泛

应用于众多领域,如显示、激光器件、医学诊断、空间光调制器等^[1-3]。胆甾相液晶由于其层状的周期性螺旋结构,可以看作自组装的一维光子晶体,它具有类似光子晶体的光子禁带结构。以适当比例将激光染料掺入胆甾相液晶可以制成分布反馈

(DFB)式液晶激光器。这种染料掺杂液晶激光器是一种新型的激光器,具有制备简单、体积小、输出波长可调谐等优点,符合器件逐渐微型化的发展趋势。激光是现代科技不可替代的优秀相干光源,而液晶激光器件使激光器微型化、集成化成为可能。

目前国内外对液晶激光器的研究发展很快,进展迅速。1973 年 L. S. Goldberg 和 J. M. Schnur 提出染料掺杂胆甾相液晶激光器的方案^[4]。2012 年 Jurgen Schmidtke 等人研究了掺有 DCM 激光染料胆甾相液晶激光器的电场调谐特性^[5]。2010 年苑梦尧等讨论了共面转换模式下电场对胆甾相液晶螺距的影响,为电控反射式彩色显示与电场调谐液晶激光器提供借鉴^[6]。2013 年张伶俐等制作了掺杂 DCM 激光染料具有外部谐振腔的液晶激光器,通过电压控制可在单模和多模发射间进行切换^[7]。激光染料 PM597 具有很高的量子效率和较小的三重态吸收,是一种高效的激光染料,目前对掺杂激光染料 PM597 的液晶激光器研究较少,本论文主要对掺有 PM597 激光染料的手性向列相液晶激光器的激光辐射行为进行了研究。成功制作了染料掺杂手性向列相液晶激光器件。在 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲固体激光器泵浦下,获得了稳定的激光输出。采用光子态密度理论进行了分析,根据实际样品各成分的配比,模拟出态密度随波长的分布曲线。

2 实 验

在镀有 ITO 的玻璃基板上旋涂一层 PI 取向剂,高温(200 ℃)固化 2 h。摩擦处理,加 40 μm 隔垫物,制作成反平行液晶盒并做封胶处理。将向列相液晶 TEB30A、手性剂 S-811、激光染料 PM597 分别按 68.6%、29.4%、2% 的质量分数混合均匀并注入液晶盒,完成样品制备。用偏光显微镜观察样品的织构。利用紫外分光光度计(UV757CRT,凌光)测量器件透射谱,确定光子禁带位置。用 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲固体激光器(脉宽 20 ns,重复频率为 5 Hz)激发配制好的药品,获得 PM597 的荧光光谱。由于染料对 532 nm 的激光吸收效果较好,所以采用 532 nm 脉冲固体激光器作为泵浦光源。利用多通道光纤光谱仪(Avantes)测量器件的激光辐射谱线,实验

及探测装置如图 1 所示。

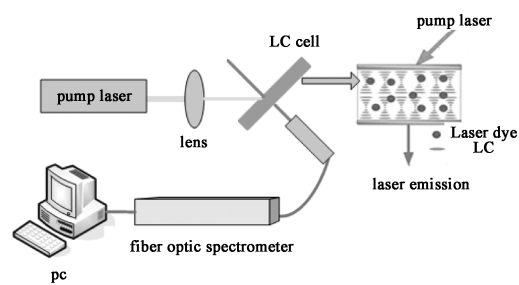
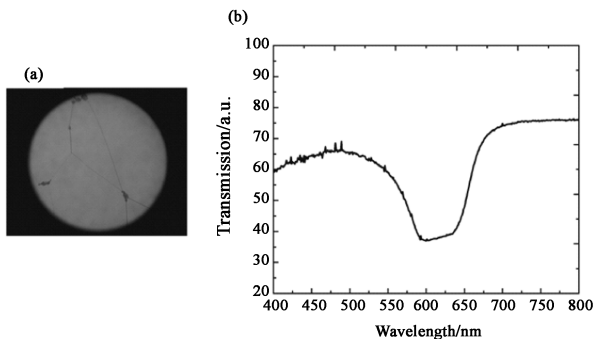


图 1 实验及探测装置示意图
Fig. 1 Framework of experiment and detection device

3 结果及分析

手性向列相液晶可以看成许多液晶薄层重叠而成,同一薄层内液晶分子指向矢方向一致,但相邻两薄层内液晶指向矢具有一定夹角。指向矢方向随着层数的增加旋转 360°为一个周期,液晶分子旋转一周所经过的长度称为螺距。对液晶盒表面进行反平行摩擦处理,该摩擦方式能使液晶分子的螺旋周期延续下去,且螺旋轴垂直于样品表面形成平面态织构。图 2(a)为在正交偏光显微镜下观察到的样品照片,显示了 oily-streak lines 织构,说明形成了平面态排列。



(a)在偏光显微镜下呈平面态织构排列
(b)光子禁带
(a)State plane texture under polarizing microscope (b) Photonic band edge

图 2 样品织构和透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum and texture of sample

从样品的透射谱中可以清楚看到光子禁带的位置,如图 2(b)所示,光子禁带的两个边沿分别

位于 585.5 nm 和 632.5 nm。胆甾相液晶具有选择反射特性,能选择性地反射与液晶分子相同旋向的圆偏振光。由于实验采用的自然光同时包含左旋和右旋光,因此禁带位置的透射率为总强度的 50% 左右。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 $\Delta\lambda = \Delta n p$ 。其中 $\langle n \rangle = (n_e + n_o)/2$, $\Delta n = n_e - n_o$ ($n_e = 1.692$, $n_o = 1.522$), p 为螺距。

将激光染料 PM597 掺入手性向列相液晶中,其光致激发产生的荧光光谱如图 3 所示。该荧光虽为非偏振光,但大部分光谱正好落入手性向列相液晶的光子禁带中。荧光中与手性向列相液晶旋向一致的圆偏振光会被多次反射,并被束缚在光子禁带内部。在多次反射中获得反馈放大,并最终产生激光。

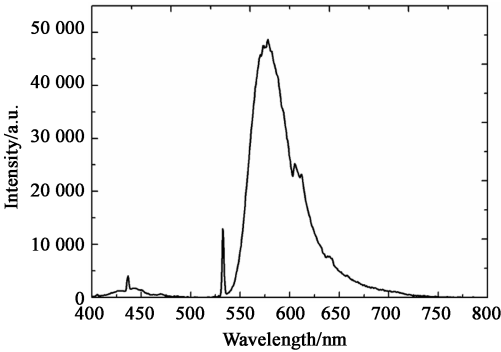


图 3 PM597 的荧光光谱

Fig. 3 Fluorescence spectrum of PM597

用 532 nm 的固体脉冲激光泵浦样品,在短波边沿 571.2 nm 处和长波边沿 615.5 nm 处同时观察到稳定的激光输出。

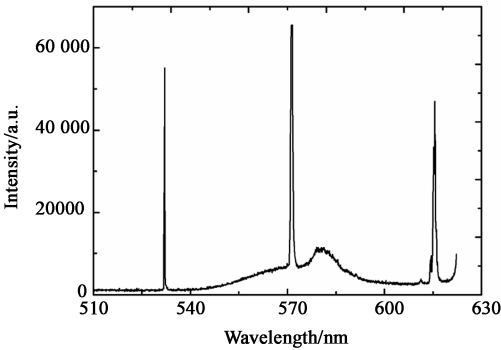


图 4 样品激光辐射图谱

Fig. 4 Laser radiation spectrum of sample

4 态密度理论

采用光子态密度理论加以研究产生激光辐射的机理。态密度(DOS)可以看成群速度的倒数,表示单位体积、单位角频率内波数的密度。其公式表示为 $DOS = dk/d\omega$,即群速度取极小值处光子态密度最大。这可以理解为该处阈值最低易产生激光辐射,而其他位置阈值则大得多。若忽略样品对光的吸收作用,且样品折射率为胆甾相液晶的平均折射率,手性向列相液晶激光器件的透射系数可以表示为^[9]:

$$t = \frac{4\pi\beta e^{i2\pi L/p}}{4\pi\beta \cos\beta L + i p(\beta^2 - k^2 + (2\pi/p)^2) \sin\beta L}, \tag{1}$$

式中: $\beta^2 = k^2 + 4\pi^2/p^2 - k \sqrt{(4\pi)^2/p^2 + k^2 \delta^2}$, p 是胆甾相液晶器件的螺距, $k^2 = (\omega/c_0)^2 \langle \epsilon \rangle$ 。 $\langle \epsilon \rangle = (\epsilon_{//} + \epsilon_{\perp})/2$ 是平均介电常数, $\delta = (\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp})/(\epsilon_{//} + \epsilon_{\perp})$ 为各向异性系数。胆甾相液晶器件透射系数的实部和虚部分别为:

$$X = \frac{16\pi^2 \beta^2 \cos\beta L}{(16\pi^2 \beta^2 + k^4 \delta^2 p^2 \sin^2\beta L)}, \tag{2}$$

$$Y = \frac{4\pi\beta(\beta^2 p^2 - k^2 p^2 + 4\pi^2) \sin\beta L}{16\pi^2 \beta^2 p + k^4 \delta^2 p^2 \sin^2\beta L}. \tag{3}$$

样品厚度为 L ,则光在样品中传播产生的相位差为 $\varphi = kL$,则态密度为^[10]:

$$\rho(\omega) = (1/L)(YX - XY)/(X^2 + Y^2). \tag{4}$$

根据实际样品各成分的配比,按照上述关系可以模拟出态密度随波长的分布曲线。

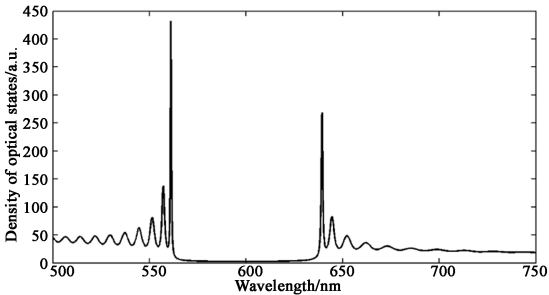


图 5 光子态密度随波长的变化分布曲线

Fig. 5 Distribution curve of density of optical state along with the change of wavelength

如图 5 所示,禁带边沿,光子的群速度趋于零,可以存在很长的光程,光子可以在这个结构里发生多重反射,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,所以不会有光子存在。

5 结 论

制作了掺杂 PM597 激光染料的手性向列相液晶激光器件,分别按 2%、29.4%、68.6% 的浓度混合激光染料 PM597、手性剂 S-811、向列相液

晶 TEB30A,获得的光子禁带能与 PM597 荧光谱较好的重叠。采用 532 nm 脉冲固体激光器对样品进行泵浦,在光子禁带的长波和短波边沿同时产生稳定的激光输出,波长分别为 615.5 nm 和 571.2 nm。采用光子态密度理论模拟分析了手性向列相液晶激光器产生激光的机理,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辐射。

参 考 文 献:

- [1] 贺锋涛,贾琼瑶,孙林军.液晶激光投影显示系统设计[J].红外与激光工程,2012,41(10):2700-2702.
He F T, Jia Q Y, Sun L J. Design of liquid crystal laser projection display system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10):2700-2702. (in Chinese)
- [2] 邱基斯,樊仲维,唐熊忻,等.基于液晶空间光调制器整形的重频 100mJ 全固态 1053 nm 钕玻璃激光放大[J].红外与激光工程,2012,41(10):2637-2643.
Qiu J S, Fan Z W, Tang X X, *et al.* 100 mJ high beam quality all-solid-state 1053nm Nd:glass amplifier at repetition frequency shaping by LCSLM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10):2637-2643. (in Chinese)
- [3] 程少园,曹召良,胡立发,等.液晶自适应光学扫描激光检眼镜的光学系统设计[J].红外与激光工程,2012,40(2):253-257.
Cheng S Y, Cao Z L, Hu L F, *et al.* Design of scanning laser ophthalmoscope system with LC adaptive optics [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 40(2):253-257. (in Chinese)
- [4] Goldberg L S, Alexandria, Schnur J M, *et al.* Tunable internal-feedback liquid crystal-dye laser: United States, 3771065[P]. 1973-11-06.
- [5] Jurgen S, Gisela J, Susanne K B, *et al.* Electrical fine tuning of liquid crystal lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(5):051117-1-051117-4.
- [6] 苑梦尧,邓罗根.液晶盒边界效应对胆甾相液晶电控螺距的影响[J].液晶与显示,2010,25(1):21-28.
Yuan M Y, Deng L G. Effects of liquid cell's boundary conditions on electric tuning of cholesteric liquid crystal spiral pitch [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2010, 25(1):21-28. (in Chinese)
- [7] 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.
Zhang L L, Sun X D, Liu Y J, *et al.* Cholesteric liquid crystals laser with external cavity [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystal and Display*, 2013, 28(5):679-682. (in Chinese)
- [8] Wu R N, Li Y, Wu J, *et al.* A study of lasing wavelength by DOS in the temperature-tunable cholesteric liquid crystal lasers [J]. *Optics Communications*, 2013, 300:1-4.
- [9] Mikhail I B, Lev M B, Vladimir V L, *et al.* Lasing from photonic structure:cholesteric-voltage controlled nematic-cholesteric liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 103(12):123113-1-123113-7.
- [10] Blinov L M. Lasers on cholesteric liquid crystals: mode density and lasing threshold [J]. *JETP Letters*, 2009, 90(3):166-171.

作者简介:岱钦(1977—),男,内蒙古人,博士,副教授,主要从事激光器件技术方面的研究。E-mail: daiqin2003@126.com