

文章编号: 1000-7032(2018)09-1305-05

梳状电极胆甾相液晶激光器的激光辐射谱

岱 钦, 李 漫, 王 兴, 李业秋, 乌日娜*

(沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要: 设计制作了梳状电极染料掺杂胆甾相液晶激光器件,研究了外加电压下的激光辐射谱。器件的下基板ITO电极刻蚀成梳状条形电极,电极宽度约2 mm,相邻电极间距分别约为1,3,5 mm。上基板无ITO电极。上下基板取向膜平行摩擦取向处理,使胆甾相液晶平面态排列。以532 nm的Nd:YAG激光器作为泵浦光源,测量器件激光辐射谱。改变外加电压0~100 V,3个区域均出现了多模输出。在1 mm电极间距区域,可获得633.65~621.52 nm(12 nm)和683.15~664.35 nm(18 nm)的可调谐波长范围;在电极间距3,5 mm区域,辐射激光波长变化微小。在外加电压作用下,液晶分子均匀的螺旋周期排列受到扰动,液晶分子层螺旋轴倾斜,各个液晶畴的螺旋轴取向不一致,使有效螺距值缩短并有所浮动,引起出射激光波长蓝移和多模输出。利用光子态密度理论数值模拟了激光辐射谱。当有效螺距为倾斜角的函数时,随着倾斜角增大出射激光波长蓝移。

关键词: 胆甾相液晶激光器; 梳状电极; 激光辐射谱; 电压

中图分类号: O753+.2

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183909.1305

Lasing Spectrum of Cholesteric Liquid Crystal with Interdigitated Electrodes Pattern

DAI Qin, LI Man, WANG Xing, LI Ye-qiu, WU Ri-na*

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

* Corresponding Author, E-mail: wurina2007@126.com

Abstract: The dye doped cholesteric liquid crystal (CLC) laser with interdigitated electrodes pattern was designed and the lasing spectra of the device in different voltages were investigated. The bottom glass substrate was patterned with interdigitated ITO electrode using the laser etching method. The width of a single electrode was approximately 2 mm and the distances between neighboring electrodes were approximately 1, 3 and 5 mm, respectively. There were no ITO electrodes on the upper glass substrate. In order to achieve a planar alignment state of CLC, a parallel rubbing treatment was performed on both substrates. A 532 nm Nd:YAG pulsed solid-state laser was used to pump the cell. When the voltage changed from 0 to 100 V, a multi-wavelength lasing was obtained. A tunable output lasing was obtained at the wavelength range of 633.65 – 621.52 nm (12 nm) and 683.15 – 664.35 nm (18 nm) where the distance between neighboring electrodes was approximately 1 mm. However, the lasing spectra were scarcely modified if the distances between neighboring electrodes were approximately 3 mm and 5 mm. Under an applied external voltage, the uniform helical alignment of CLC was disturbed and the helical axis was tilted. This cause equivalent helical pitch

收稿日期: 2017-09-27; 修订日期: 2017-11-19

基金项目: 国家自然科学基金(61705145,61378042); 辽宁省自然科学基金(201602649); 沈阳市科技计划(F17-33-6-00); 高等学校创新人才支持计划(LR2016079)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(61705145,61378042); Antural Science Foundation of Liaoning Province(201602649); Shenyang Science and Technology Plan Project(F17-33-6-00); Support Program for Innovative Talents in Liaoning University(LR2016079)

shrinks and floating. Therefore, the output lasing wavelength can be blue-shifted and multimode lasing was presented. The lasing spectrum was simulated using optical density theory. When the helical pitch is a function of a tilt angle, the output lasing blue-shift increases with tilt angle.

Key words: cholesteric liquid crystal laser, interdigitated electrodes pattern, lasing spectrum, voltage

1 引 言

近年来,胆甾相液晶激光器作为一种新型的激光器受到了很多研究人员的关注。与其他种类的有机或无机光子禁带末端激光器和分布反馈式激光器比较,胆甾相液晶激光器具有明显的优势。利用成熟的液晶器件制作工艺,器件易获得,成本低;无需谐振腔,尺寸微小,结构简单;利用液晶在外场(光,热,电,磁,应力场等)作用下的折射率变化,实现辐射激光波长调谐,易调谐^[1-7]。激光染料作为增益介质其光谱可以覆盖从紫外到红外的较宽范围,易获得宽范围调谐波长。因此在光通讯、光子集成和生物医学工程等领域显示了极强的应用潜力。

利用光、热、应力场等来获得激光波长调谐,需要液晶盒以外的附件提供外加的光、热、应力场,从而使器件结构复杂化。而电场调谐方式,直接利用玻璃基板上的 ITO 电极,原则上更加适合液晶器件,但尚未实现全部潜力。目前多数研究致力于获得宽的调谐范围。2006 年, Lin 等采用负性液晶获得了胆甾相液晶激光器电场调谐波长范围为 14 nm^[8]。2011 年, Lee 等实现了既可以由光调谐,也可以电场调谐波长的器件,调谐范围约为 16 nm^[9]。2016 年, Xiang 等使胆甾相液晶分子倾斜于螺旋轴 θ (锐角)螺旋排列,获得了 100 nm 的电场调谐波长范围^[10]。2015 年,本课题组获得了负性胆甾相液晶器件约 18.5 nm 范围的激光波长调谐输出^[11]。

为了获得更加灵活、使用方便的电场调谐激光波长,本文设计制作了不等距梳状电极的胆甾相液晶激光器件,研究器件激光辐射特性,并进行了深入的分析。

2 实 验

2.1 器件结构设计及样品制备

胆甾相液晶平面排列态是获得禁带末端激光辐射的关键。为了不破坏液晶分子螺旋周期性排列,正性液晶需施加横向电场。器件结构如图 1 所示,

利用激光刻蚀法,使下基板的 ITO 形成条形电极,间距分别约为 1, 3, 5 mm, 电极宽度为 2 mm。上基板没有 ITO 电极。两个基板旋涂 PI 取向剂, 高温固化 (400 °C), 摩擦取向处理, 制作液晶盒, 采用 40 μm 隔垫物。将质量分数分别为 1%、25.6%、73.4% 的激光染料 PM597 (Aldrich)、向列相液晶 TEB30A (清亮点 61 °C, 黏度为 42 mm^2/s @ 20 °C, 折射系数为 $n_e = 1.692$, $n_o = 1.522$, $\Delta n = 0.17$)、手性剂 S-811 ((4-(4-乙氧基)苯甲酰氧基苯甲酸(S)(+)-2-辛醇酯)混合均匀并灌注到液晶盒中。

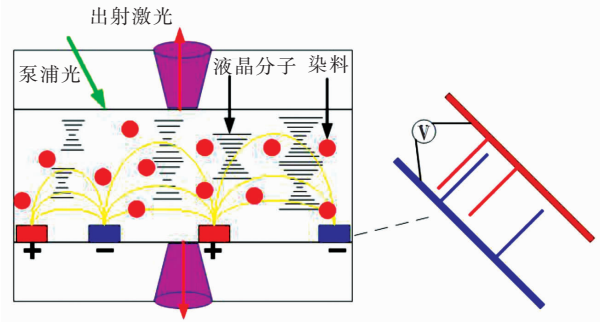


图 1 器件结构及梳状电极布局

Fig. 1 Schematic illustration of the cell configuration and interdigitated electrodes

2.2 实验测量

采用紫外分光光度计测量器件透射谱,判断是否具有光子禁带。利用波长为 532 nm 重复频率 10 Hz 的 Nd: YAG 脉冲固体激光器作为泵浦光源, 光纤光谱仪 (Avaspec-2048-USB2, avantes) 测量激光辐射谱。使用精密线型直流稳压稳流智能电源 (WWL-LDX41, 扬州双鸿电子) 对样品施加直流电压。施加电压为 0 ~ 100 V。由于下基板电极间距不同, 同一电压下, 3 个区域液晶分子所受到的电场强度将不同。每改变电压值, 等待 2 min 后再测量激光辐射谱。根据前期实验探索, 随着电压增大, 正性液晶胆甾相液晶激光器输出波长先蓝移后红移^[11], 并且随着电压增大伴随液晶的流动, 使输出激光波长不稳定。因此, 本实验中选择 0 ~ 100 V 电压范围, 最大电场强度约为

0.1 V/μm, 避免过大电压导致液晶的流动。

3 结果与讨论

3.1 实验测量结果

测得器件的透射谱如图 2 所示。从图中可以看出光子禁带短波和长波边端分别为 618 nm 和 660 nm。说明器件中胆甾相液晶分子形成了平面态排列, 部分光被光子禁带禁止传输。如图 1 所示, 通过梳状电极施加电压形成横向电场。

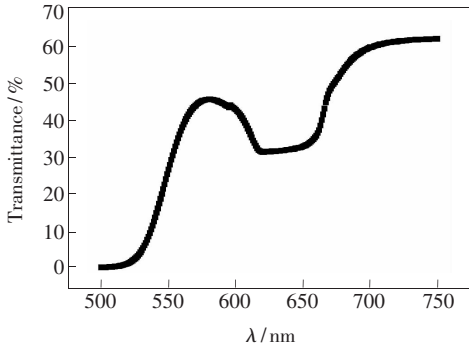


图 2 器件的透射谱

Fig. 2 Transmission spectrum of the cell

在该过程中, 用 532 nm 的 Nd: YAG 脉冲固体激光器泵浦样品, 并测量其激光辐射谱。在电极间距为 1 mm 区域, 测得激光辐射谱如图 3(a) 所示。激

光辐射峰集中在靠近光子禁带两端。明显看出随着电压增大, 出射激光波长向短波方向移动。同一电压下出现了多个激光辐射峰, 说明输出激光存在多个模式。选取同一电压下强度最高的激光峰位, 调谐范围约为 633.65 ~ 621.52 nm (12 nm) 和 683.15 ~ 664.35 nm (18 nm)。梳状电极结构中, 两个相邻的条形电极间形成的电场强度在垂直玻璃基板方向上是不均匀的, 因此液晶各个分子层受到的电场力矩大小不同。在电场力矩与液晶分子扭曲力矩相互博弈的过程中, 液晶分子趋于沿着电场方向排列, 均匀稳定的螺旋周期性排列将受到扰动, 引起螺旋轴方向的倾斜等^[12], 由此引起胆甾相液晶等效螺距缩短, 光子禁带蓝移 (光子禁带中心波长 $\bar{\lambda} = \frac{n_e + n_o}{2} p_0$, 其中 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, p_0 为自然螺距)。这是出射激光波长向短波方向移动的主要原因。而多模输出的原因为, 液晶分子的平面排列态不均匀, 使得液晶畴的螺旋轴取向不完全一致, 使有效螺距值有所浮动。当电压为 100 V 时, 在偏光显微镜下观察, 液晶畴变得细密, 畴边界线变粗, 说明液晶分子取向有所变化。没有发现液晶流动现象。

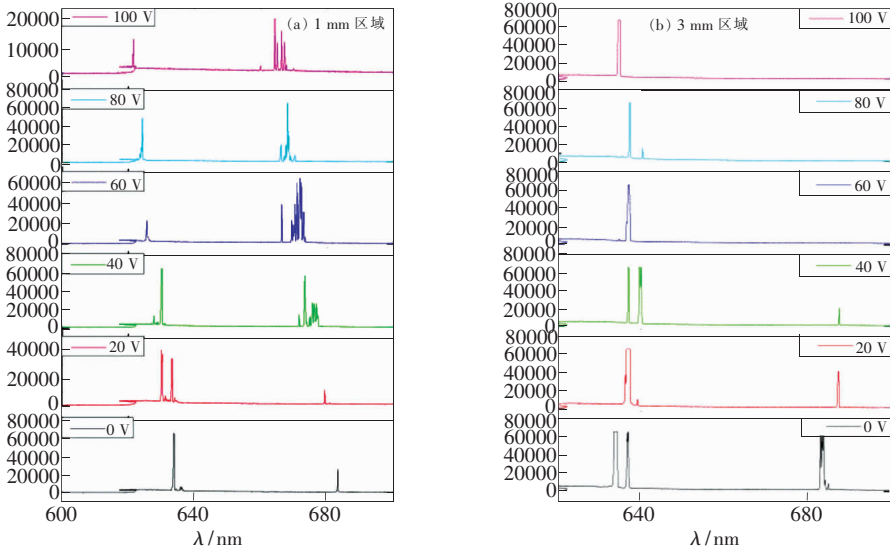


图 3 不同电压下的激光辐射谱。(a) 1 mm 区域; (b) 3 mm 区域。

Fig. 3 Lasing spectra of the device in different voltage. (a) 1 mm region. (b) 3 mm region.

电极间距 3 mm 区域在不同电压下的激光辐射谱如图 3(b) 所示。外加电压在 0 ~ 100 V 变化时, 出射激光没有明显的波长向短波方向的移动。外加电压 100 V 时的电场强度约为 0.033 V/μm。说明电场

强度还不足以产生明显变化。仍可以观察到多模输出。另外, 电压为 60, 80, 100 V 时, 只有光子禁带长波端出现激光辐射。根据光子态密度理论, 光子禁带长波端和短波端的激光辐射之间存在竞争^[13]。

不管是哪方,只要增益超过损耗时便率先出射激光。在电极间距 5 mm 区域,仍有多模输出,但随着电压增大到 100 V,出射激光波长几乎不变。

3.2 光子态密度模拟分析

以复数形式表示器件的透射系数^[14]:

$$t = X + iY, \quad (1)$$

式中 t 为样品透射系数, X 为样品透射系数实部, Y 为样品透射系数虚部。对胆甾相液晶模型作以下简化:不考虑器件的吸收作用,且液晶激光器两侧基板折射率等同为液晶的平均折射率。此时,器件透射系数表示为:

$$t = \frac{4\pi\beta e^{i2\pi L/P_0}}{4\pi\beta \cos\beta L + iP_0(\beta^2 - k^2 + 4\pi^2/P_0^2)\sin\beta L}, \quad (2)$$

其中

$$k^2 = (\omega/c_0)^2 \cdot (\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp})/2, \quad (3)$$

$$\delta = (\varepsilon_{\parallel} - \varepsilon_{\perp})/(\varepsilon_{\parallel} + \varepsilon_{\perp}), \quad (4)$$

$$\beta^2 = k^2 + 4\pi^2/P_0^2 - k\sqrt{16\pi^2/P_0^2 + k^2\delta^2}, \quad (5)$$

式中 L 为样品厚度, P_0 为胆甾相液晶的自然螺距, c_0 为真空中光速, ε_{\parallel} 为平行于液晶分子长轴方向上的介电常数, ε_{\perp} 为垂直于液晶分子长轴方向上的介电常数, δ 为各向异性常数, β 为由样品布拉格反射产生的圆偏振光波矢。由式(1)和式(2)可知:

$$X = \frac{16\pi^2\beta^2 \cos\beta L}{16\pi^2\beta^2 + k^4 P_0^2 \delta^2 \sin^2\beta L}, \quad (6)$$

$$Y = \frac{4\pi P_0 \beta (\beta^2 - k^2 + 4\pi^2/P_0^2) \sin\beta L}{16\pi^2\beta^2 + k^4 P_0^2 \delta^2 \sin^2\beta L}, \quad (7)$$

光子态密度 ρ 可表示为:

$$\rho(\omega) = (1/L)(Y'X - X'Y)/(X^2 + Y^2). \quad (8)$$

手性剂 S-811 (HTP = 10.1 μm^{-1}) 与正性向列相液晶 TE30A ($n_e = 1.692$, $\Delta n = 0.17$, $\varepsilon_{\perp} = 9.2 \text{ F/m}$, $\Delta\varepsilon = 5.4 \text{ F/m}$) 配制而成胆甾相。手性剂掺杂质量分数为 25.6%, 液晶盒为反平行摩擦其厚度为 40 μm 。液晶畴螺旋轴与玻璃基板法线方向夹角为 θ 时,等效螺距可视为 $P' = P_0 \cdot \cos\theta$, 如图 4 所示。在上述设定参数下模拟光子态密度,结果如图 5 所示。光子禁带两端光子数密度发生突变。光子禁带两端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,从而适于激光的产生和输出。而在整个禁带里面,群速度为虚数,不会有光子存在。比较 $\theta = 5^\circ$ 和 $\theta = 15^\circ$ 时的光子态密度分

布,光子禁带明显蓝移。

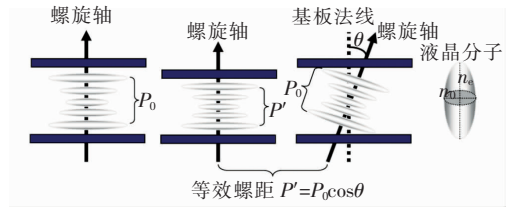


图 4 等效螺距示意图

Fig. 4 Schematic illustration of equivalent pitch

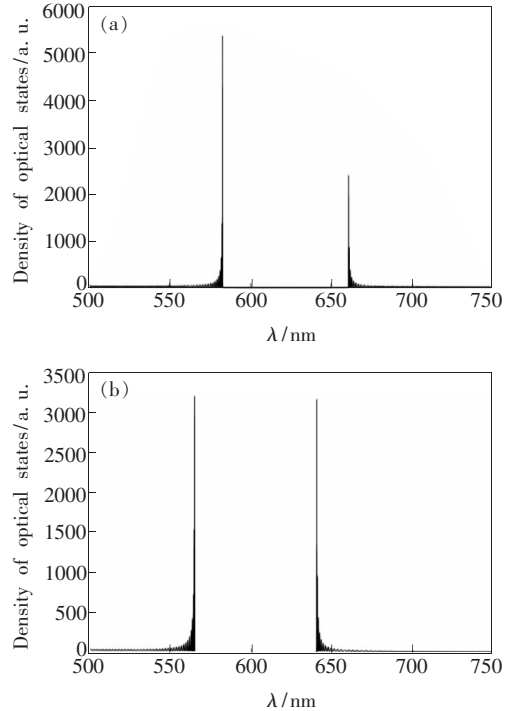


图 5 不同螺旋轴倾斜角度下光子态密度分布图。(a) $\theta = 5^\circ$; (b) $\theta = 15^\circ$ 。

Fig. 5 Distribution of density of optical state in different tilt angle of the helical axis. (a) $\theta = 5^\circ$. (b) $\theta = 15^\circ$.

4 结 论

研究了梳状电极结构的胆甾相液晶激光器件的激光辐射谱。器件被划分为电极间距分别为 1, 3, 5 mm 的 3 个区域。同一电压下, 3 个区域中液晶分子受到的电场强度不同, 可以灵活运用。为了获得稳定的激光输出, 选择外加电压范围为 0 ~ 100 V。3 个区域均显示了多模输出。在 1 mm 区域, 获得 633.65 ~ 621.52 nm (12 nm) 和 683.15 ~ 664.35 nm (18 nm) 的可调谐波长范围。而在 3 mm 和 5 mm 区域没有获得明显的激光波长调谐。分析认为, 外加电压作用下, 由外加电压产生的电场力矩和液晶分子扭曲力矩在相互平衡的过

程中,液晶螺旋轴倾斜导致有效螺距缩短,胆甾相液晶光子禁带蓝移,输出激光波长向短波方向移动。同时,液晶畴的螺旋轴取向不完全一致,使等

效螺距值有所浮动,导致多模输出,显示多个激光辐射峰。基于光子态密度模拟结果,进一步论证了出射激光波长蓝移的原因。

参 考 文 献:

- [1] HEINO F, SUNG T K, ANTONIO M, *et al.*. Tunable mirrorless lasing in cholesteric liquid crystalline elastomers [J]. *Adv. Mater.*, 2001, 13(14):1069-1072.
- [2] ANDRO C, GURAM C, GIA P, *et al.*. Photo-tunable lasing in dye-doped cholesteric liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(26):5353-5355.
- [3] HUANG Y H, ZHOU Y, WU S T. Spatially tunable laser emission in dye-doped photonic liquid crystals [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(1):011107-1-3.
- [4] JEONG M Y, CHA J. Firsthand *in situ* observation of active fine laser tuning by combining a temperature gradient and a CLC wedge cell structure [J]. *Opt. Express*, 2015, 23(16):21243-21253.
- [5] YO I, YUKO M, HIROYUKI Y, *et al.*. Electric field dependence of lasing wavelength in cholesteric liquid crystal with an in-plane helix alignment [J]. *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, 2010, 516(1):182-189.
- [6] 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 crystal with external cavity [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2013, 28(5):679-682. (in Chinese)
- [7] 刘明欢, 李大禹, 姚丽双, 等. 基于液晶/聚合物光栅选频的高效率有机半导体激光器 [J]. *液晶与显示*, 2017, 32(11):853-859.
LIU M H, LI D Y, YAO L S, *et al.*. High efficiency organic semiconductor laser using a liquid crystal/polymer grating as an oscillation cavity [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(11):853-859. (in Chinese)
- [8] LIN T H, JAU H C, CHEN C H, *et al.*. Electrically controllable laser based on cholesteric liquid crystal with negative, dielectric anisotropy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(6):061122-1-3.
- [9] LEE C R, HUANG S C, LIN S H, *et al.*. Distributed feedback laser with optoelectronic tenability in dye-doped cholesteric liquid crystal with coated photoconductive layer [J]. *Appl. Phys. B*, 2011, 105:689-695.
- [10] XIANG J, VARANYTSIA A, MINKOWSKI F, *et al.*. Electrically tunable laser based on oblique heliconical cholesteric liquid crystal [J]. *Appl. Phys. Sci.*, 2016, 113(46):12925-12928.
- [11] 乌日娜, 邬小娇, 吴杰, 等. 电场作用下染料掺杂手性向列相液晶器件激光辐射谱研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5):1313-1316.
WU R N, WU X J, WU J, *et al.*. A study of lasing spectrum of dye-doped chiral nematic liquid crystal cell under electric field [J]. *Spectrosc. Spect. Anal.*, 2016, 36(5):1313-1316. (in Chinese)
- [12] CRAWFORD G P, XIANYU H, FARIS S. In-plane switching of cholesteric liquid crystals for visible and near-infrared applications [J]. *Appl. Opt.*, 2004, 43(26):5006-5015.
- [13] LIN J H, CHEN P Y, WU J J. Model competition of two bandedge lasing form dye doped cholesteric liquid crystal laser [J]. *Opt. Express*, 2014, 22(8):9932-9941.
- [14] BLINOV L M. Lasers on cholesteric liquid crystal: mode density and lasing threshold [J]. *JETP Lett.*, 2009, 90(3):166-171.



岱钦(1977-),男,内蒙古通辽人,博士,教授,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事激光技术及应用方面的研究。

E-mail: daiqin2003@126.com



乌日娜(1978-),女,内蒙古海拉尔人,博士,副教授,2005年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事液晶物理与器件方面的研究。

E-mail: wurina2007@126.com