

染料掺杂液晶填充毛细管的激光发射特性研究

吕月兰 尹向宝 孙伟民 刘永军 苑立波

Laser emission characteristics of the capillary of dye-doped liquid crystal

Lü Yue-Lan Yin Xiang-Bao Sun Wei-Min Liu Yong-Jun Yuan Li-Bo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 67, 044204 (2018) DOI: 10.7498/aps.20171844

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.20171844>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2018/V67/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[染料掺杂液晶可调谐光纤荧光光源的研究](#)

Tuning characteristics of fluorescent light source by dye-doped liquid crystal filled hollow fiber

物理学报.2017, 66(15): 154205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.154205>

[大变焦范围电调谐液晶变焦透镜的研究](#)

Liquid crystal lens with large-range electrically controllable variable focal length

物理学报.2015, 64(18): 184212 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.184212>

[基于液晶和DSP的强光局部选通智能网络摄像系统研究](#)

Study on the partial gating smart network camera for controlling strong light intensity based on DSP and liquid crystal

物理学报.2013, 62(21): 214210 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.214210>

[楔形盒染料掺杂胆甾相液晶激光器研究](#)

Investigation of the laser action in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell

物理学报.2013, 62(4): 044219 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.044219>

[四光束干涉单次曝光构造含平面缺陷三维周期性微纳结构](#)

Fabricating three-dimensional periodic micro-structure with planar defects via a single exposure

物理学报.2012, 61(17): 174211 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.174211>

染料掺杂液晶填充毛细管的激光发射特性研究*

吕月兰¹⁾ 尹向宝¹⁾²⁾ 孙伟民¹⁾ 刘永军^{1)†} 苑立波¹⁾

1)(哈尔滨工程大学, 纤维集成光学教育部重点实验室, 哈尔滨 150001)

2)(黑龙江科技大学理学院, 哈尔滨 150022)

(2017年8月15日收到; 2017年12月6日收到修改稿)

本文提出利用染料掺杂液晶填充PI光控取向膜毛细管获得可调谐激光. 采用532 nm YAG倍频脉冲激光器抽运, 实验及理论研究有了聚酰亚胺(PI)取向膜和无PI取向膜毛细管的激光发射特性, 对比分析了两种情形的激光产生阈值以及随温度变化的特性. 结果表明: 经PI光控取向处理的染料掺杂胆甾相液晶毛细管的激光发射模式具有分布反馈模式和回音壁模式, 同时, 激光产生阈值为 $4.5 \text{ mJ}\cdot\text{mm}^{-2}$; 发现当温度升高时, 发射光谱发生“蓝移”, 中心波长调谐范围为5.9 nm, 温度升高到 43°C 时, 形成质量非常好的回音壁模式, 其自由光谱范围为1.05 nm. 经PI光控取向处理的染料掺杂向列相液晶激光发射模式为随机激光, 并且较无PI取向时激光发射峰减少.

关键词: 毛细管, 染料掺杂液晶, PI光控取向膜, 回音壁模式

PACS: 42.70.Df, 42.55.Mv

DOI: 10.7498/aps.67.20171844

1 引言

可调谐激光器可以在一定范围内连续改变激光输出波长, 广泛应用于光谱学、医学、信息处理和通信等领域. 染料掺杂液晶可调谐激光器具有从近紫外到近红外宽波长调谐范围的特点, 并且尺寸小、线宽窄、光学效率高, 这使其在光通讯、传感器、医学诊断等领域可发挥重要作用. 目前染料掺杂液晶可调谐激光器常用的激光发射模式为分布反馈(distributed feedback, DFB)模式和回音壁模式(whispering gallery modes, WGMs)以及相干反馈随机激光(random lasers, RL)模式, 可以在单芯片实验室^[1]、医学诊断^[2]、传感器^[3]等领域有潜在的应用.

目前, 关于液晶激光发射的研究, 一般是基于玻璃基板的分布反馈激光发射或是基于微滴结构回音壁模式激光发射. 2012年Van等^[4]实验分析了液晶微滴中的模式间隔和 Q 参数、模式数以及激光输出能量的关系. 2013年, Hiroyuki等^[5]提出利用可调谐胆甾相液晶(cholesteric liquid crystals,

CLCs)微滴, 通过在聚合物基质中嵌入纳米尺寸的液晶网孔实现对折射率的调制, 以此控制反射带, 同时设计在胆甾相液晶层下放置活性聚合物用于提供辅助增益. 2014年, Lin等^[6]研究了不同温度下光子禁带边缘激光的发射模式以及激光强度和波长随温度的变化情况; 2014年, Lagerwall等^[7]提出胆甾相液晶微滴间的光通信可调谐多彩模式及其在光通信开关、光耦合器和防伪标签中的应用. 但玻璃基板结构和液晶微滴结构的激光输出效率均较低, 并且微滴结构不够稳定^[8,9]. 近年来, 以光沿微腔内表面不断全反射所形成的回音壁微腔激光器备受关注^[10-12], 2017年, Li等^[13]提出内径不同毛细管产生WGMs具有较好的光谱可逆性; Nagai等^[14]提出染料掺杂向列相液晶(nematic liquid crystals, NLCs)毛细管形成柱形微腔WGMs, 但发射激光阈值较高($1.3 \text{ mJ}\cdot\text{mm}^{-2}$). 本文提出一种染料掺杂液晶填充有PI取向膜毛细管的激光发射, 采用毛细管基体内壁抽真空涂覆聚酰亚胺光控取向膜, 有效限制轴向光波, 该发射具有DFB和WGMs, 并大幅降低了阈值能量; 同时, 研

* 国家自然科学基金(批准号: U1531102, U1631239, U1331114, 61535004)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

究了其温度调谐可行性, 对于具有圆形微腔的液晶填充有聚酰亚胺 (PI) 取向毛细管在激光发射方面的应用具有重要的参考价值.

2 染料掺杂液晶填充毛细管激光发射原理

与传统的激光器相比, 基于 Bragg 反射^[15] 原理, 胆甾相液晶无需反馈腔, 自身可以提供分布式反馈, 染料掺杂胆甾相液晶填充毛细管激光发射是在折射率和增益的周期性简谐结构中, 利用外界因素控制液晶折射率, 构成折射率分布反馈结构, 从而获得窄线宽的激光输出. 波长满足 Bragg 条件的光会产生正反馈, 在增益介质内部放大, 赢得模式竞争, 经分布反馈形成发射强度较强的带隙激光即 DFB 激光, 发射激光波长由 Bragg 方程 $\lambda_{\text{Bragg}} = n_{\text{eff}} p / (m \cdot \sin \theta)$ 决定^[16], 其中 λ_{Bragg} 为输出激光波长, n_{eff} 为增益介质的有效折射率, p 为胆甾相液晶螺距, θ 为两相干光半夹角, m 为输出激光的阶次. 由上述方程可知: 改变 n_{eff} 或者改变 θ , 都可对输出激光波长进行调谐. 同时, 染料掺杂液晶填充毛细管作为柱形微腔而产生 WGMs, 模式被束缚在赤道平面附近. 由于染料掺杂液晶的低损耗和微腔表面光滑, 导致强反射产生共振的光经过很长时间才被耗散掉, 因此 WGMs 具有极高的品质因子和能量密度^[17]. 自由光谱范围 (FSR) 由 $\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2\pi n_{\text{eff}} R}$ 计算, 其中 R 为毛细管内径, λ 为谐振光波长, 可见改变 n_{eff} 或者 R 均可实现输出激光调谐. 液晶分子经 PI 取向后可以引起较大的光学各向异性, 液晶分子有效折射率为 $n_{\text{eff}} = \frac{n_o n_e}{\sqrt{n_e^2 \cos^2 \theta + n_o^2 \sin^2 \theta}}$, 其中 n_e 是液晶的非寻常光折射率, n_o 是液晶的寻常光折射率, 因此对于染料掺杂液晶填充有 PI 取向毛细管可以通过温度改变 n_{eff} 进行 DFB 和 WGMs 的调谐; 同时内径 R 越小对应的 $\Delta\lambda$ 越大, 更有利于增大微腔作为传感器使用时动态探测范围.

3 实验结果与讨论

3.1 样品制备

染料掺杂液晶填充有 PI 取向膜毛细管可调谐激光器样品的制备选用的毛细管内径分别为 100,

200, 300 μm , 所用的液晶为北京八亿时空液晶科技股份有限公司生产的向列相液晶 BHR33200. 在 BHR33200 中掺杂质量分数为 1% 的激光染料 DCM 以及 26% 的手性剂 S811 配制成染料掺杂胆甾相液晶, 其中向列相液晶 (BHR33200) 在常温 20 $^{\circ}\text{C}$ 下寻常光折射率为 1.522, 非寻常光折射率为 1.692, 清亮点温度为 61.2 $^{\circ}\text{C}$, 手性剂浓度取决于染料荧光光谱的位置, 使染料荧光光谱范围涵盖胆甾相液晶的反射禁带. 所用光控取向膜为 PI 材料, 采用 N-甲基吡咯烷酮按质量分数 50% 稀释取向膜, 在毛细管内侧抽真空涂覆 PI 光控取向薄膜厚度为 100—200 nm, 用强度为 20 mW/cm^2 的美国路阳 LUYOR-3130 偏振紫外光垂直照射, 起偏方向沿着毛细管轴向, 光照 10 min 进行取向处理, 在照射时定时转动毛细管, 以获得均匀照射, 加热至 120 $^{\circ}\text{C}$ 烘干. 将光照后的毛细管置入液晶中利用毛细效应将液晶注入毛细管中, 注入长度为 2 cm, 加热至 50 $^{\circ}\text{C}$, 放置 10 min. 抽运激光器为北京镭宝光电公司提供的 Dawa-100Nd 型 YAG 倍频脉冲激光器, 脉冲宽度 8 ns、重复频率 1 Hz、波长 532 nm、功率 50 mJ, 并通过透镜耦合, 利用上海复享光学提供的测量精度为 0.09 nm 的 PG2000 光纤光谱仪进行发射谱的测试. 实验装置如图 1 所示, 激光器发射的抽运光经偏振片后利用透镜聚焦到填充染料液晶毛细管上, 被光纤探头接收后经光纤光谱仪导入计算机处理, 其中 θ 为光谱仪探头与激光器样品表面所呈角度, 文中未说明接收位置时, 均为侧面接收.

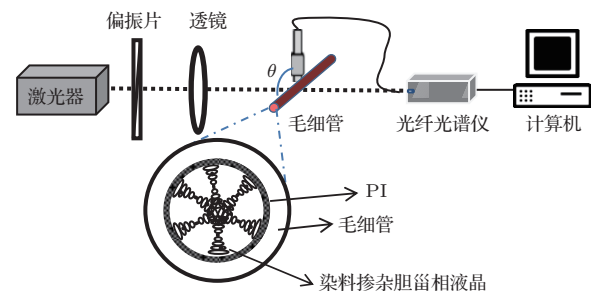


图 1 实验装置图, 子图为染料掺杂胆甾相液晶填充有 PI 膜毛细管剖面图

Fig. 1. Schematic illustration of the experimental setup. The inset is profile of the capillary tube filled by CLCs with PI.

3.2 光控取向膜对发射特性的影响

用 OLYMPUS-CX31 偏光显微镜在两个正交偏振片下, 测量向列相液晶填充有、无 PI 取向膜毛细管的显微镜照片, 结果如图 2 所示. 其中图 2 (a)

和图 2(b) 为毛细管轴向与偏振片起偏方向之间夹角为 0° 和 45° 的图像, 可以看出: 有 PI 取向膜毛细管沿管轴向呈明暗相间的条纹, 这是由于光的干涉形成的, 条纹的均匀性说明液晶在管内部具有均匀的排列; 而无 PI 取向膜的毛细管则亮度分布明显不均匀, 说明光控 PI 取向膜可以有效控制液晶分子均匀有序排列。

对无 PI 取向膜毛细管圆形微腔采用侧向光抽运方式, 得到无 PI 取向膜不同内径毛细管填充染料掺杂液晶发射谱 (如图 3 所示)。由图 3(a) 可以看出, 染料掺杂向列相液晶填充 $100\ \mu\text{m}$ 毛细管形成了较弱的 WGMs, 这是由于液晶折射率大于毛细管 (SiO_2) 折射率, 进入微腔的光波被限制在腔内, 在边界多次反射下满足相位匹配条件。随内径的增大, 对于染料掺杂向列相液晶填充 $200\ \mu\text{m}$ 毛细管, 由于毛细管内壁之间自发辐射光子多重散射引起的相干反馈, 会产生 RL, 但在赤道平面附近仍然有部分 WGMs。而内径较大的 $300\ \mu\text{m}$ 毛细管, 由于散射较强, 则没有形成 WGMs。从图 3(b) 可以看出, 染料掺杂胆甾相液晶填充小内径毛细管时, 在侧面接收到较弱的 WGMs 和 DFB, 这说

明小内径的毛细管更容易形成 WGMs, 这与之前报道的结论一致 [18]。分析认为: 同时产生 DFB 和 WGMs, 是由于染料掺杂胆甾相液晶的螺旋结构引发了胆甾相液晶的选择性光反射, 其光学各向异性的液晶分子对不同偏振方向光的折射率不同, 所以

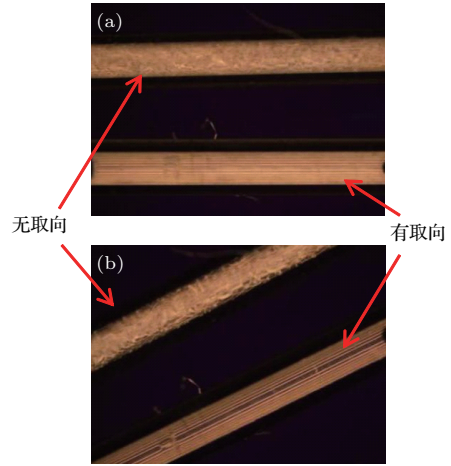


图 2 正交偏光显微镜下毛细管有无 PI 取向的对比 (a) 夹角 0° ; (b) 夹角 45°

Fig. 2. The POM images of capillary tube filled by NLCs with and without PI under the orthogonal polarized light microscope: (a) Angle 0° ; (b) angle 45° .

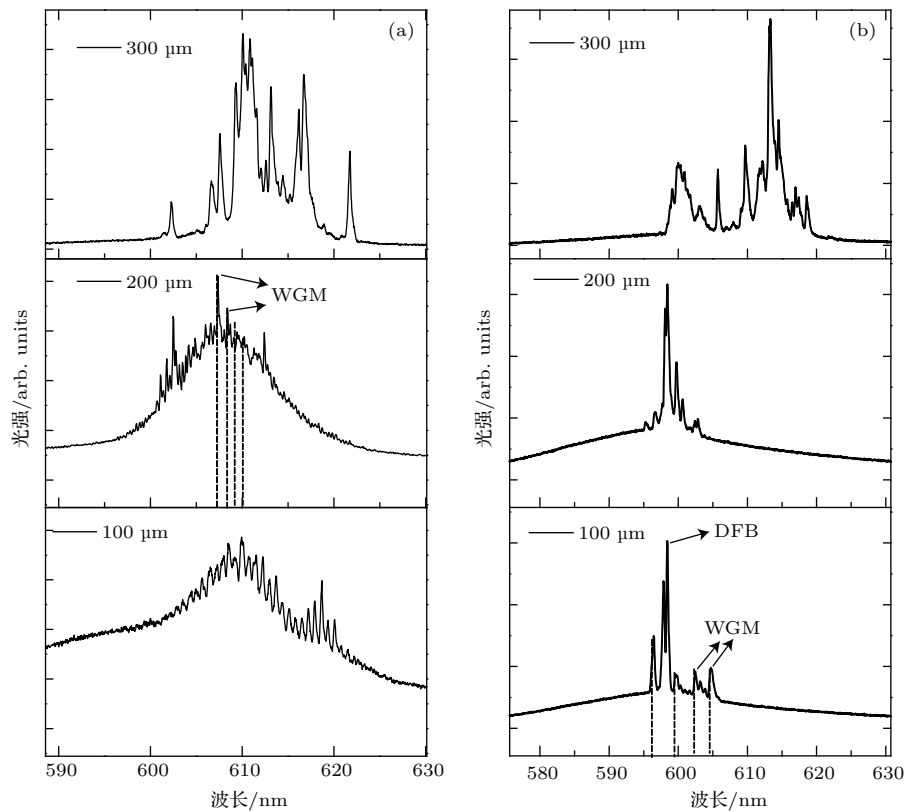


图 3 无 PI 的不同内径毛细管填充染料掺杂液晶发射谱 (a) 填充染料掺杂向列相液晶; (b) 填充染料掺杂胆甾相液晶

Fig. 3. Emission spectrum at different diameter dye-doped liquid crystal packed capillary of without PI: (a) Dye-doped NLCs; (b) dye-doped CLCs.

在胆甾相液晶中, 液晶分子沿螺旋轴排列方向呈现周期性变化, 此方向偏振光的折射率也呈周期性变化, 从而形成光学禁带, 满足 Bragg 反射条件产生 DFB, 而且内径较小的 100 μm 毛细管截面面积小, 功率密度高, 因而更容易产生激光。

有 PI 取向膜毛细管圆形微腔采用侧向光抽运方式, 100 μm 有取向膜毛细管填充染料掺杂液晶发射谱如图 4 所示, 可以看出毛细管填充染料掺杂胆甾相液晶的发射谱兼具 DFB 和 WGMs, 而且 WGMs 形成得更好。而填充染料掺杂向列相液晶的发射谱较无取向的光谱改善并不明显。图 5 对比了染料掺杂液晶填充有、无 PI 取向膜内径 100 μm 毛细管发射阈值, 可以看出无取向毛细管发射阈值为 26.2 $\text{mJ}\cdot\text{mm}^{-2}$, 有取向毛细管发射阈值为 4.5 $\text{mJ}\cdot\text{mm}^{-2}$, 这一结果较文献 [14] 中报道的低近三个量级。这是由于 PI 膜使液晶分子均匀定向排列, 降低了散射损耗。

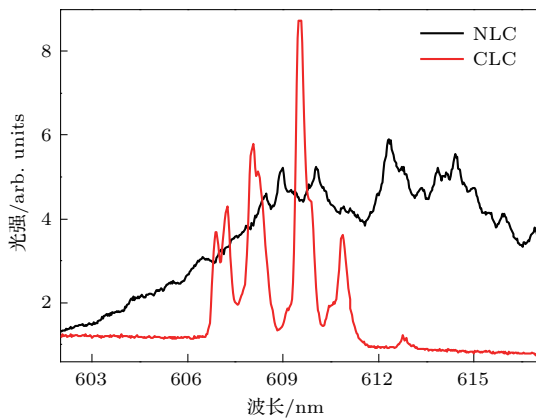


图 4 100 μm 有 PI 毛细管填充染料掺杂液晶发射谱
Fig. 4. Fig.4. Emission spectrum dye-doped liquid crystal packed capillary of with PI.

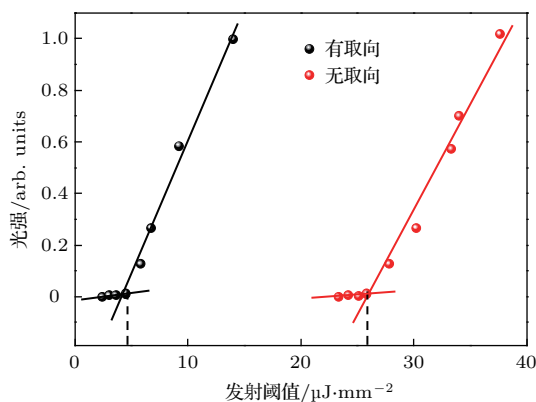


图 5 染料掺杂液晶填充有、无 PI 取向毛细管发射阈值的对比
Fig. 5. Emission threshold as a function of input intensity without and with PI photo-alignment films.

图 6 给出了利用测角仪 (测量精度为 1°) 测量并控制角度得到染料掺杂液晶填充有 PI 取向膜毛细管不同角度发射谱。图 6(a) 是侧面不同角度的发射谱, 从图中可以看出在侧面接收不同角度的激光发射兼具 DFB 和 WGMs, 其中光强最大对应的谱线为 DFB, 频谱间隔较均匀的谱线为 WGMs, 而且与角度无关, 这是由于 DFB 和 WGMs 均垂直于毛细管壁向外, 同时是垂直管壁面的 360° 激光发射, 因此提高了激光发射强度; 图 6(b) 是在毛细管端面接收的发射光谱, 从图中可以看出内径较小的 100 μm 毛细管在端面处没有 DFB 和 WGMs, 原因是 PI 光控取向膜的作用使得在毛细管内的胆甾相液晶的螺旋方向垂直于管壁, 且由于左手手性剂 S811 的作用, 使其沿径向有较好的螺旋结果 (如图 1 子图所示), 从而在端面 (即轴向方向) 没有任何的激光输出; 而对于内径较大的 200, 300 μm 毛细管, PI 膜对距离毛细管内壁较远处液晶束缚力较强, 使液晶呈胆甾相螺旋结构沿径向排列, 而 PI 膜对管内深处液晶的束缚力较弱, 没有形成很好的统一螺旋

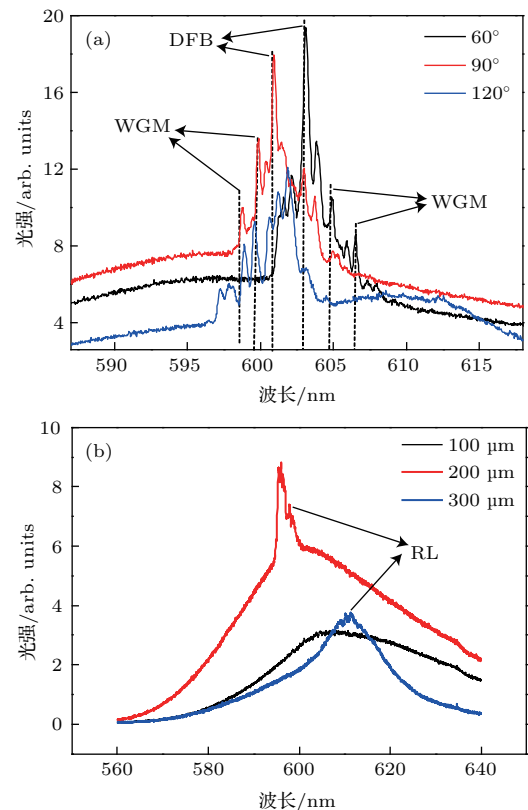


图 6 染料掺杂液晶填充有 PI 取向毛细管波长不同角度发射谱 (a) 在侧面接收发射谱; (b) 在端面接收发射谱
Fig. 6. Emission spectrum at different angle dyed-doped liquid crystals packed capillary with PI orientation: (a) The side; (b) end face.

结构, 在毛细管深处液晶分子处于多畴混乱状态, 但局部螺旋结构仍然存在, 每个液晶畴中都具有螺旋, 不同畴的螺旋轴在空间的取向杂乱无章, 同时光子在液晶中的多重散射会获得放大和增益, 因此在端面(即轴向方向)会有微弱的随机激光输出^[19].

3.3 温度对激光发射光谱的影响

研究不同温度下的染料掺杂胆甾相液晶填充有PI取向内径100 μm毛细管的发射谱, 如图7所

示. 观察到温度由25 °C升高至48 °C时, 根据Bragg方程^[20] $\lambda = n_e \cdot p$, 式中 n_e 为液晶非常光折射率, 由于螺距 p 与 n_e 会同时随温度升高而减小^[21], 因此DFB发射波长随温度升高发生“蓝移”, 调谐范围为5.9 nm, 即599.87—605.77 nm. 当温度增加到43 °C时, 如图7(c)所示, 由于破坏了胆甾相液晶的螺旋结构, DFB激光消失, 同时由于温度升高后光散射强度减小, 形成了非常好的WGMs, 其FSR为1.05 nm.

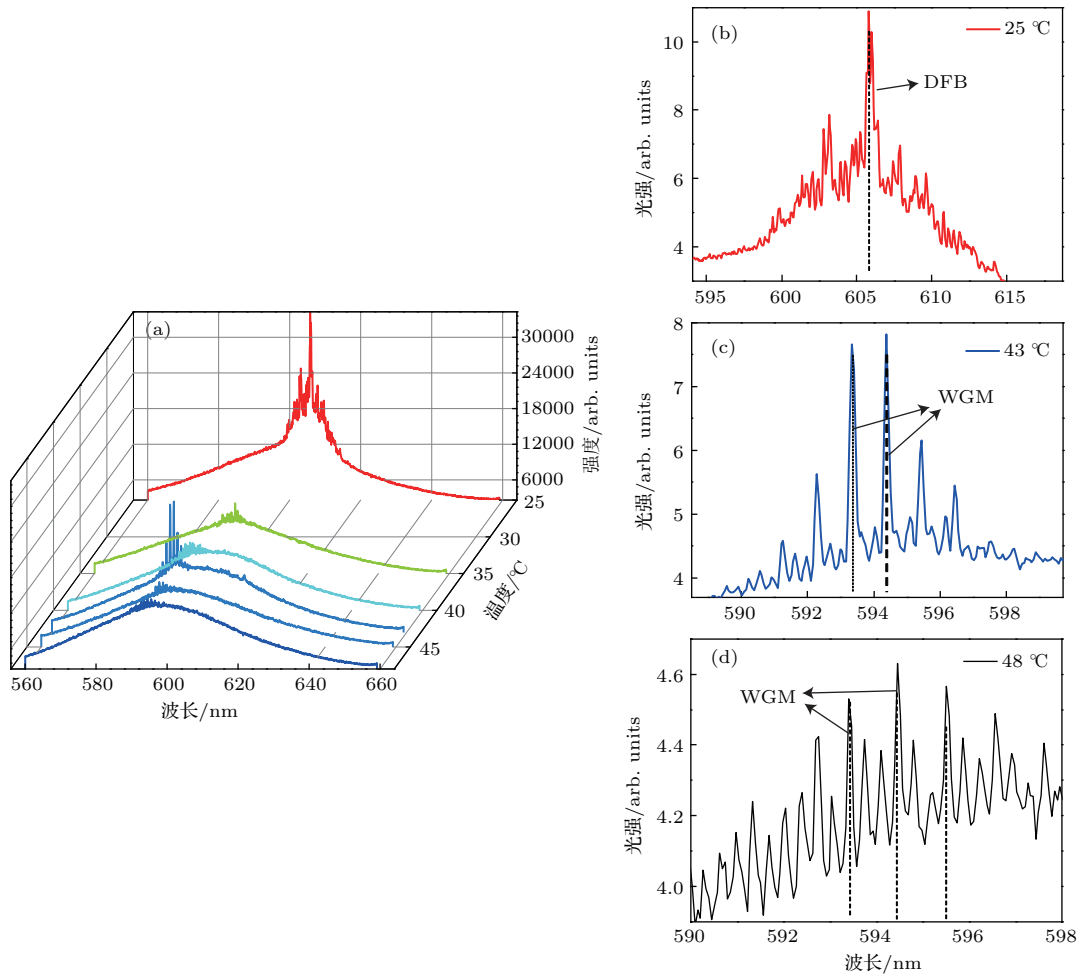


图7 100 μm填充胆甾相液晶毛细管随温度发射谱 (a) 25 °C—48 °C; (b) 25 °C; (c) 43 °C; (d) 48 °C
 Fig.7. Emission wavelength of CLCs filling the capillary tube of 100 μm at different temperature: (a) 25 °C—48 °C; (b) 25 °C; (c) 43 °C; (d) 48 °C.

4 结 论

本文研究了染料掺杂液晶填充PI光控取向膜毛细管激光发射特性, 发现该结构液晶激光器在有PI取向时发射激光阈值能量低, 达到4.5 mJ·mm⁻², 同时填充有染料掺杂胆甾相液晶经

PI取向膜毛细管的激光发射具有DFB和WGMs两种模式; 温度调谐使发射光谱发生“蓝移”, 调谐范围为599.87—605.77 nm. 在45°形成了非常好的WGMs, 其FSR为1.05 nm. 本研究对开发基于染料掺杂液晶填充有PI取向膜毛细管温度调谐激光器、滤波器以及光开关、传感器等具有积极的指导意义.

参考文献

- [1] Lin J H, Hsiao Y L 2014 *Opt. Mater. Express* **4** 1555
- [2] Zhang J, Dai H T, Yan C, Xu D G, Liu Y J, Luo D, Sun X W 2016 *Opt. Mater. Express* **6** 1367
- [3] Krämmer S, Rastjoo S, Siegle T, Wondimu S F, Klusmann C, Koos C 2017 *Opt. Express* **25** 7884
- [4] Van D T, Rui C, Han D S 2012 *Adv. Mater.* **24** 60
- [5] Hiroyuki Y, Yusuke S, Yo I, Masaya T, Yasuhiro O, Akihiko F, Masanori O 2013 *J. Appl. Phys.* **113** 203105
- [6] Lin J H, Chen P Y, Wu J J 2014 *Opt. Express* **22** 9932
- [7] Noh J, Liang H L, Drevensekolenik I, Lagerwall J F 2014 *J. Mater. Chem. C* **2** 806
- [8] Shirvani M H, Mohajerani E, Wu S T 2010 *Opt. Express* **18** 5021
- [9] Arnold S, Khoshsimam, Teraoka I, Holler S, Vollmer F 2003 *Opt. Lett.* **28** 272
- [10] Xiao Y F, Zou C L, Li B B 2010 *Phys. Rev. Lett.* **105** 153902
- [11] Wang Y, Li H Y, Zhao L Y, Wu B, Liu S Q, Liu Y J, Yang J 2016 *Opt. Laser Technol.* **86** 61
- [12] Hengky C, Stephen C R, Fan X D 2016 *Sci. Rep-uk* **6** 32668
- [13] Li Y, Zhang H, Liu B, Wu J, Song B 2017 *J. Optics-uk* **19** 015801
- [14] Yusuke N, Ryushi F, Kotaro K 2013 *J. Opt. Soc. Am. B* **30** 2233
- [15] Meltz G, Morey W W, Glenn W H 1989 *Opt. Lett.* **14** 823
- [16] Kogelnik H, Shank C V 1971 *Appl. Phys. Lett.* **18** 152
- [17] Little B E, Laine J P, Hauas H A 2002 *J. Lightw. Technol.* **17** 704
- [18] Aseel M, Vishnu K, Sudad S A, Peter K, Vlasta Z, Gerald F, Yuliya S 2017 *Opt. Express* **12** 3
- [19] Wang L, Wang M, Yang M C, Shi L J, Deng L G, Yang H 2016 *Chin. Phys. B* **25** 094217
- [20] Zhang T, Wu L J, Gu Y X, Zheng C D, Zheng C D 2016 *Chin. Phys. B* **25** 096101
- [21] Liu Y J, Wang F R, Sun W M, Liu X Q, Zhang L L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 076101 (in Chinese) [刘永军, 王斐儒, 孙伟民, 刘晓颀, 张伶俐 2013 物理学报 **62** 076101]

Laser emission characteristics of the capillary of dye-doped liquid crystal*

Lü Yue-Lan¹⁾ Yin Xiang-Bao¹⁾²⁾ Sun Wei-Min¹⁾ Liu Yong-Jun^{1)†} Yuan Li-Bo¹⁾

1) (*Key Laboratory of In-fiber Integrated Optics, Ministry Education of China, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China*)

2) (*College of Science, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China*)

(Received 15 August 2017; revised manuscript received 6 December 2017)

Abstract

The dye doped liquid crystal filling tunable laser has been widely adopted in many areas, such as optical communication, sensor and medical imaging with a low cost. The temperature-sensitive refractive indice of liquid crystal makes it a filling material suitable for being used in the capillary. The existing studies have introduced the liquid crystal filled with capillary, which has the complicated craft and big cost. As is well known, the capillary has the advantages of the easy preparation and low cost, but the liquid crystal filled capillary based dye doped liquid crystal filling tunable laser is rarely studied.

Dye-doped cholesteric liquid crystal (CLC) based tunable laser has many advantages such as small-size, low-threshold, high-efficiency, wide-tunability with wavelength varying from ultraviolet to infrared. So It shows great promise in applications of single-chip experiment, biological identification and sensor. To develop high-efficiency dye-doped CLC tunable lasers for different potential applications, it is crucial to explore their emission performances in three laser emission modes: distributed feedback (DFB), whispering gallery modes (WGMs) and random laser (RL). We theoretically propose and experimentally demonstrate the characteristics of laser emission based on dye-doped CLC in capillary tubes which are treated with the photo-alignment PI films. Firstly, we prepare capillary tubes filled with dye-doped CLC with three inner diameters of 100 μm , 200 μm and 300 μm . By using a double-frequency Nd:YAG 532 nm laser as a pump source, the emission spectra, energy thresholds and temperature dependent tunabilities in the cases with and without PI films are analyzed, respectively. It is clearly shown that dye-doped CLC in the capillary with the PI films generate DFB-mode lasing and WGMs lasing. Experimental results show that the capillaries with thinner-inner diameters and PI films have lower emission threshold energies than without PI films, the former threshold can be reduced to as low as 4.5 $\mu\text{J}\cdot\text{mm}^{-2}$. Meanwhile, with temperature increasing, the DFB wavelength is blue-shifted, resulting in a central wavelength tuning range of 5.9 nm. Then high performance WGM with an FSR of 1.05 nm is created when the temperature is increased up to as high as 43 $^{\circ}\text{C}$. It can be found that the laser emission with photo-alignment PI films shows an optimum RL mode with less laser emission peaks than the laser emission without photo-alignment PI films. In this work we propose and demonstrate that a capillary based dye-doped CLC tunable laser with photo-alignment PI films can easily work with three emissions: DFB-mode, WGMs or RL by changing optical field and the applied temperature. The above research results provide valuable clues and methods to develop high-quality dye-doped CLC based tunable laser, filter, optical switch and sensor.

Keywords: capillary, dye doped liquid crystal, photo-alignment polyimide films, whispering gallery modes

PACS: 42.70.Df, 42.55.Mv

DOI: 10.7498/aps.67.20171844

* Project supported by the National Natural Scshience Foundation of China (Grant Nos. U1531102, U1631239, U1331114, 61535004).

† Corresponding author. E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn