

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

乌日娜¹, 邬小娇¹, 吴杰¹, 彭增辉², 姚丽双², 岱钦^{1*}

1. 沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033

摘要 研究了电场作用下染料掺杂手性向列相液晶器件激光辐射谱。设计了两种电极结构, 分别对正性和负性液晶器件施加横向和纵向电场, 采用 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲固体激光器泵浦样品。对正性液晶器件施加电场, 在 630~660 nm 范围获得多波长的激光输出。对负性液晶器件施加电场, 获得调谐范围为 18.5 nm 的激光输出。由器件结构和光子禁带的变化, 进行了深入的分析。正性液晶器件, 在电场力矩与扭曲力矩相互竞争过程中, 引起液晶的流动, 光子禁带上下浮动, 因此不仅在禁带边沿, 禁带内也出现激光辐射。而负性液晶器件随着电场强度增大, 液晶螺距收缩, 禁带蓝移, 输出激光波长从 681.0 nm 蓝移到 662.5 nm, 出射激光波长为光子禁带边沿处。负性液晶器件在电场作用下的稳定性较好。

关键词 激光辐射谱; 手性向列相液晶; 激光染料; 电场

中图分类号: O753+.2 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)05-1313-04

引言

染料掺杂手性向列相液晶激光器是一种将激光染料掺杂入液晶中, 利用手性向列相液晶分子选择反射特性形成的光子禁带, 在外界激励下实现激光输出的新型分布反馈式(DFB)激光器。由于结构简单, 阈值低, 可调谐, 制作成本较低, 液晶激光器很容易实现微型化, 且能大量生产。目前液晶器件应用技术和生产工艺逐渐成熟, 液晶激光器在显示、集成光学、光通讯等领域具有广泛的应用前景。

为实现液晶激光器器件的应用, 研究者在实验和理论上均进行了大量研究。近年来, 手性向列相液晶的研究取得一系列进展, 提出许多可行性方案, 尤其是器件的调谐特性研究进展非常迅速。Jeong 等^[1]利用楔形液晶盒, 使胆甾相液晶形成螺距梯度, 在外界激光泵浦作用下获得空间位置调节激光输出。Morris 等^[2]研究了掺杂不同手性剂的手性向列相液晶激光器的温度调谐特性, 分析了器件输出波长随温度变化成离散分布的原因, 并提出了相应的解决方案。2013 年 Wu 等利用光子态密度理论研究了温度调谐液晶激光器, 试验获得调谐范围为 40 nm 的温度调谐激光输出^[3]。相对于温度调谐液晶激光器, 由于作用机理的不同, 表面锚定力的作用和

空间电荷分布的影响, 染料掺杂手性向列相液晶激光器电场调谐的研究进展并不顺利。Schmidtke 等^[4]设计了栅条状结构电极, 使用类似共面转换(IPS)的方式对手性向列相液晶施加电场, 但实验获得输出激光的波长调谐现象并不明显。此外, 还有学者对染料掺杂负性液晶施加交流电场, 观察到了禁带移动和禁带变浅的现象。为避免表面锚定力的影响, Dzaki 等用负性液晶并让液晶的螺距与液晶盒表面平行的排列方式, 获得了调谐范围较大的激光输出。这种方法获得的激光是从液晶盒的侧面缝隙输出, 为保证输出光不受影响, 液晶盒侧面不能封胶, 不利于实际应用。

本工作设计了两种电极结构器件, 研究了电场作用下染料掺杂手性向列相液晶器件激光辐射谱, 并进行了深入的讨论。

1 实验部分

1.1 正性液晶器件电极结构设计 with 样品制备

由于正性和负性液晶介电常数的差异, 它们对电场的响应也不尽相同。施加电场后正性液晶分子长轴趋向电场方向, 负性液晶分子短轴朝向电场方向。为实现手性向列相液晶激光器器件的输出波长调谐, 正性器件需要施加横向电场

收稿日期: 2015-02-01, 修订日期: 2015-06-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(61378075), 辽宁省高校杰出青年学者成长计划项目(LJQ2015093)和沈阳理工大学激光与光信息辽宁省重点实验室开放基金资助

作者简介: 乌日娜, 1978 年生, 沈阳理工大学理学院副教授 e-mail: wurina2007@126.com

* 通讯联系人 e-mail: daiqin2003@126.com

(垂直于螺旋轴方向)。如果正性器件施加纵向电场(平行螺旋轴方向),平面排列态将转变为焦锥织构态^[5],光子禁带消失,关断激光输出。将不带电极层的玻璃基板旋涂 PI 取向剂,摩擦取向后以 $13\ \mu\text{m}$ 厚的长条状铝电极作为隔垫物制作反平行液晶盒,按质量分数分别为 1%, 25.6%, 73.4% 的激光染料 DCM(Aldrich)、向列相液晶 TEB30A(石家庄永生华清)、手性剂 S-811(石家庄永生华清)混合均匀并灌注到液晶盒中。样品结构如图 1(a)所示,电极间隔为 $0.5\ \text{mm}$ 。

1.2 负性液晶器件电极结构与样品制备

负性液晶器件需要施加纵向电场(平行于螺旋轴方向)。负性器件加横向电场(垂直于螺旋轴),同样将平面排列态转变为焦锥织构态,光子禁带消失,关断激光输出。制作镀有电极的 ITO 玻璃基板制成的取向膜反平行摩擦的液晶盒。采用 $9\ \mu\text{m}$ 的隔垫物控制盒厚。将负性向列相液晶 SLC12V620-400(石家庄诚志永华显示材料有限公司)、手性剂 S811(石家庄永生华清)、激光染料 DCM(Aldrich) 分别以 79.46%, 19.54%, 1.00% 的比例混合,混合均匀后灌注到制备好的液晶盒中,样品结构如图 1(b)所示。

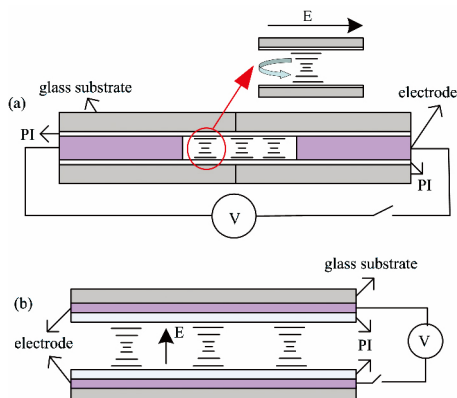


图 1 样品电极结构(a)正性液晶盒(b)负性液晶盒

Fig 1 Electrode structure of the sample (a) positive liquid crystal cell (b) negative liquid crystal cell

1.3 实验测量

采用偏光显微镜(XP-403, caikon)观察其织构排列。由于激光染料 DCM[4-(二氰基来甲基)-2-甲基-6-(4-二甲氨基苯乙基)-4H-吡喃]对 $532\ \text{nm}$ 的激光吸收效率较高,因此实验采用波长为 $532\ \text{nm}$ 的 Nd:YAG 脉冲固体激光器作为泵浦光源。采用光纤光谱仪(Avaspec-2048-USB2, avantes)测量激光辐射谱和透射谱。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,使样品电极之间形成较均匀电场。采用图 1 所示电极结构器件施加电场,电压施加过程中用 $532\ \text{nm}$ 脉冲固体激光器泵浦样品,并测量其激光辐射谱。溴钨灯发出的光经准透镜成平行光束,透过样品,分别测量透射谱。

2 结果与讨论

2.1 正性液晶器件的电场调谐特性

在不同电压下的激光辐射谱如图 2 所示。图 2 将样品施加电压通过电极间距换算成电场表示。从图 5 明显看出,在同一电场强度下样品输出激光存在多个波长。由表 1 可以更加清晰地看出不同电压下输出激光波长变化。电场强度为 0 、 $0.2\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时,只有一个波长; 0.4 和 $0.6\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时,出现三个波长; 0.8 和 $1.0\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时,出现两个波长。

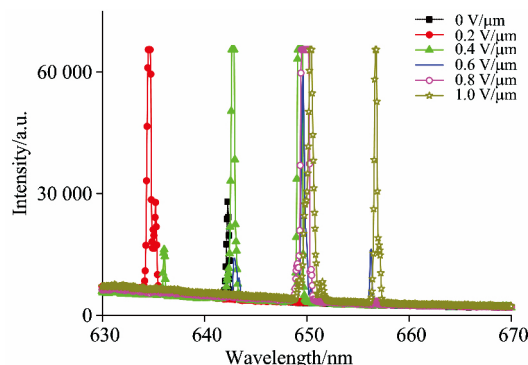


图 2 不同电场下染料掺杂正性的手性向列相液晶器件激光辐射谱

Fig 2 Laser emission spectra of dye-doped positive chiral nematic liquid crystal cell in different electric field

表 1 电场强度与输出激光波长

Table 1 Electric field intensity and emission laser wavelength

电场强度 ($\text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)	光子禁带 短波边沿	光子禁带内		光子禁带 长波边沿
0	—	642.3	—	—
0.2	634.5	—	—	—
0.4	636.0	642.8	649.4	—
0.6	—	642.9	649.6	656.3
0.8	—	—	649.6	656.7
1.0	—	—	650.5	656.9

为了揭示出现多波长辐射的原因,测量器件透射谱,确定器件光子禁带如图 3 所示。在外电场作用下,禁带波长位置变化不明显,约在 $620 \sim 660\ \text{nm}$ 范围。但禁带上下起伏不定,禁带深度变化。在偏光显微镜下观察样品,当电场增加到 $0.1\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时,正电极附近液晶织构开始产生变化,逐渐在电极附近形成多畴结构。电场增大到 $0.3\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 时,织构变化将扩大到整个样品。继续加大电场至 $0.6\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 以上时,样品中的液晶流动加剧。但仍然处于平面态织构。这正是,不管电压多大($0 \sim 1\ \text{V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 范围),总有光子禁带存在的原因。但由于液晶的流动,也导致了光子禁带起伏不定处于动态变化。光子禁带起伏不定,禁带深度变化,也正说明不仅是禁带末端波长位置附近出现激光辐射,禁带内的一个位置也有可能出现激光辐射,如表 1。采用相同配比的材料注入未取向的液晶盒在零电场状态和相同的实验条件下,发现样品产生较平滑的光致荧光峰,没有激光输出。这说明在泵浦光的激励下,取向样品所出现的尖锐激光辐射峰并非由染料 DCM 直接产生,而是需要样品特殊的螺旋层状结构提供光学正反馈。激光染料的作用是充当液晶激光器的

工作物质。

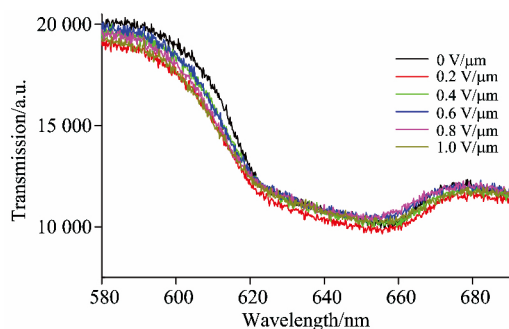


图3 不同电场下染料掺杂正性的手性向列相液晶器件透射谱

Fig 3 Transmission spectra of dye-doped positive chiral nematic liquid crystal cell in different electric field

2.2 负性液晶器件的电场调谐特性

在不同电压下的器件激光辐射谱如图4所示。电场强度增加时,器件输出激光波长逐渐蓝移,且输出激光波长比较稳定,并没产生类似正性液晶的多个波长输出。电场强度从 $0 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 增加到 $8.9 \text{ V} \cdot \mu\text{m}^{-1}$, 样品输出激光波长从 681.0 nm 蓝移到 662.5 nm , 调谐范围约 18.5 nm 。

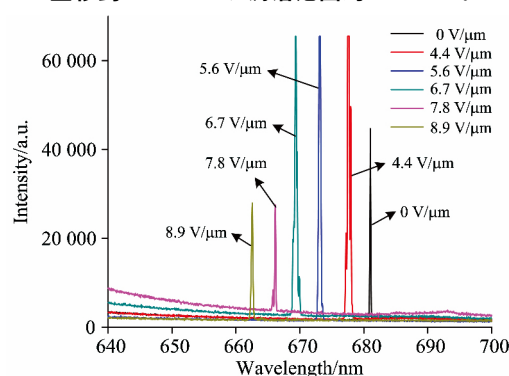


图4 不同电场下染料掺杂负性的手性向列相液晶器件激光辐射谱

Fig 4 Laser emission spectra of dye-doped negative chiral nematic liquid crystal cell in different electric field

不同电场下器件透射谱如图5所示。增加电场强度,光子禁带中心波长出现蓝移,这与输出激光波长随电场增加而

产生蓝移相符合。按图1(b)方式施加电场,液晶分子短轴将指向电场方向,内部螺距将随电压增大而收缩。光子禁带中心波长 λ_0 由式 $\lambda_0 = p \times n$ 决定,其中 p 为螺距, n 为液晶的平均折射率。器件螺距 p 的收缩将导致光子禁带中心波长蓝移。图5中,不管有无电场作用,光子禁带的底部并不平滑,并且禁带边沿出现了多个振荡。偏光显微镜下观察到,器件没有形成较好的平面态排列,存在多畴。多畴结构中每个畴的螺旋轴方向指向不完全一致。由于明显的振荡均在禁带边沿处,因此并没有影响禁带边沿位置出射激光^[6]。

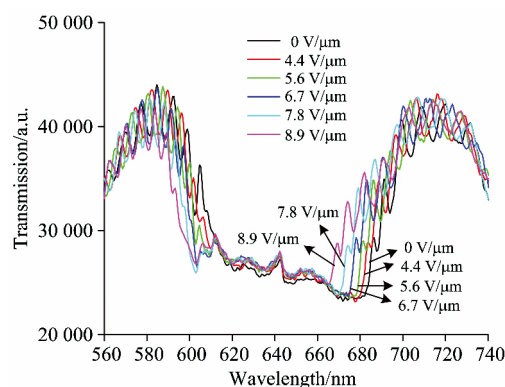


图5 染料掺杂负性的手性向列相液晶器件在不同电场下的透射谱

Fig 5 Transmission spectra of dye-doped negative chiral nematic liquid crystal cell in different electric field

3 结论

研究了电场对染料掺杂手性向列相液晶激光器件激光辐射谱的影响。设计了两种电极结构,分别对正性和负性液晶器件分别施加横向和纵向电场,并采用 532 nm 的 Nd:YAG 脉冲固体激光器泵浦样品。正性液晶器件施加电场,输出激光并不稳定且呈现多个波长。负性液晶器件施加电场,获得调谐范围为 18.5 nm 的激光输出,输出激光稳定性较好。正性液晶分子长轴具有趋向于电场方向的特性,施加横向电场时液晶分子将产生较大幅度转动,导致液晶分子产生不规则的流动。而负性液晶分子具有短轴趋向于电场方向的特性,施加纵向电场时对平面态排列进行微调的同时产生螺距收缩,从而可以实现激光辐射波长电场调谐输出。

References

- [1] Jeong M Y, Choi H, Wua J W. Appl. Phys. Lett., 2008 92: 051108-1.
- [2] Morris S M, Ford A D, Coles H J. J. Appl. Phys., 2009, 106: 023112-1.
- [3] Wu R N, Li Y, Wu J, et al. Optics Communications, 2013, 300: 1.
- [4] Schmidtke J, Junnemann G, Keuker-Baumann S, et al. Appl. Phys. Lett., 2012, 101: 051117-1.
- [5] WANG Xin-jiu(王新久). Liquid Crystal Optics and Liquid Crystal Display(液晶光学和液晶显示). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 2006. 445.
- [6] Huang Y H and Wu S T. Optics Express, 2010, 18(26): 27697.

A Study of Lasing Spectrum of Dye-Doped Chiral Nematic Liquid Crystal Cell under Electric Field

WU Ri-na¹, WU Xiao-jiao¹, WU Jie¹, PENG Zeng-hui², YAO Li-shuang², DAI Qin^{1*}

1. School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, 110159, China

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China

Abstract The lasing spectrum of dye-doped chiral nematic liquid crystal under electric field was investigated. Two kinds of electrodes were designed to apply transverse electric field to positive liquid crystal cell and longitudinal electric field to negative liquid crystal cell. A 532 nm Nd : YAG pulsed solid-state laser was used to pump the cell. When transverse electric field is applied to positive liquid crystal device, multi-wavelength laser output is obtained in the range of 630~660 nm. When longitudinal electric field is applied to negative liquid crystal cell, 18.5 nm tunable output lasing is obtained. The output characteristic of cell was analyzed from the texture of device and the photonic band gap. In the positive liquid crystal cell, the competition of electric moment with twisting moment causes the flow of LC molecule, and the flow of LC molecule leads to a floating photonic band gap. For this reason, not only at the edge of photonic band gap but in the photonic band gap can produce lasing. For negative liquid crystal cell, the pitch shrinks with the increase of electric field. The photonic band gap shows blue-shift with the decrease of pitch, and Lasing wavelength is blue shifted from 681.0 to 662.5 nm and the lasing at the edge of photonic band gap. Negative liquid crystal cell has better stability under electric field effect.

Keywords Lasing spectrum; Chiral nematic liquid crystal; Laser dye; Electric field

(Received Feb. 1, 2015; accepted Jun. 14, 2015)

* Corresponding author