

文章编号:1007-2780(2018)06-0464-05

染料掺杂手性向列相液晶器件中 实现随机激光辐射

乌日娜*, 王 兴, 杨 帆, 李业秋, 岱 钦

(沈阳理工大学 理学院, 辽宁 沈阳 110159)

摘要:设计制作了染料掺杂手性向列相液晶器件,研究了其随机激光辐射行为。均匀混合激光染料 DCM 和 PM597、手性剂 S-811、向列相液晶 TEB30A,注入无摩擦取向的 $40\ \mu\text{m}$ 液晶盒,制成焦锥织构态的手性向列相液晶激光器件。采用固体 Nd:YAG 倍频 532 nm 波长的脉冲激光作为抽运光泵浦样品。掺杂激光染料 PM597 和 DCM 的液晶器件分别在 575~588 nm 和 600~620 nm 范围显示了尖锐、分立的随机激光辐射峰,线宽约为 0.3 nm。探测了器件在不同方向上的激光辐射谱,在与样品表面夹角约为 $45^\circ\sim 150^\circ$ 的范围内均能探测到随机激光。在器件中,手性向列相液晶焦锥织构态对光的强散射作用是随机激光产生的主要原因。

关键词:手性向列相液晶;随机激光;焦锥织构态

中图分类号:TN241;O753+.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183306.0464

Realization of random lasing in dye-doped chiral nematic liquid crystal

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

(College of Mathematics and Physics, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China)

Abstract: A device of dye-doped chiral-nematic liquid crystal laser is prepared, and the random laser mechanism is analyzed. A focal conic state is achieved after mixing laser dyes DCM and PM597. Chiral compound S-811 and nematic liquid crystal TEB30A are infused into $40\ \mu\text{m}$ cells with no rubbing treatment, respectively. A Nd:YAG pulsed solid-state laser with a wavelength of 532 nm is used as pump source. Both cells emit a discrete and sharp random laser with a line-width of 0.3 nm. The laser

收稿日期:2018-01-05; **修订日期:**2018-01-17.

基金项目:国家自然科学基金(No.61705145);辽宁省高校杰出青年学者成长计划(No.LJQ2015093);辽宁省自然科学基金项目(No.201602649);沈阳市科技计划项目(No.F17-33-6-00);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课题

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.61705145), Colleges and Universities in Liaoning Province Outstanding Young Scholars Growth Plans, China (No. LJQ2015093); Liaoning Province Natural Science Foundation (No.201602649); Shenyang Science and Technology Project (No. F17-33-6-00); Shenyang Ligong University Laser and Optical Information of Liaoning Province Key Laboratory Open Funds, China

* 通信联系人, E-mail: wurina2007@126.com

from the PM597 doped cell has a wavelength region of 575~588 nm, and the laser from the DCM doped cell has a wavelength region of 600~620 nm. The random laser can be detected in a fan-shaped region with an angle from 45° to 150° to the cell surface. In the device, the strong scattering of chiral conical texture of liquid crystal in chiral nematic liquid crystal is the main reason of random lasing.

Key words: chiral nematic liquid crystal; random laser; focal conic state

1 引言

近年来,随机激光器作为一种新型的微腔激光器吸引了研究人员广泛的关注和研究。对比传统激光器,随机激光器具有尺寸小、结构简单,低激光阈值、易调谐等特性,无需外加谐振腔,随机介质对光波的无规则多重散射提供相干反馈受激放大,在微尺寸光源、光子集成、平面显示和生物医疗等领域显示出广阔的应用前景^[1-7]。1973年,Goldberg L S等提出了染料掺杂手性向列相液晶激光器的方案^[8]。2012年,Morris, Stephen M.等利用负性手性向列相液晶在电场的作用下激发出带边激光和随机激光,并可以通过改变电场的频率使激发的带边激光与随机激光相互转换。在频率小于1 kHz时,观察到随机激光辐射,当频率高于5 kHz时,可以观察到带边激光^[9]。2017年,Chun-Wei Chen等将激光染料PM597掺杂到垂直取向的向列相液晶E7中,由于液晶的散射作用得到双向随机激光辐射,出射激光的偏振态随着液晶的螺旋结构而旋转^[10]。Long-Wu Li等研究了染料掺杂手性向列相液晶的随机激光辐射。得出螺旋排列的液晶分子提供的多重散射更加有利于随机激光的产生的结果^[11]。混合激光染料的手性向列相液晶、近晶相液晶和聚合物分散液晶器件均能实现受激辐射。采用染料掺杂手性向列相液晶,器件激光辐射机制为光子带边激光的报道较多。要求手性向列相液晶呈现平面态排列。需要对器件的玻璃基板进行摩擦取向处理。本文在手性向列相液晶中分别掺杂激光染料DCM和PM597,制作了40 μm厚的液晶盒,上下玻璃基板没有进行取向处理。将样品加热至各向同性态温度并自然降温至室温,获得焦锥织构态排列。无摩擦取向处理,使器件制作工艺进一步简单化。在532 nm的固体Nd:YAG脉冲激光的泵浦下,测得了随机激光辐射,

深入分析了产生随机激光的机制。

2 实验

在两片镀有ITO的玻璃基板之间加40 μm厚的隔垫物,并做胶封处理,制成40 μm的液晶盒。将向列相液晶TEB30A(清亮点61℃,黏度为42 mm²/s@20℃,折射系数为 $n_e=1.692$, $n_o=1.522$, $\Delta n=0.17$)、手性剂S-811(4-(4-乙氧基)苯甲酰氧基苯甲酸-(S)-(+)-2-辛醇酯)、激光染料PM597分别按质量分数68.6%、29.4%、2%均匀混合,利用毛细作用注入到40 μm液晶盒中,静置12 h待液晶稳定后将液晶盒在61℃的温度下加热10 min之后取出将其自然降温,得到焦锥织构态,制成样品1;将向列相液晶TEB30A、手性剂S-811、激光染料DCM分别按相同质量分数68.6%、29.4%、2%均匀混合,利用毛细作用注入到40 μm液晶盒中,与样品1相同的处理过程,得到焦锥织构态,制成样品2。在正交偏光显微镜(OLYMPUS BX51)下观察样品的织构。以脉冲频率为3 Hz,脉宽20 ns的固体Nd:YAG倍频532 nm波长的脉冲激光作为泵浦光,激发样品。利用多通道光纤光谱仪(Avantes)测量液晶器件的激光辐射谱。实验探测装置如图1所示。泵浦光的入射方向与样品的法线方向夹角为45°。

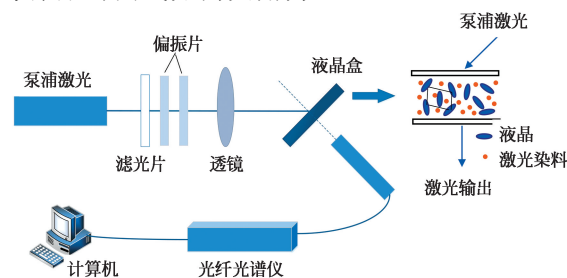


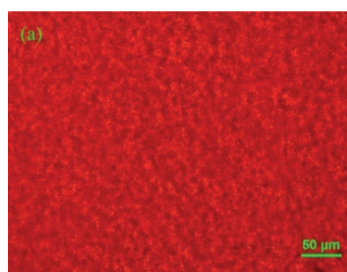
图1 激光辐射谱探测装置图

Fig.1 Optical setup for probing laser emission spectrum

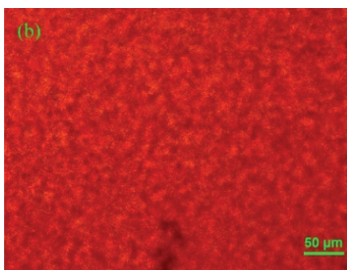
3 结果及分析

随机激光的产生是由光的多重散射所形成的。根据环形腔理论^[12],光子通过多重散射有可能形成一个闭合回路或微腔,这些闭合回路类似一个环形的谐振腔,通过激光染料获得增益,不断地进行放大反馈形成共振,这样光子在微腔中不断的增益放大,当增益大于损耗时产生激光辐射。因此要想产生随机激光,其中一个必要条件就是要对入射光形成强烈的散射。文中液晶盒上下玻璃基板无摩擦取向,并将制得的样品在 TEB30A 的各向同性态温度下加热 10 min 之后取出将其自然降温。为了获得完全的焦锥织构态,经过反复的加热和降温过程。

两个样品在偏光显微镜下的织构图如图 2 所示。区别于平面排列态,液晶分子处于一种多畴状态,每一个畴中螺旋结构仍然存在。不同畴的螺旋轴在空间取向杂乱无章。这种织构由于折射率在畴边界的不连续变化,表现出强烈的散射。显微镜下可以看到,晶畴随机排列,紧密无序,晶畴大小约 10~20 μm 如同“毛玻璃”,形成折射率随机分布的



(a) 掺 PM597 的样品
(a) PM597 doped sample



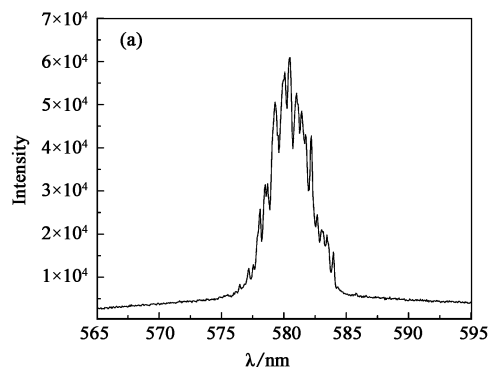
(b) 掺 DCM 的样品
(b) DCM doped sample

图 2 偏光显微镜照片

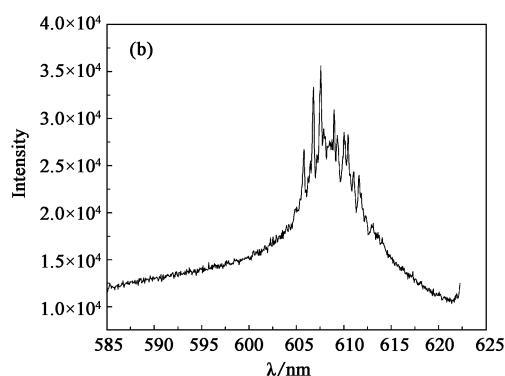
Fig.2 Photographs of the samples

微区,从而对染料出射的荧光造成强烈的散射形成闭合回路或微腔,有利于光子局域在微腔中,不断反馈放大形成共振,产生随机激光。

测得两个样品激光辐射谱如图 3 所示。由图 3(a)可以看出,在相同的泵浦条件下,掺杂激光染料 PM597 的样品 1 在泵浦光的激发下在 575~588 nm 的自发辐射放大范围内出现多个离散尖锐的随机激光辐射峰,其线宽约为 0.3 nm。而图 3(b)掺杂激光染料 DCM 的样品 2 在 600~620 nm 的范围内出现多个离散尖锐的随机激光辐射峰,其线宽约为 0.3 nm。染料 PM597 荧光谱范围在 570 nm 至 590 nm 附近,染料 DCM 的荧光谱范围在 600 nm 至 620 nm 附近,因此两种染料掺杂样品的随机激光辐射波段不同。



(a) 掺 PM597 的样品
(a) PM597 doped sample



(b) 掺 DCM 的样品
(b) DCM doped sample

图 3 随机激光辐射谱

Fig.3 Random lasing spectra

由上述掺杂不同染料的随机激光辐射图可以看出,随机激光辐射的强度存在差异,掺杂

PM597 染料的样品激发的随机激光辐射强度要高于掺杂 DCM 染料的样品随机激光辐射。掺杂 PM597 的样品随机激光的阈值相比于掺杂 DCM 的样品也要低,测得阈值泵浦能量为每脉冲 $10\ \mu\text{J}$,而掺杂 DCM 的样品辐射随机激光的阈值为每脉冲 $30\ \mu\text{J}$ 。为了探究其原因,白光为光源,测量了两种样品的透射谱,如图 4,图中横坐标 $500\ \text{nm}$ 位置为光纤光谱仪相邻两个通道连接的位置。掺杂 PM597 的样品透射谱在 $500\sim 550\ \text{nm}$ 范围内的透过率小于掺杂 DCM 的样品。

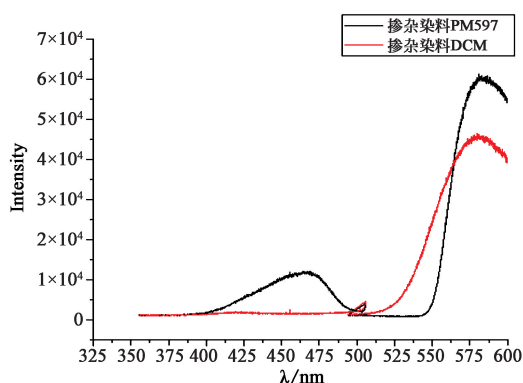
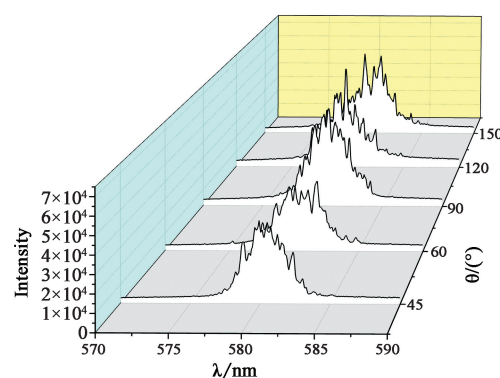


图 4 样品的白光透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum of the sample in white light

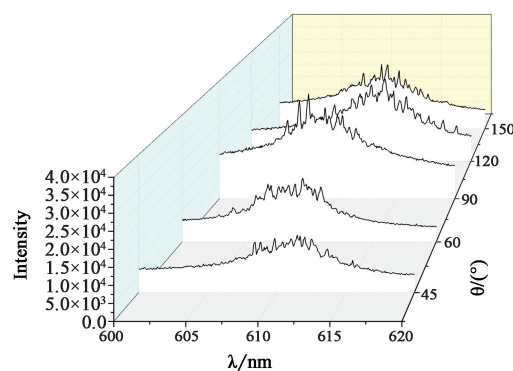
影响样品透射谱的因素有液晶的排列状态与激光染料。液晶的排列状态可以通过温度、电场等外部条件的变化改变。实验中将样品进行升温到 61°C ,发现样品的透射率曲线在小于 $550\ \text{nm}$ 波段几乎没有变化,其他波段由于液晶达到了清亮点,变为各向同性,透射率达到最大。因此可以判断上图中透过率较小的波段是对应了激光染料的吸收波段。后续对染料的吸收谱进行验证也得到了同样的结论。由于泵浦光波长为 $532\ \text{nm}$,从图 4 中的透射谱可以看出,染料 DCM 在 $532\ \text{nm}$ 波长位置的吸收明显要低于 PM597,这是辐射激光强度不同的主要原因。

探测了不同方向上的激光辐射谱。测量结果如图 5 所示,为掺杂激光染料 PM597 的样品与掺杂染料 DCM 的样品在不同探测方向的随机激光辐射。其中, θ 为光纤探头与样品的夹角,即探测角度。在与样品夹角 $45^\circ\sim 150^\circ$ 的方向上均探测到了随机激光辐射。相比于带边激光,随机激光



(a) 掺杂 PM597 的样品

(a) PM597 doped sample



(b) 掺杂 DCM 的样品

(b) DCM doped sample

图 5 不同探测方向的随机激光辐射谱

Fig. 5 Random lasing spectra in different detection angle

辐射方向性更广。

产生随机激光需要样品提供足够大的散射系数。向列相液晶为强散射介质,向列相液晶对可见光的散射高于各向同性介质 10^6 倍^[13]。散射的根本原因在于液晶分子介电矢量的波动^[11]。手性向列相液晶的焦锥织构态中,每一个微畴中螺旋轴的取向混乱。光子不仅在每个微畴中液晶分子间散射,同时在两个畴的边界处也将被散射。从而可以提供较向列相液晶更强的散射。

4 结 论

在染料掺杂手性向列相液晶器件中实现了随机激光辐射。分别按 68.6%、29.4%、2% 的质量分数均匀混合液晶 TEB30A、手性剂 S-811、激光

染料(PM597 或 DCM)注入无摩擦取向处理的液晶盒中,获得液晶的焦锥织构态。以 Nd:YAG 固体激光器倍频 532 nm 波长的脉冲激光作为泵浦光源,掺杂染料 PM597 的样品和掺杂激光染料 DCM 的样品分别在 575~588 nm 范围和 600~620 nm 范围显示了尖锐、分立的随机激光辐射峰,线宽约为 0.3 nm,获得激光辐射阈值能量分

别为每脉冲 10 μJ 和每脉冲 30 μJ 。由于染料 PM597 在泵浦光 532 nm 波长位置的吸收明显要高于 DCM,因此掺杂 PM597 的样品相比于掺杂 DCM 的样品出光阈值较低,出射的随机激光强度较强。此外,掺杂两种染料的样品在与其垂直夹角 $45^\circ\sim 150^\circ$ 的方向上均探测到了随机激光辐射。相比于带边激光,随机激光辐射方向性更广。

参 考 文 献:

- [1] 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,2011,40(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)
- [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 1053nm 钕玻璃激光放大器[J].红外与激光工程,2012,41(10):2637-2643.
QIU J S, FAN Z W, TANG XX, *et al.* 100 mJ high beam quality all-solid-state 1053 nm Nd: glass amplifier at repetition frequency shaping by LCSLM [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(10): 2637-2643. (in Chinese)
- [3] 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):2699-2702.
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): 2699-2702. (in Chinese)
- [4] 岱钦,邹小娇,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.
DAI Q, WU X J, WU J, *et al.* Preparation and research of dye-doped chiral nematic liquid crystal [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2014, 29(6): 922-925. (in Chinese)
- [5] 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 Crystals and Displays*, 2013, 28(5): 679-682. (in Chinese)
- [6] 姜宝光,曹召良,穆全全,等.激光为光源的液晶自适应眼底成像系统[J].光学精密工程,2008,16(10):1805-1809.
JIANG B G, CAO Z L, MU Q Q, *et al.* Liquid crystal based retina adaptive optical imaging system with laser source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(10): 1805-1809. (in Chinese)
- [7] 岱钦,乌日娜,杨健,等.电场作用下染料掺杂液晶器件的激光辐射[J].光学精密工程,2011,19(7):1510-1514.
DAI Q, WU R N, YANG J, *et al.* Laser emission of dye-doped liquid crystal devices under applying voltage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1510-1514. (in Chinese)
- [8] GOLDBERG L S, SCHNUR J M. Tunable internal-feedback liquid crystal-dye laser: US, 3771065 [P]. 1973-11-06.
- [9] MORRIS S M, GARDINER D J, HANDS P J W, *et al.* Electrically switchable random to photonic band-edge laser emission in chiral nematic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 100(7): 071110.
- [10] CHEN C W, HUANG H P, JAU H C, *et al.* Polarization-asymmetric bidirectional random laser emission from a twisted nematic liquid crystal [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(3): 033102.
- [11] LI L W, DENG L G. Random lasing from dye-doped chiral nematic liquid crystals in oriented and non-oriented cells [J]. *European Physical Journal B*, 2013, 86(3): 112.
- [12] CAO H, ZHAO Y G, HO S T, *et al.* Random laser action in semiconductor powder [J]. *Physical Review Letters*, 1999, 82(11): 2278-2281.
- [13] FERJANI S, BARNIA V, DE LUCA A, *et al.* Thermal behavior of random lasing in dye doped nematic liquid crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(12): 121109.

作者简介:乌日娜(1978—),女,内蒙古海拉尔人,副教授,博士,主要从事光电功能材料及器件方面的研究. E-mail: wurina2007@126.com