

## 向列相液晶激光器件侧面辐射谱研究

乌日娜, 宋云鹤, 高 芮, 王 萧, 鲁小鑫, 李业秋, 岱 钦

(沈阳理工大学理学院, 辽宁 沈阳 110159)

**摘要:** 研究了向列相液晶激光器件侧面激光辐射谱, 并深入分析了激光辐射机制。分别制备了传统液晶盒和引入 SU-8 光栅结构的两种器件, 并注入向列相液晶 TEB30A 和激光染料 PM597 的混合物。利用 Nd: YAG 固体脉冲激光器倍频出的 532 nm 激光作为泵浦源正面入射器件, 侧面探测激光辐射谱。在传统液晶盒器件侧面, 测得 575~600 nm 范围的随机激光辐射谱。而具有周期 100  $\mu\text{m}$  和 8  $\mu\text{m}$  的 SU-8 光栅结构器件侧面, 获得了多波长激光辐射谱。随着泵浦能量增大, 最高强度激光辐射峰波长位置出现在 583~585 nm 和 588~592 nm 附近, FWHM 约 0.3 nm。基于光波导理论结合器件结构分析得出, 在传统液晶盒中引入 SU-8 光栅结构增强了液晶器件的光波导效应, 是获得多波长激光辐射谱的主要原因。

**关键词:** 向列相液晶; SU-8 光栅; 多波长激光; 随机激光

**中图分类号:** TN241; O753+.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220159

## Emission spectrum of lateral laser in nematic liquid crystal device

Wu Rina, Song Yunhe, Gao Rui, Wang Xiao, Lu Xiaoxin, Li Yequ, Dai Qin

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

**Abstract:** The spectra of the lateral laser radiation in nematic liquid crystal (NLC) laser devices are studied, and the characteristics of the laser radiation are deeply analyzed. Two types of NLC cells of standard NLC cell and SU-8 grating based NLC cell are fabricated and injected with a mixture of NLC TEB30A and laser dye PM597, respectively. A frequency-doubled Nd: YAG solid-state pulsed laser with a wavelength of 532 nm is used as the pump source. Random lateral laser radiation in the wavelength of 575-600 nm is observed in the standard NLC cell. Whereas, in the SU-8 grating based NLC cells with periods of 100  $\mu\text{m}$  and 8  $\mu\text{m}$ , the spectrum of the multi-wavelength lateral laser radiation is obtained. With the increase of the pump energy, the strongest lateral laser radiation peaks appear at 583-585 nm and 588-592 nm, and the FWHM is about 0.3 nm. According to the theory of the optical waveguide and analysis of the device structure, the introduction of the SU-8 grating into the standard NLC cell enhances the optical waveguide effect of the LC device and induces multi-wavelength laser radiation.

**Key words:** nematic liquid crystal; SU-8 grating; multi-wavelength laser; random laser

收稿日期: 2022-03-04; 修订日期: 2022-05-20

基金项目: 国家自然科学基金 (61705145); 辽宁省高等学校创新人才支持计划 (LR2016079); 辽宁省自然科学基金 (20180550330); 沈阳理工大学科研创新团队建设 (SYLUTD2020); 高水平建设项目 (SYLUXM202107)

作者简介: 乌日娜, 女, 教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事液晶物理与器件方面的研究。

## 0 引言

染料掺杂液晶激光器,具有结构简单,体积小,阈值低,无需外加谐振腔,在外场作用下可调谐输出等优点,在生物医学、光通信、微尺寸光源等方面显示了巨大的应用前景<sup>[1-3]</sup>。在外加泵浦光的作用下,染料掺杂胆甾相液晶可获得禁带边沿激光辐射;染料掺杂向列相液晶器件,可获得随机激光辐射。其中,禁带边沿激光可获得单一波长,但受限于平面排列态的器件结构和激光辐射机制,在器件正面辐射输出<sup>[4]</sup>。随机激光为分立的多个尖锐的激光辐射峰。相关文献报道也多为器件正面辐射输出<sup>[5]</sup>。器件正面辐射输出,将不利于与其它光学元件的集成使用,从而将限制其应用范围。因此,侧面辐射输出液晶激光器件的制备及激光辐射机制的研究倍受关注。总结侧面辐射输出液晶激光器件的报道可以分为以下几类:(1)改变传统液晶器件结构。2007年,BLINOV设计带铬不透明光栅电极(周期 15  $\mu\text{m}$ )的向列相液晶激光器件,实现了器件侧面多波长激光辐射输出,在外电场下波长调谐范围大于 25 nm<sup>[6]</sup>;2008年,采用棱镜和平面玻璃的组合,在胆甾相液晶激光器件中获得了侧面辐射输出<sup>[7]</sup>。2012年,Chen制备具有表面起伏光栅和高折射率薄膜的三明治结构向列相液晶激光器件,获得了多波长激光和随机激光相切换的器件侧面辐射输出<sup>[8]</sup>。(2)液晶中掺杂散射颗粒。2015年, Lee制备了掺纳米粒子的向列相液晶激光器件,获得侧面辐射输出的随机激光,激光强度随电压和温度可调制<sup>[9]</sup>。(3)聚合物分散液晶激光器件。2011年, Deng制备了染料掺杂的透射式液晶/聚合物光栅器件,得到了中心波长约 603 nm 的窄线宽、低阈值激光辐射输出<sup>[10]</sup>。(4)增强光波导效应。2021年, Huang制作器件厚度约 125  $\mu\text{m}$  的向列相液晶激光器件,获得了器件侧面的可控制偏振方向、强度和波长的随机激光辐射输出,并称之为光波导向列相液晶随机激光<sup>[11]</sup>。由此得出,通过器件结构变化,可以增强侧面辐射输出激光,并结合外场作用(电场、温度、磁场等),灵活调制输出激光。因此,新型结构器件和激光辐射机制的探讨颇具意义,即不仅进一步拓宽液晶激光器件的应用领域,而且将不断完善液晶激光理论。

文中采用向列相液晶 TEB30 A 和激光染料 PM597,分别制备了传统液晶盒和引入 SU-8 光栅结构的两种液晶激光器件。在 Nd:YAG 倍频 532 nm 波长激光的泵浦作用下,测量分析了器件侧面输出的激光辐射谱,并对激光辐射机制进行了深入的探讨。

## 1 实验

制备了传统液晶盒和引入 SU-8 光栅结构的两种器件。在玻璃基板上旋涂 PI 取向剂,200  $^{\circ}\text{C}$  高温固化 1 h,进行摩擦处理(中电 13 所, MCJ-12 A 手动型摩擦机)。在取向后的基板表面旋涂 SU-8 光刻胶(Microchem),用皮秒曝光法,获得周期 100  $\mu\text{m}$  的光栅。皮秒倍频系统(鞍山紫玉激, Penny-pico-10)中,激光器为 LD 泵浦 Nd:YAG 倍频 532 nm 大功率准连续激光器,激光频率 10 kHz,脉宽 13 ps,功率 240 mW,激光通过显微聚焦系统后聚焦在玻璃基板,通过二维精密移动平台来控制样品,加工成光栅形状。利用光掩模法曝光基板,获得周期为 8  $\mu\text{m}$  的光栅。采用 48 W 的紫外灯,波长在 365~420 nm 范围,峰值分别在 375、397 nm。SU-8 光刻胶又称光致抗蚀剂,实验中所使用的 SU-8 为负性光刻胶。负性光刻胶的特点是接受曝光的部分发生化学反应形成一种不溶于显影液的物质,进而曝光的部分在显影过程中被留下。利用正交偏光显微镜(OLYMPUS, BX51)观察光栅基板,如图 1(a)、(b)所示。取同样取向 PI 的 ITO 基板和具有 SU-8 光栅基板,制成反平行液晶盒。盒厚约 10  $\mu\text{m}$  (SU-8 光栅胶厚约 10  $\mu\text{m}$ ,相当于隔垫物)。光栅沟槽与 PI 摩擦取向方向平行。

同时制作反平行取向的传统液晶盒,盒厚约 10  $\mu\text{m}$ 。将向列相液晶 TEB30 A、激光染料 PM597 按照质量百分比 98%、2% 均匀混合,利用毛细作用注入上述空盒中,器件制作完成。实验测量装置如图 2 所示。固体 Nd:YAG 激光器产生 532 nm 脉冲激光,脉冲频率为 10 Hz,脉宽 20 ns。激光通过滤光片,滤掉可能存在的 1064 nm 激光。通过小孔消除杂散光。经过分光棱镜分为能量相同的两束,一束由能量计(COHERENT, J-50 MB-HE)实时探测其能量,另一束透过柱透镜后聚焦形成长约 2 mm、宽约 0.5 mm 线型光斑,光斑长轴垂直于光栅沟槽。泵浦光垂直样品表面入射。利用多通道光纤光谱仪(Avantes)在样品侧

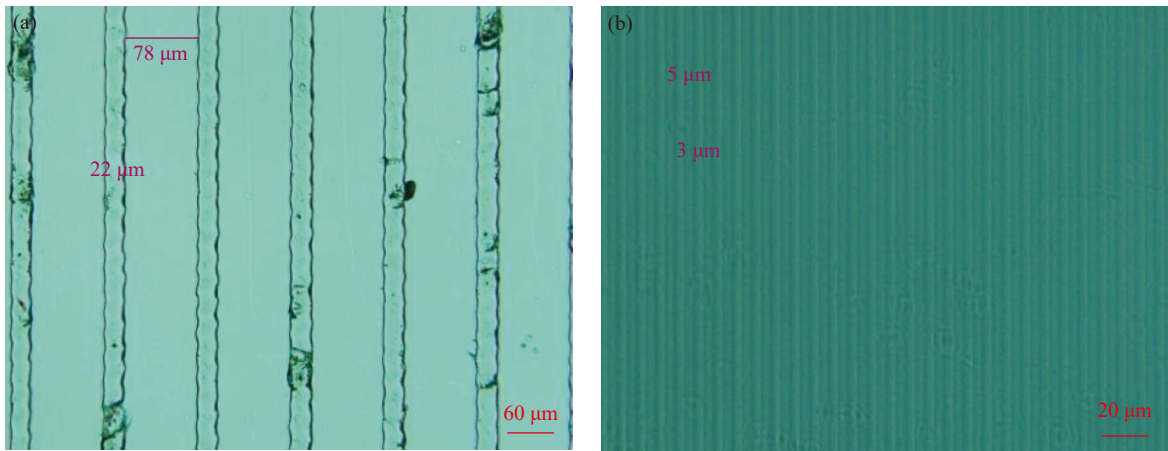


图 1 光栅基板。(a) 周期 100 μm; (b) 周期 8 μm

Fig.1 Grating substrate. (a) Period 100 μm; (b) Period 8 μm

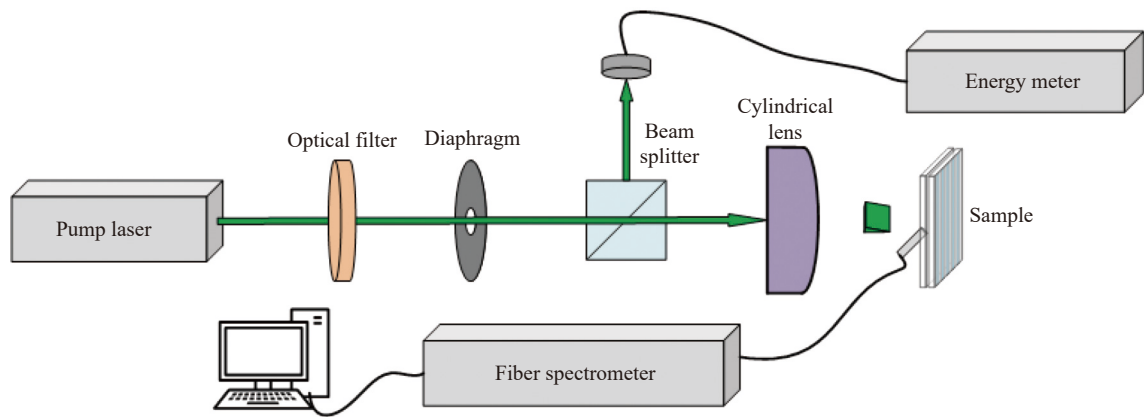


图 2 激光辐射谱测试装置图

Fig.2 Experimental setup for probing laser emission spectrum

面探测激光辐射谱。

## 2 实验结果及分析

测得传统液晶盒器件激光辐射谱如图 3(a) 所示。激光辐射谱波长范围在 575~600 nm, 辐射峰呈现多个离散的随机激光峰, 随机激光峰分布在荧光辐射谱的鼓包上面, 最强峰位波长已在图中标出, 阈值泵浦能量为 10.33 μJ/pulse。传统液晶盒中, 液晶分子充当无序或部分有序的散射颗粒, 激光染料作为增益介质, 光波在液晶分子间的散射作用较强, 经过多次散射, 形成闭合回路, 获得反馈放大, 当增益超过损耗时获得激光辐射。在前期研究中发现影响随机激光辐射阈值的主要因素之一为液晶层厚度和温度<sup>[12]</sup>。文中实验在器件侧面测得随机激光辐射输出, 充分说明传统液晶盒结构具有光波导作用。光波在液晶层中

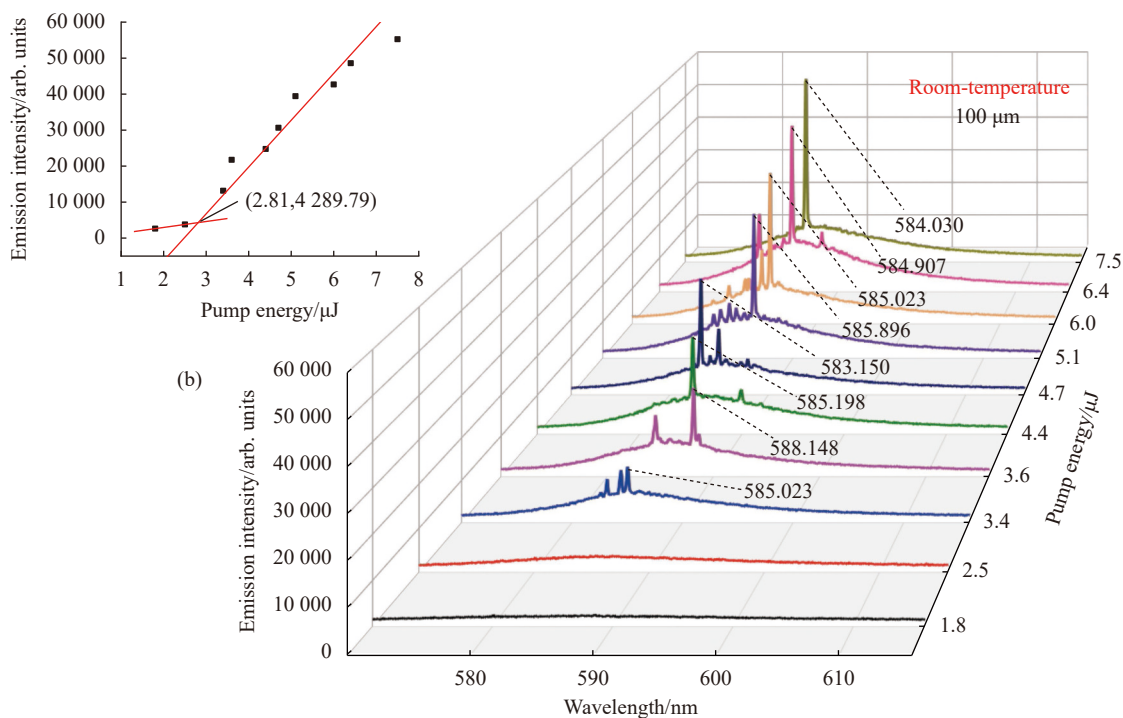
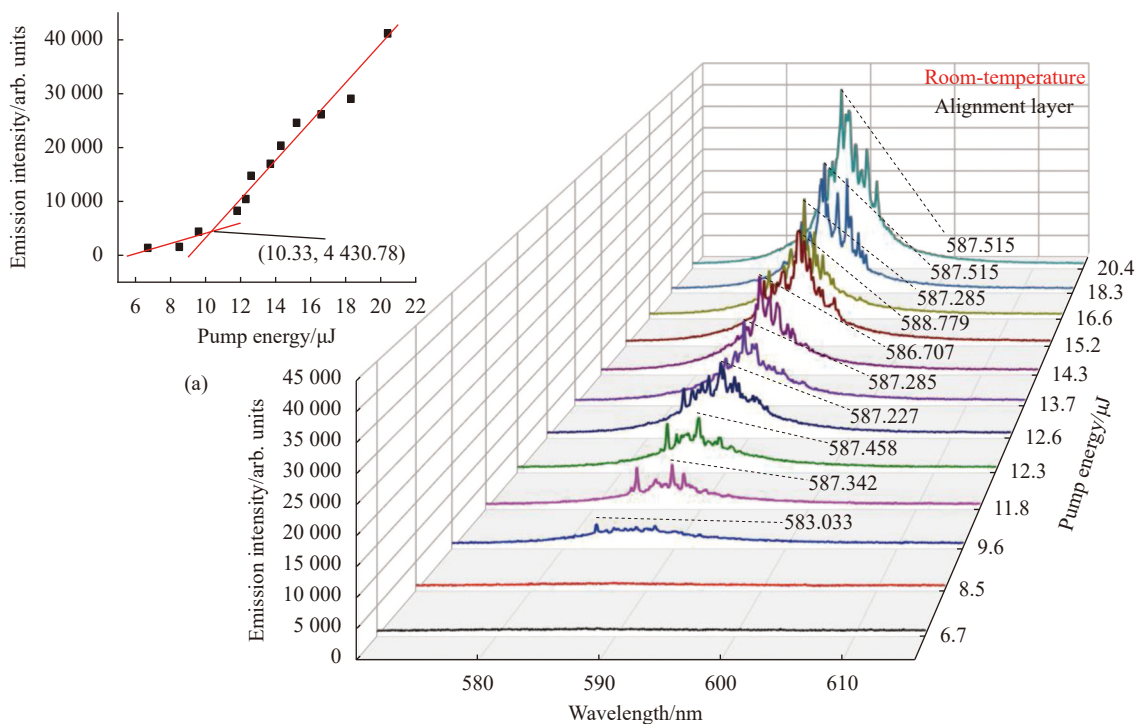
传输时折射率分别为  $n_o=1.522$  和  $n_e=1.692$  (室温), 而 PI 的折射率  $n_{PI}=1.516$ 。  $n_o$  和  $n_e$  值均大于  $n_{PI}$ , 满足光波导条件, 并且是结构对称光波导。在光波导中传输的光波, 可以有辐射模式、衬底模式、导波模式等三种形式。辐射模式和衬底模式分别从液晶盒的正面方向辐射输出, 而导波模式则从器件侧面方向辐射输出<sup>[13]</sup>。因此, 不难分析得出, 传统液晶盒中形成的随机激光即可以从器件正面方向辐射输出, 也可以从器件侧面辐射输出。

图 3(b)、(c) 为引入周期 100 μm 和 8 μm SU-8 光栅器件在室温下的激光辐射谱。周期 100 μm 器件激光辐射谱波长范围约 575~600 nm, 半高全宽 (Full width at half maximum, FWHM) 约 0.3 nm, 阈值泵浦能量为 2.81 μJ/pulse。周期 8 μm 器件, 激光辐射谱波长范围约 580~610 nm, FWHM 约 0.3 nm, 阈值泵浦能量

为 4.62  $\mu\text{J}/\text{pulse}$ 。与随机激光辐射谱比较, 荧光辐射谱的鼓包上面出现了相对强度较强的一个或多个辐射峰。最强峰位波长已在图中标出。这说明引入 SU-8 光栅, 增强了液晶器件的光波导效应。

以上三种器件阈值泵浦能量大小关系为周期 100  $\mu\text{m}$  光栅液晶器件 < 周期 8  $\mu\text{m}$  光栅液晶器件 < 传统液晶盒器件。SU-8 光栅器件, 周期 100  $\mu\text{m}$  的阈

值略低于周期 8  $\mu\text{m}$  的。分析认为, 光栅周期小, 使得激光染料分布较分散, 相同泵浦能量下, 可获得增益较小, 导致泵浦阈值能量较大。另外, 可以看出周期 8  $\mu\text{m}$  器件的最强峰位波长较周期 100  $\mu\text{m}$  器件有所红移。由下面的理论分析将会得出, 光栅周期不同, 光波导层的有效折射率值  $n_{eff}$  不同, 从而引起器件输出激光波长不同。



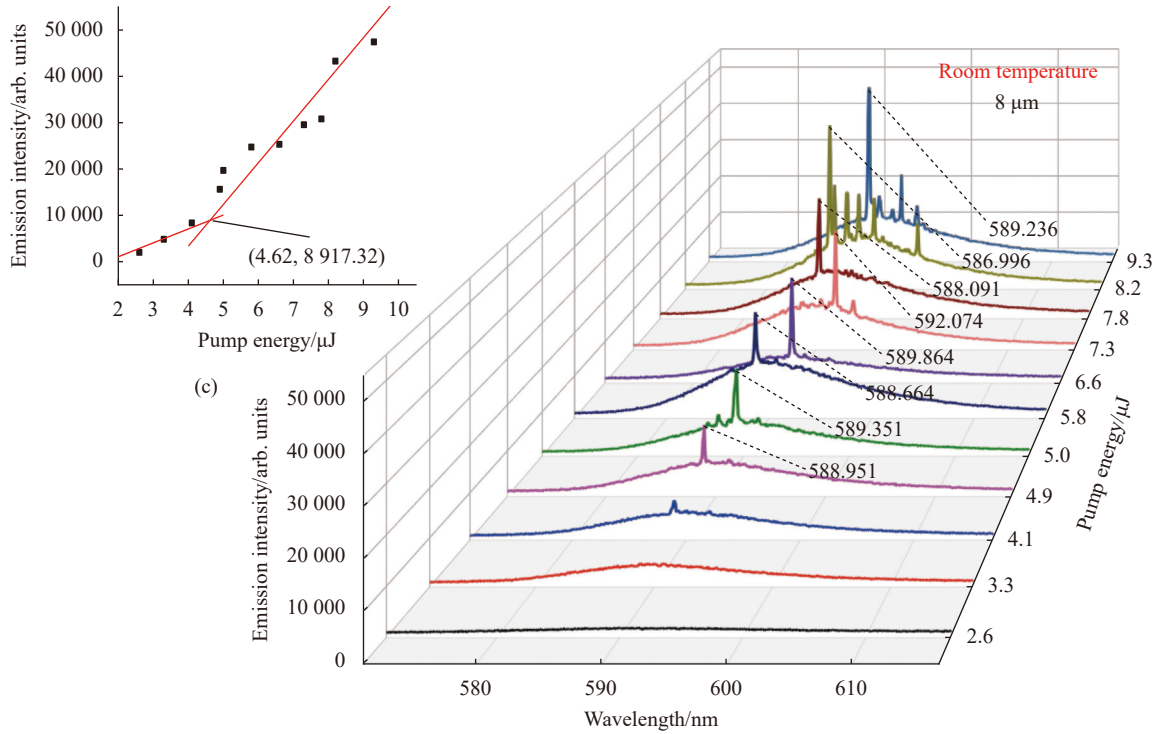


图 3 器件侧面方向的激光辐射谱。(a) 传统液晶盒器件；(b)、(c) 周期 100 μm 和 8 μm 光栅结构器件，插图为辐射强度与泵浦能量的依赖关系  
Fig.3 Laser emission spectrum at the side of the cell. (a) Standard NLC cell; (b), (c) NLC cell with a period of 100 μm and 8 μm grating, the inset shows the dependence of the emission intensity on the pumping energy

将液晶器件视为光波导，上下 PI 取向层为覆盖层和衬底层，液晶层为导光薄膜层。在液晶层和 PI 层界面，满足全反射条件的光波，不断干涉加强，在波导中传输，图中用绿色光线画出，如图 4 所示。当然，液晶层中传输的光波路径不仅仅是图中所示。光波在液晶分子间不断散射，同时在 SU-8 光栅中反复透射和反射。

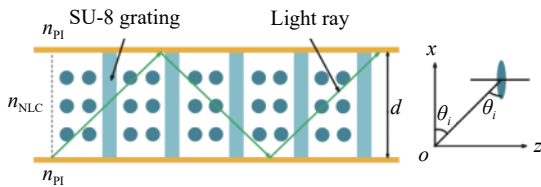


图 4 液晶器件和光波导示意图

Fig.4 Schematic diagram of liquid crystal cell and optical waveguide

由光波导理论公式<sup>[13]</sup>可推导出器件中可传输光波长计算公式如下：

$$\frac{\pi d \cos \theta_i}{\lambda} = \frac{m\pi}{2} + \arctan \left( \frac{\sqrt{n_{eff}^2 \sin^2 \theta_i - n_{PI}^2}}{n_{eff} \cos \theta_i} \right) \quad (1)$$

式中： $d$ 为液晶盒厚度 10 μm； $\theta_i$ 如图 4 所示； $m$ 为模阶

数，取有限正整数； $n_{PI}=1.516$ 。有效折射率 $n_{eff}$ 由下式给出：

$$n_{eff} = \frac{a}{\Lambda} n_{NLC} + \frac{\Lambda - a}{\Lambda} n_{SU-8} \quad (2)$$

式中： $a$ 为光栅槽宽； $\Lambda$ 为光栅周期； $n_{SU-8}$ 为 SU-8 光栅折射率 1.5742 (厂家提供参数，由柯西公式计算得出)； $n_{NLC} = n_o$ 或 $n_e(\theta_i)$ ，即在液晶层中可传输的线偏振光的折射率； $o$ 光的振动方向垂直  $xoz$  平面，折射率  $n_o$ ； $e$ 光的振动方向在  $xoz$  平面内，折射率 $n_e(\theta_i)$ 由下式给出：

$$n_e(\theta_i) = \sqrt{\frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 \sin^2 \theta_i + n_e^2 \cos^2 \theta_i}} \quad (3)$$

式中： $n_e=1.692$ ； $n_o=1.522$ 。由全反射公式，在 PI 取向层和液晶层界面处， $e$ 光入射角度大于 66°会在界面发生全反射，小于 66°则有透射有反射； $o$ 光入射角度大于 85°发生全反射，小于 85°则有透射有反射。光波通过在上下界面处反射，获得干涉加强，当增益大于损耗时，由器件侧面辐射输出。

由公式 (1)~(3)，可分别计算出光波导中传输波长，即器件输出激光波长值，如表 1 所示。可以看出理论值与图 3(c)、(d) 中实验测得波长值基本符合。

表 1 输出波长理论值

Tab.1 Theoretical values of output wavelength

	$n_{PI}$	$m$	$n_{NLC}$		$n_{eff}$		$\theta_i$		$\lambda/nm$
$\Lambda/\mu m$	100&8	100&8	100&8	100	8	100	8	100	8
e optical	1.516	12	1.667	1.646	1.632	69°	69°	585.722	590.435
	1.516	10	1.674	1.652	1.636	72.3°	72.2°	583.406	589.346
	1.516	8	1.680	1.656	1.640	75.5°	75.5°	585.690	587.681
	1.516	6	1.684	1.660	1.643	78.8°	78.8°	583.333	585.083
	1.516	4	1.688	1.663	1.645	82°	82°	585.402	587.045
	1.516	2	1.690	1.665	1.647	85.2°	85.2°	588.457	590.051
	1.516	2	1.522	1.533	1.542	85.55°	85.37°	591.038	602.760
o optical	1.516	2	1.522	1.533	1.542	85.56°	85.39°	589.534	599.883
	1.516	2	1.522	1.533	1.542	85.57°	85.40°	588.031	598.447
	1.516	2	1.522	1.533	1.542	85.58°	85.42°	586.529	595.575
	1.516	2	1.522	1.533	1.542	85.59°	85.44°	585.028	592.707

### 3 结 论

设计制作了传统液晶盒和引入 SU-8 光栅结构的两种器件,测量分析了器件侧面激光辐射谱,并基于光波导理论建立模型,深入探讨了激光辐射机制。在传统液晶盒中获得随机激光,引入 SU-8 光栅器件中获得多波长激光输出。室温下,传统液晶盒随机激光辐射谱波长范围约 575~600 nm。传统液晶盒随机激光输出主要由激光染料提供增益,液晶分子间的多重散射提供反馈放大形成。引入周期 100 μm 和 8 μm 的 SU-8 光栅器件,获得多波长激光输出,随着泵浦能量增大,最高强度激光辐射峰波长位置出现在 583~585 nm 和 588~592 nm 附近,FWHM 约 0.3 nm。理论计算输出波长值与实验测量结果基本符合。由此得出,引入 SU-8 光栅增强了液晶器件光波导效应,有利于器件侧面激光辐射输出。

#### 参考文献:

[1] Letokhov V S. Generation of light by a scattering medium with negative resonance absorption [J]. *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 1968, 26: 835-840.

[2] Lawandy N M, Balachandran R M, Gomes A S L, et al. Laser action in strongly scattering media [J]. *Nature*, 1994, 368(6470): 436-438.

[3] Mysliwiec J, Szukalska A, Szukalski A, et al. Liquid crystal lasers: The last decade and the future [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(9): 2309-2346.

[4] Ahn S, Ko M O, Kim J H, et al. Characterization of second-order reflection bands from a cholesteric liquid crystal cell based on a wavelength-swept laser [J]. *Sensors*, 2020, 20(16): 4643.

[5] Ferjani S, Luca D A, Barna V, et al. Thermo-recurrent nematic random laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(3): 2042-2047.

[6] Blinov L M, Lazarev V V, Palto S P, et al. Electric field tuning a spectrum of nematic liquid crystal lasing with the use of a periodic shadow mask [J]. *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials*, 2007, 16(1): 75-90.

[7] Blinov L M, Cipparrone G, Mazzulla A, et al. Quasi-in-plane leaky modes in lasing cholesteric liquid crystal cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(10): 103115.

[8] Chen L, Liu Z, Che K, et al. Thermo-switchable multi-wavelength laser emission from a dye-doped nematic liquid-crystal device [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(7): 2971-2975.

[9] Lee C R, Lin S H, Guo J W, et al. Electrically and thermally controllable nanoparticle random laser in a well-aligned dye-doped liquid crystal cell [J]. *Optical Materials Express*, 2015, 5(6): 1469-1481.

[10] Deng S, Li W, Huang W, et al. Distributed-feedback lasing from dye-doped holographic polymer dispersed liquid crystal transmission grating [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(5): 056102. (in Chinese)

[11] Huang Y, Zhang X, Yu B, et al. Waveguided nematic liquid crystal random lasers [J]. *Nanophotonics*, 2021, 10(13): 3541-3547.

[12] Wu R, Lu J, Wang X, et al. Random lasing in dye-doped chiral nematic liquid crystal [J]. *Optik*, 2020, 202: 163616.

[13] Song G, Quan W. *Optical Waveguide Principle and Devices*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)