

## 向列相液晶染料可调谐激光器的研究\*

刘永军<sup>1)†</sup> 孙伟民<sup>1)</sup> 刘晓颀<sup>1)</sup> 姚丽双<sup>2)</sup> 鲁兴海<sup>2)</sup> 宣丽<sup>2)</sup>

1) (哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

2) (中科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, 长春 130033)

(2011年6月9日收到; 2011年8月23日收到修改稿)

对向列相液晶染料的可调谐激光器进行了光学特性研究. 以 650 nm 为中心波长设计了 SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 多层膜的一维光子晶体, 以激光染料与向列相液晶的混合物作为增益介质层, 制备了波长可调谐激光器. 用 Nd: YAG 倍频脉冲激光器输出的 532 nm 激光抽运所制备的激光器样品得出如下光学特性: 激光发射波长随温度调谐范围为 605.5—639.8 nm, 达到 34.3 nm, 随电压调谐范围为 634.5—619.5 nm, 达到 15 nm. 发射激光每脉冲的阈值能量为 12.3 μJ, 激光线宽小于 1 nm.

**关键词:** 可调谐激光器, 向列相液晶, 染料

**PACS:** 42.70.Df, 42.55.Mv

## 1 引言

液晶可调谐激光器与其他传统的固态激光器相比, 具有从近紫外到近红外的宽波段调谐范围, 并且其本身尺寸小、线宽窄和光学效率高, 这使其在单芯片实验室、医学诊断、皮肤医学等领域具有重要的应用前景<sup>[1]</sup>.

自从 1998 年 Kopp 等<sup>[2]</sup> 实验证明了染料掺杂胆甾相液晶结构中的激光发射之后, 很多科学家开始进行这方面的研究, 现已成为国际研究的热门科学之一. 2001 年 Kopp 等<sup>[3]</sup> 进一步得出了激光发射的方向与抽运光入射的方向无关且总是在平行螺旋轴方向的结论. Araoka 等<sup>[4]</sup> 发现可以从染料转化偶极矩的有序度中得到发射效率. Petriashvilil 等<sup>[5]</sup> 在两层胆甾相液晶层中间夹染料与甘油混合物, 进行了激光器研究. Lin 等<sup>[6]</sup> 研究了含有光致异构材料的可光擦除和光写入的胆甾相液晶可调谐激光器的发射特性.

研究者多是利用胆甾相液晶的一维光子晶体特性, 在胆甾相液晶中掺入激光染料, 进行激光发射及调谐特性研究. 在调谐时胆甾相液晶的液晶折射率差值将变小, 导致禁带宽度变小和截止深度不

够, 影响激光发射. 针对这个问题, 本文采用染料掺杂向列相液晶与一维多层介质膜组合, 在发射激光调谐时不仅不会发生禁带宽度和截止深度的变化, 同时具有禁带宽度宽和截止深度低的特点. Ozaki 等<sup>[7]</sup> 对此结构激光发射的电调谐特性进行了研究, 且进一步研究了具有聚合物荧光发射层的向列相液晶激光器的电调谐特性<sup>[8]</sup>, 国内未见此方面的研究报道. 本文着重研究染料掺杂向列相液晶作为一维光子晶体缺陷层的可调谐激光器结构, 以很好地实现温度和电场调谐特性.

## 2 实验

## 2.1 激光器样品制备

激光器样品的基板选用厚度为 1.1 mm 的镀有氧化铟锡 (ITO) 导电薄膜的玻璃, 在基板的 ITO 侧交替镀制 8 对 SiO<sub>2</sub> 和 TiO<sub>2</sub> 多层膜. 其中 SiO<sub>2</sub> 的折射率  $n_1 = 1.46$ , 厚度  $d_1 = 111$  nm, TiO<sub>2</sub> 的折射率  $n_2 = 2.35$ , 厚度  $d_2 = 69$  nm, 两层介质的光学厚度相等, 即  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_0 / 4$ ,  $\lambda_0$  为中心波长, 取  $\lambda_0 = 650$  nm. 在基板的多层膜侧均匀旋涂上聚酰亚胺 (PI) 取向膜, 进行摩擦取向处理后, 将两基

\* 国家自然科学基金 (批准号: 61107059)、高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 200802171034) 和黑龙江省博士后基金 (批准号: LBH-Z10216) 资助的课题.

† E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn

板的摩擦方向呈反平行排列制作出样品空盒,利用隔垫物对液晶层厚进行控制.

选用石家庄永生华清液晶有限公司提供的型号为TEB30A的向列相液晶,常温下波长在589.3 nm处的寻常光折射率 $n_o = 1.522$ ,非寻常光折射率 $n_e = 1.692$ ,清亮点温度为61.2 °C.激光染料选用美国Exciton公司提供的4-二氰基亚甲基-2-甲基-6-(4-二甲基氨基苯乙烯基)-4H-吡喃(DCM)型染料.将液晶与激光染料按重量比100:1混合后进行充分搅拌,均匀后注入制作的样品空盒中,形成激光器实验样品.

## 2.2 激光抽运实验

激光抽运实验光路示意图如图1所示.抽运光选用波长为532 nm的脉冲激光,为避免DCM染料的三重态淬灭效应,激光脉冲宽度仅为8 ns,采用北京镭宝光电公司提供的Dawa-100 Nd:YAG倍频脉冲激光器,重复频率为10 Hz,抽运激光经衰减片后被会聚透镜聚焦到实验样品上.实验中为了便于光谱仪光纤探头接收到发射光而不被抽运光影响,样品表面法线与抽运光呈约15°角,光斑面积约为2 mm<sup>2</sup>.被光纤探头接收的发射光谱从光谱仪中导入计算机进行处理.

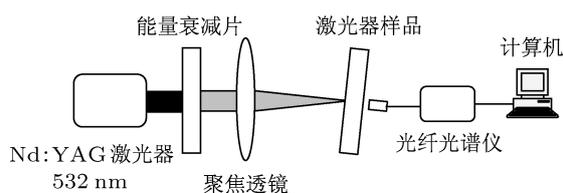


图1 激光抽运实验光路示意图

实验中缓慢增加抽运激光功率,激光器样品中的激光染料在抽运光的照射下发射荧光光谱,当抽运激光功率超过每脉冲12.3 μJ时,在垂直样品表面产生激光.激光器样品中的液晶在受到温度或电场的控制时,液晶的有效折射率发生相应的变化,导致激光器谐振腔的腔长变化,出现发射激光的波长移动.

## 2.3 材料的吸收谱、荧光发射谱及激光发射谱

将向列相液晶与染料DCM的重量比为100:1的混合物,注入到没有镀多层膜的玻璃基板空盒中,使用日本SHIMADZU公司生产的UV-3101型紫外-可见-近红外分光光度计和日本HITACHI

公司生产的F-4500型荧光分光光度计分别对样品的吸收特性和荧光发射特性进行了测量,测量结果如图2所示,为了便于在同一坐标系下表示,荧光发射谱强度放大10倍.同时制作了液晶层厚度为4 μm的镀有多层膜的液晶盒,采用图1的抽运光路,对其进行激光发射的研究,结果也如图2所示.可以看出,在628.3 nm处有一发射光,线宽为1 nm.

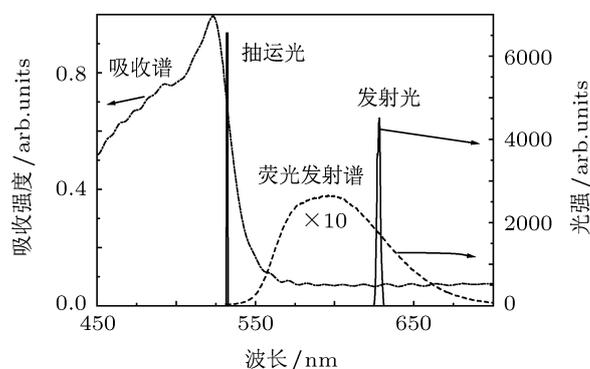


图2 材料的吸收谱、荧光发射谱及器件的发射谱

从图2的吸收谱可以看出,所用染料对532 nm抽运光吸收较强,接近80%,光利用率比较高,因此选择此波长抽运较为理想.吸收曲线在波长增加时衰减得很快,波长增加到560 nm时吸收减小到峰值的10%,说明长波长吸收较少.从图2的荧光发射谱可以看出,荧光发射光谱的范围为550—675 nm(按荧光发射峰的10%截取),宽度达120 nm,说明此染料比较适合用于宽调谐范围.

## 3 实验结果与分析

### 3.1 激光器的温度调谐特性

制作了盒厚为4 μm的染料激光器样品,利用温控装置对样品进行温度控制,研究了发射光随温度的变化,如图3所示.从图3(a)可以看出,在25.5 °C下,发射峰出现在625 nm附近,随着温度的升高,发射峰波长连续向短波方向移动,这是因为温度升高,液晶的有效折射率减小,从而引起了谐振腔光程减小.达到28.5 °C后增加了新的长波发射峰,这是因为此时增加了另一级次的发射峰.之后随着温度的进一步升高,两波长同时向短波方向移动,一直到短波长发射波消失,随后重新出现长波发射峰.以上过程随温度的升高重复发生,直到达到液晶的清亮点温度.同时可以看出,不同温度时的发射光强度也不同,这是由增益曲

线决定的. 图 3(b) 为不同温度下的发射波长与线宽, 从图中可以看出, 在每次出现长波发射峰之前, 发射波长随温度近似呈线性变化, 并且调谐范围为 605.5—639.8 nm, 达到 34.3 nm, 发射峰的线宽均低于 1 nm.

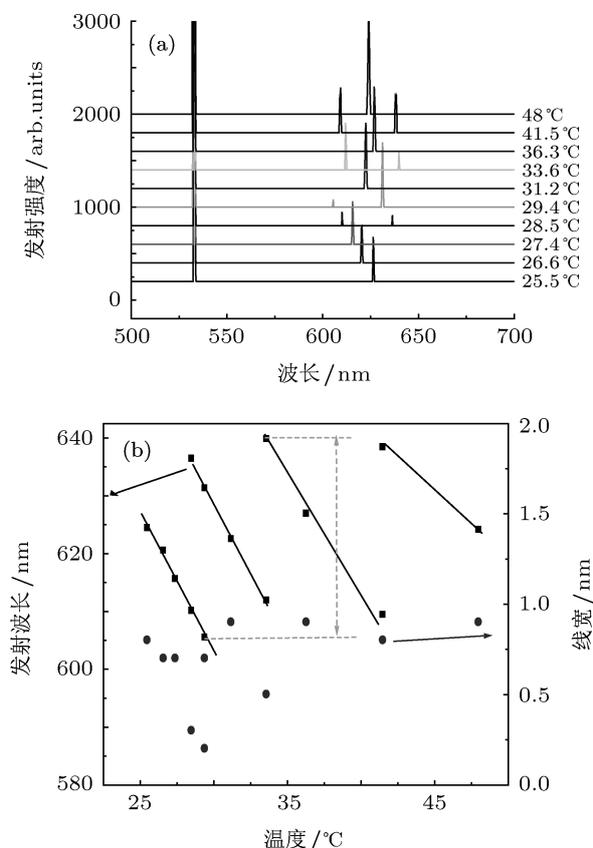


图 3 不同温度时的发射光 (a) 发射光光强; (b) 发射光的波长与线宽

### 3.2 激光器的电调谐特性

同样制作了液晶层厚度为 4 μm 的染料激光器样品, 对样品的电调谐特性进行了测量, 实验结果如图 4 所示, 其中内插图图为发射波长随电压的变化. 由图 4 可以看出, 随着电压的增加, 发射波长向短波方向移动, 在电压调谐范围 0—2.86 V 内, 波长调谐范围为 634.5—619.5 nm, 宽度达到 15 nm.

本文中反平行排列的液晶介质的激光器发射波长可以由分布式反馈激光器发射波长公式得到:

$$\lambda_k = \frac{2n_{\text{eff}}(\theta)L}{k}, \quad (1)$$

$$n_{\text{eff}}(\theta) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2(\theta) + n_e^2 \sin^2(\theta))^{1/2}}, \quad (2)$$

其中  $k$  为正整数, 对于不同的  $k$  值形成不同的激光纵膜,  $n_{\text{eff}}(\theta)$  为液晶的有效折射率,  $n_o$  和  $n_e$  均是温

度与电压的函数关系式.  $\theta$  为液晶分子与玻璃基板的夹角,  $L$  为激光器谐振腔腔长, 相当于液晶层的厚度. 由于激光染料掺杂的比例较小, 此处忽略了激光染料对液晶材料折射率的影响.

根据 (1) 式进一步有

$$\frac{1}{\lambda_{k+1}} - \frac{1}{\lambda_k} = \frac{1}{2n_{\text{eff}}L}, \quad (3)$$

其中  $\lambda_{k+1}$ ,  $\lambda_k$  为  $k+1$  与  $k$  级发射波长, 在温度和电压调谐的过程中, 如果发射峰满足 (3) 式且两波长均在增益曲线内, 即可能发生双重模发射, 如图 3(a).

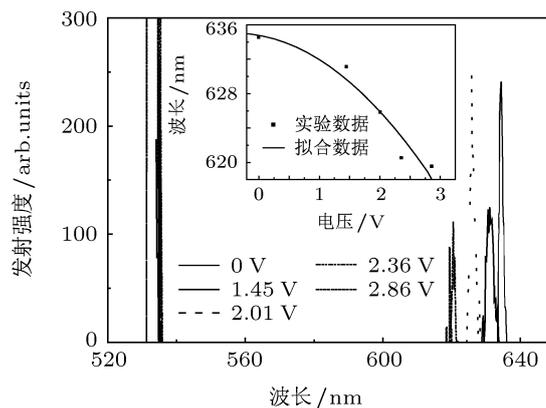


图 4 不同电压下的发射波长与发射强度的关系

### 3.3 激光器的发射阈值

图 5 为实验测得的激光输出脉冲能量与抽运光脉冲能量的关系. 从图 5 可以看出, 发射激光的阈值能量为每脉冲 12.3 μJ, 当抽运光能量超过阈值能量时激光输出脉冲能量随抽运光能量变化急剧增加, 增加到约每脉冲 120 μJ 时, 发射强度达到饱和. 阈值能量比文献 [9] 中报道的胆甾相液晶可调谐激光器的阈值略低.

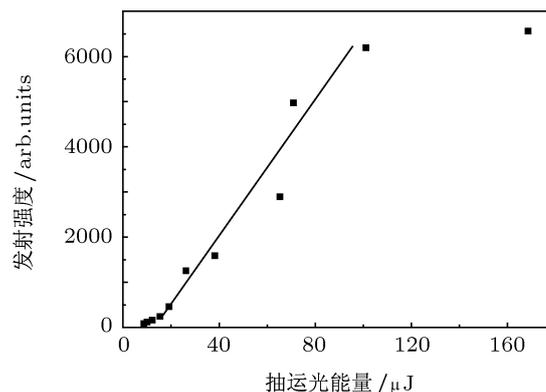


图 5 发射光强度随单脉冲抽运光强的变化

## 4 结论

以 DCM 染料掺杂向列相液晶作为增益介质, 设计了  $\text{SiO}_2$  和  $\text{TiO}_2$  多层膜一维光子晶体结构的可调谐激光器, 利用 532 nm 输出波长的脉冲激光作

为抽运光, 获得的激光每脉冲阈值能量为 12.3  $\mu\text{J}$ , 线宽低于 1 nm. 发射波长随着温度升高向短波方向移动, 在温度变化范围为 25.5—48  $^\circ\text{C}$  时, 发射波长调谐范围为 605.5—639.8 nm, 达到 34.3 nm, 电压在 0—2.86 V 之间变化时, 发射波长调谐范围为 634.5—619.5 nm, 达到 15 nm.

- 
- [1] Alison D F, Stephen M M, Harry J C 2006 *Materialstoday* **9** 36
- [2] Kopp V I, Fan B, Vithana H K M, Genack A Z 1998 *Opt. Lett.* **23** 1707
- [3] Kopp V I, Zhang Z Q, Genack A 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 1753
- [4] Araoka F, Shin K C, Takanishi Y, Ishikawa K, Takezoe H, Zhu Z, Swager T M 2003 *J. Appl. Phys.* **94** 279
- [5] Petriashvili G, Matranga M A, De Santo M P, Chilaya G, Barberi R 2009 *Opt. Express* **17** 4553
- [6] Lin S H, Shyu C Y, Liu J H, Yang P C, Mo T S, Huang S Y, Lee C R 2010 *Opt. Express* **18** 9496
- [7] Ozaki R, Matsui T, Ozaki M, Yoshino K 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3593
- [8] Ozaki R, Matsuhisa Y, Ozaki M, Yoshino K 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 1844
- [9] Jeong M Y, Choi H, Wu J W 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 051108

# Investigation of the tunable laser of one-dimensional photonic crystal with dye-doped nematic liquid crystal defect layer\*

Liu Yong-Jun<sup>1)†</sup> Sun Wei-Min<sup>1)</sup> Liu Xiao-Qi<sup>1)</sup> Yao Li-Shuang<sup>2)</sup>  
Lu Xing-Hai<sup>2)</sup> Xuan Li<sup>2)</sup>

1) (College of Science, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

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

(Received 9 June 2011; revised manuscript received 23 August 2011)

## Abstract

We investigate the optical characteristics of the tunable laser of a one-dimensional photonic crystal (1D PC) containing Dye-doped nematic liquid crystal (NLC). The dielectric multilayer consisting of an alternating stack of SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> layers is used as the 1D PC whose defect layer is filled with the laser dye and NLC. The central wavelength of the stop band of the 1D PC is 650 nm. A second-harmonic light of a Q-switched Nd: YAG laser has a wavelength of 532 nm, and is used for excitation. With the temperature increasing from 25.5 °C to 48 °C, the emission wavelength of the tunable laser is continuously shifted from 605.5 to 639.8 nm, the total wavelength shifts is 34.4 nm. With the external voltage increasing from 0 to 2.86 V, the emission wavelength of the tunable laser is shifted from 634.5 to 619.5 nm, the total wavelength shifts are 15 nm. The lasing threshold was about 12.3 μJ/pulse, and the linewidth of the emission peak was less than 1 nm.

**Keywords:** tunable laser, nematic liquid crystal, dye

**PACS:** 42.70.Df, 42.55.Mv

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61107059), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 200802171034), and the Heilongjiang Postdoctoral Science Foundation of Heilongjiang Province, China (Grant No. LBH-Z10216).

† E-mail: liuyj@hrbeu.edu.cn