

文章编号: 1001-3806(2011)04-0514-04

胆甾相液晶激光器研究进展

张世超, 黄玉华*, 王辉

(浙江师范大学 信息光学研究所, 金华 321004)

摘要: 近年来国外学者对胆甾相液晶激光进行了大量研究, 而国内在这方面研究甚少。介绍了胆甾相液晶周期性螺旋结构及其选择性反射特性, 以及胆甾相液晶激光的工作原理, 总结了胆甾相液晶激光的发展现状及其潜在的应用前景, 以为国内液晶研究的同行提供一点参考。

关键词: 激光器; 胆甾相液晶; 液晶激光器; 光子带隙

中图分类号: O43; TN248 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2011.04.018

Research progress of cholesteric liquid crystal based lasers

ZHANG Shi-chao, HUANG Yu-hua, WANG Hui

(Institute of Information Optics, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract: Cholesteric liquid crystal lasers have been extensively studied but barely studied in our country. The periodic helical structure and selective reflection property of cholesteric liquid crystal were introduced. The principle and research progress of cholesteric liquid crystal based lasers and its potential applications were reviewed to provide some reference for the specialists in our country.

Key words: lasers; cholesteric liquid crystal; liquid crystal laser; photonic band gap

引言

光子晶体是一种介电常数呈周期性变化的介电质, 会形成光子禁带和导带, 光子在导带里可以顺利传播, 在光子禁带内则会被禁止。这一特点使得光子晶体可以应用于很多领域, 尤其在集成光学具有巨大的应用前景, 因此引起了广泛的研究兴趣。但是, 光子晶体的制作过程复杂, 对技术要求苛刻。胆甾相液晶(cholesteric liquid crystal, CLC)是一种自组装的1维光子晶体, 与一般意义上的光子晶体相比, 胆甾相液晶的制备非常简单, 因此近年来备受关注。近年来, 国外有大批科学工作者对胆甾相液晶进行了大量研究, 尤其在胆甾相液晶激光进行了大量的研究^[1-3]。

本文中首先介绍了胆甾相液晶周期性螺旋结构及其选择性反射特性, 然后介绍了激光染料在胆甾相液晶激光中的作用及胆甾相液晶激光器的工作原理, 最后介绍了胆甾相液晶激光的发展现状及其潜在的应用前景。希望能为国内液晶界同行提供一些参考。

1 胆固醇液晶的周期性螺旋结构及其选择性反射特性

胆固醇液晶可由手性液晶分子获得, 也可通过在向列相液晶中掺杂一定量的手性剂, 使得向列型液晶各层分子的长轴方向渐次相差一个角度旋转而成螺旋状, 如图1所示。

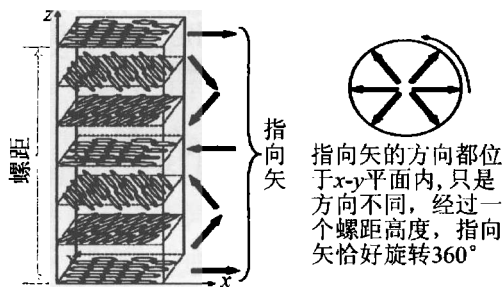


图1 胆甾相液晶分子的排列特点

由于液晶分子具有各向异性, 即对不同偏振方向的光的折射率不一样, 胆固醇液晶中的液晶分子随螺旋轴旋转分布, 使得它对同一偏振方向光的折射率呈周期性分布, 从而使得胆固醇液晶相当于1维光子晶体, 形成能提供分布式反馈的光子反射带, 其反射带的中心波长和带宽分别由以下两式决定:

$$\lambda = \langle n \rangle \cdot p \quad (1)$$

$$\Delta\lambda = \Delta n \cdot p \quad (2)$$

式中, $\langle n \rangle$ 是平均折射率, Δn 是 e 光和 o 光折射率之

作者简介: 张世超(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事液晶光学特性及器件的研究。

* 通讯联系人。E-mail: hyh@zjnu.cn

收稿日期: 2010-09-25; 收到修改稿日期: 2010-11-17

差, p 为胆甾相液晶的螺距, 由手性添加剂的螺旋扭曲力常数 γ_{HTP} (helical twisting power, HTP) 及其浓度 C 决定, 见下式:

$$p = (\gamma_{HTP} \cdot C)^{-1} \quad (3)$$

由于 $\Delta\lambda = \Delta n \cdot p$ 和 $\lambda = \langle n \rangle \cdot p$, 而 p 由手性分子的比例决定, 并且 Δn 和 n 都很容易被光、电、热等外界因素而改变, 因此, 胆甾相液晶反射带的带宽和中心波长可以很容易地通过改变手性分子的比例, 以及外加适当的光、电、热等因素改变。

与普通光子晶体不一样, 胆固醇液晶所提供的布拉格反射具有独特的特点, 那就是它对圆偏振光的选择性反射, 即入射的自然光经胆固醇液晶以后, 在胆固醇液晶反射带内且与胆固醇液晶旋光方向相同的圆偏振光会被反射, 与胆固醇液晶旋光方向相反的圆偏振光则会不受阻碍的透射。例如, 当非偏振光入射到一个右旋胆固醇液晶时, 只有右旋偏振会被反射, 左旋圆偏振光不受影响地透过, 如图 2 所示。

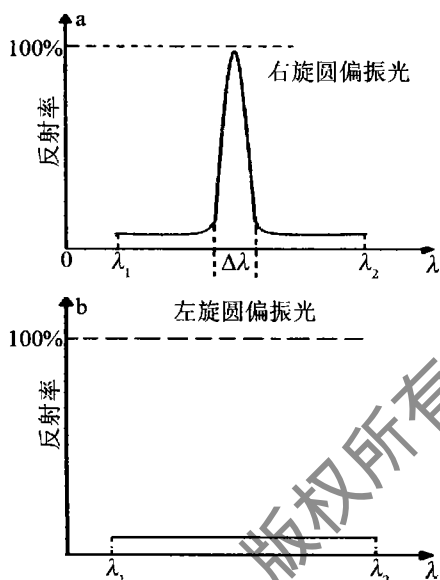


图2 圆偏振光的选择性反射

2 胆固醇液晶激光的分布式反馈工作原理

在胆固醇液晶中, 由于分子偶极矩的作用, 使得掺杂于其中的激光染料分子也跟着胆固醇液晶的液晶分子成螺旋结构分布, 如图 3 所示。对于单个激光染料分子来说, 只有光的偏振方向与其分子长轴方向平行

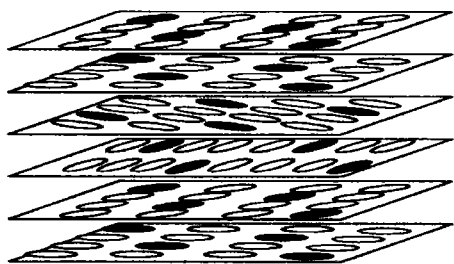


图3 掺杂于胆固醇液晶中的染料分子(黑色)的分布图

时, 其吸收率是最大的, 否则, 其吸收率与入射的偏振方向在其长轴方向的投影成正比。但是从宏观上来看, 由于掺杂于胆固醇液晶中的激光染料分子均匀地分布于各个方向, 其结果是导致染料分子对光的吸收作用相当于一个各向同性介质, 即激光染料分子对光的吸收与入射光的偏振状态无关, 并且光致激发的荧光是非偏振的。但是由于胆固醇液晶具有圆偏振光的选择性反射, 那些在胆固醇发射带外的光则会顺利透过, 那些落在胆固醇液晶反射带内并且与胆固醇液晶旋转方向一致的荧光, 会在胆固醇液晶内部发生多次反射并被束缚于其中, 在胆固醇反射带的边缘, 其反射率发生突变, 它既能为激发光提供足够的反馈并最终得到足够的放大, 又能让部分光透过而不是完全将光束束缚于其中, 当激发光得到足够增益放大后, 便会产生激光并从胆固醇液晶的边缘输出。因此, 在足够强激光的激励下, 会在掺有激光染料的胆固醇液晶反射带的边缘产生激光。与传统激光不同的是, 胆固醇液晶激光不需要反射镜来提供反馈, 而是由胆固醇液晶自身提供分布式反馈。

3 胆固醇液晶激光的理论基础

在胆甾相液晶中, 传播的光是由其空间中的介电张量来控制的, 设平行和垂直电场指向矢 \vec{k} 的介电张量的本征值分别为: $\epsilon_{//}$ 和 ϵ_{\perp} , 则有:

$$\langle \epsilon \rangle = \frac{1}{2\epsilon_0} (\epsilon_{//} + \epsilon_{\perp}) \quad (4)$$

$$\Delta\epsilon = \frac{1}{2\epsilon_0} (\epsilon_{//} - \epsilon_{\perp}) \quad (5)$$

求解胆甾相液晶结构中的麦克斯韦方程, 可得一个本征值的久期方程:

$$n^2 = \langle \epsilon \rangle + \alpha^2 \pm (\Delta\epsilon^2 + 4\langle \epsilon \rangle \cdot \alpha^2)^{1/2} \quad (6)$$

式中, $\alpha = \lambda_0/p$, 取胆甾相液晶的螺旋轴方向为 z 轴, 即光传播方向, 则光学本征模为:

$$E = E_0 \left\{ (\vec{x} + i\vec{y}) \exp\{i[(2\pi/\lambda_0)n - (2\pi/p)] \times z - \omega t\} + \frac{\Delta\epsilon}{(n+2)^2 - \langle \epsilon \rangle} (\vec{x} - i\vec{y}) \times \exp\{i[(2\pi/\lambda_0)n + (2\pi/p)]z - \omega t\} \right\} \quad (7)$$

\vec{x} 和 \vec{y} 为胆甾相液晶的指向矢所在平面 $x-y$ 平面的单位矢量, ω 为光频率。

由(6)式得 n^2 有两枝解: n^+ 和 n^- ; 如图 4 所示。对于 n^- , 当 $\sqrt{\epsilon_{//}} < \alpha < \sqrt{\epsilon_{\perp}}$ 时, n 为虚数, 即有光子带隙的存在。在带隙的长波长区, $\lambda_0 = p\sqrt{\epsilon_{//}}$; 在带隙的短波长区, $\lambda_0 = p\sqrt{\epsilon_{\perp}}$ 。在光子带隙外部以不同速度传

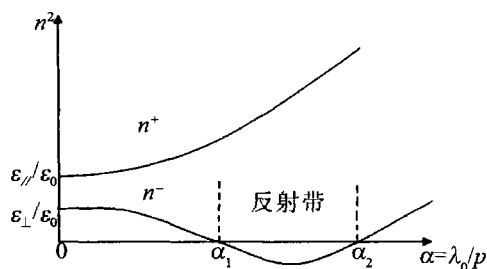


图4 本征值 n^2 和波长/螺距的关系^[4]

播的左旋和右旋偏振光的叠加模；在带隙内部是反向传播的圆偏振光的消逝波；在带隙处， $n=0$ ，模是驻波，在长波长区， E 平行于指向矢；在短波长区， E 垂直于指向矢。

当样品的尺寸可以不予考虑时，则起激射作用的光子的态密度为：

$$\rho(\varepsilon) = \frac{dk}{d\omega} = \frac{d}{d\omega} \left(\frac{2\pi n}{\lambda_0} \right) = \frac{n}{c} - \frac{\lambda_0}{2nc} \frac{dn^2}{d\lambda_0} \quad (8)$$

式中， n^2 是 λ_0 的函数，其函数关系如图4所示^[4]，从图4可以看出，在 n 趋近于0时，在带隙处，态密度随 $1/n$ 发散增长，即在胆甾相液晶的带隙边缘部分光子的态密度和自发辐射都得到增强，因此，受激原子和分子的光子发射及分布反馈腔激射都发生在带隙处。图5是参考文献[5]中所报道的实验结果，正如理论基础所预见的，激光发生在反射带的带边。

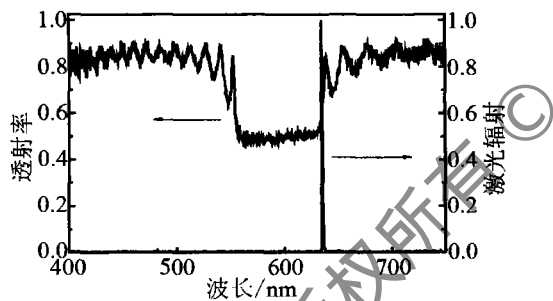


图5 样品的透射谱和激光辐射线

4 胆甾相液晶激光的发展现状

早在1998年，科学家便报道了利用胆固醇液晶实现无镜激射^[6]，时至今日，已有十余年了，人们采用不同方法对胆甾相液晶及其聚合物激光器进行了广泛研究。归纳起来，这些研究主要集中在3个方面：(1)研究胆甾相液晶及其聚合物激光的物理机制；(2)提高激光效率；(3)研制可调激光。比如说 KURIHARA, KANG 等人通过研究激光染料和偶氮染料掺杂于胆甾相液晶在激光照射下的光学特性，发现了随光照强度变化而连续可调的激光^[7-9]。YU, LIN 等人通过研究胆甾相液晶及其聚合物激光的电光特性，得到了电调激光波长^[10-11]。JEONG 等人报道了空间分布的可调胆甾相激光^[12]。为了提高激光效率，人们采用了各种

不同方法，比如利用反射镜或用胆甾相液晶作为反射镜放在胆甾相液晶的一边或两边，或采用缺陷模式以及多层膜反射等方法来提高激光效率^[13-19]。值得指出的是，美国佛罗里达大学 WU 等人对胆甾相液晶及其聚合物激光的物理机制、激光效率和可调激光等方面进行了大量研究^[13-15, 20-23]：分别研究了激光输入角度和激光染料对胆甾相液晶激光效率的影响^[22]；温度对胆甾相液晶及其聚合物反射带和激光波长的影响，并利用胆甾相液晶的热效应研制了温度可调和空间可调的胆甾相液晶及其聚合物的激光^[21-23]；同时也利用反射镜和胆甾相液晶作为反射镜，缺陷模式和多层模式等方法来提高激光效率^[13-15]。近年来国内也有研究组对胆甾相液晶激光进行研究，如天津工业大学 HE 等人报道了胆甾相液晶中自由激光^[19]。但国内对这方面的研究还不多。

到目前为止，基于胆甾相液晶的分布式反馈微型激光尚处在研究阶段。由于目前所使用的激光发光材料是激光染料，胆甾相液晶激光还存在很多问题，如激光的发光效率不高（到目前为止，激光效率只有20%左右），激光稳定性差，尤其由于激光染料在光的照射下会漂白，使得激光寿命较短等，这些问题都有待解决。

5 胆固醇液晶激光的应用前景

由于胆固醇液晶及其聚合物激光体积小、阈值低、制作简单，因此，它在光学领域中具有广泛的应用前景。例如，可以用胆固醇液晶制作柔性、可调谐的激光器^[4]等；用它制作的可调激光可以作为光转换器广泛地应用于光纤通讯中；由于其体积小，厚度只有几个微米量级，可以广泛地应用在生物医学上诊断疾病；通过制作随空间分布的红绿蓝三原色激光，还可以用于激光显示。英国剑桥大学电子工程系的学者就提出胆甾相液晶在激光显示的应用，并展示了胆甾相液晶制作的激光显示模型。由于液晶对于激励的灵敏性，胆甾相激光在作为电场、磁场、温度及机械应力等的频率解码传感器方面^[4]也会有潜在应用价值。

参 考 文 献

- [1] MUÑOZ A F, PALFFY-MUHORAY P, TAHERI B. Ultraviolet lasing in cholesteric liquid crystals [J]. *Optics Letters*, 2001, 26 (11): 804-806.
- [2] SHIROTA K, SUN H B, KAWATA S. Two-photon lasing of dye-doped photonic crystal lasers [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 84 (10): 1632-1634.
- [3] CHANISHVILI A, CHILAYA G, PETRIASHVILI G, et al. Laser emission from a dye-doped cholesteric liquid crystal pumped by another cholesteric liquid crystal laser [J]. *Applied Physics Letters*, 2004, 85 (16): 3378-3380.

- [4] PALFFY-MUHORAY P, CAO W Y, MOREIRA M, *et al.* Photonics and lasing in liquid crystal materials[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2006, A364(1847):2747-2761.
- [5] HUANG Y H, ZHOU Y, WU Sh T. Lasing in dye-doped photonic liquid crystal devices [J]. *Molecular Crystals & Liquid Crystals*, 2006, 453:251-262.
- [6] KOPP V I, FAN B, VITHANA H K M. *et al.* Low-threshold lasing at the edge of a photonic stop band in cholesteric liquid crystals[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(21):1707-1709.
- [7] KURIHARA S, HATAE Y, YOSHIOKA T, *et al.* Photo-tuning of lasing from a dye-doped cholesteric liquid crystals by photoisomerization of a sugar derivative having plural azo-benzene groups[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(10):103121/1-103121/3.
- [8] KANG B Y, CHOI H H, JEONG M Y, *et al.* Effective medium analysis for optical control of laser tuning in a mixture of azo-nematics and cholesteric liquid crystal[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2010, B27(2):204-207.
- [9] SHIBAEV P V, SANFORD R L, CHIAPPETTA D, *et al.* Light controllable tuning and switching of lasing in chiral liquid crystals[J]. *Optics Express*, 2005, 13(7):2358-2363.
- [10] YU H P, TANG B Y, LI J H, *et al.* Electrically tunable lasers made from electro-optically active photonic band gap materials[J]. *Optics Express*, 2005, 13(18):7243-7249.
- [11] LIN T H, JAU H Ch, CHEN Ch H, *et al.* Electrically controllable laser based on cholesteric liquid crystal with negative dielectric anisotropy[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(6):061122/1-061122/3.
- [12] JEONG M Y, CHOI H H, WU J W. Spatial tuning of laser emission in a dye-doped cholesteric liquid crystal wedge cell[J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 92(5):051108/1-051108/3.
- [13] ZHOU Y, HUANG Y, RAPAPORT A, *et al.* Doubling the optical efficiency of a chiral liquid crystal laser using a reflector[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(23):231107/1-231107/3.
- [14] ZHOU Y, HUANG Y H, WU Sh T. Enhancing cholesteric liquid crystal laser performance using a cholesteric reflector[J]. *Optics Express*, 2006, 14(9):3906-3916.
- [15] MATSUHISA Y, OZAKI R, YOSHINO K, *et al.* High *Q* defect mode and laser action in one-dimensional hybrid photonic crystal containing cholesteric liquid crystal [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(10):101109/1-101109/3.
- [16] YOSHIDA H, LEE C H, MIURA Y, *et al.* Optical tuning and switching of photonic defect modes in cholesteric liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(7):071107/1-071107/3.
- [17] JEONG S M, HA N Y, TAKANISHI Y, *et al.* Defect mode lasing from a double-layered dye-doped polymeric cholesteric liquid crystal films with a thin rubbed defect layer[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 90(26):261108/1-261108/3.
- [18] DOLGALEVA K, WEI S K H, LUKISHOVA S G, *et al.* Enhanced laser performance of cholesteric liquid crystals doped with oligofluorene dye[J]. *The Journal of the Optical Society of America*, 2008, B25(9):1496-1504.
- [19] HE B Q, LIAO Q, HUANG Y. Random lasing in a dye doped cholesteric liquid crystal polymer solution[J]. *Optical Materials*, 2008, 31(2):375-379.
- [20] HUANG Y, ZHOU Y, HONG Q, *et al.* Incident angle and polarization effects on the dye-doped cholesteric liquid crystal laser[J]. *Optics Communications*, 2006, 261(1):91-96.
- [21] HUANG Y H, LIN T H, ZHOU Y, *et al.* Enhancing the laser power by stacking multiple dye-doped chiral polymer films[J]. *Optics Express*, 2006, 14(23):11299-11303.
- [22] HUANG Y H, ZHOU Y, DOYLE Ch, *et al.* Tuning the photonic band gap in cholesteric liquid crystals by temperature-dependent dopant solubility[J]. *Optics Express*, 2006, 14(3):1236-1242.
- [23] HUANG Y H, ZHOU Y, WU Sh T. Spatially tunable laser emission in dye-doped photonic liquid crystals[J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(1):011107/1-011107/3.

(上接第513页)

参考文献

- [1] CAO T F, JIANG Y Ch. Combining ANSYS and MATLAB to solve the problems of optimum design for reinforced concrete frames[J]. *Sichuan Building Science*, 2009, 35(3):36-38(in Chinese).
- [2] ZHOU Ch J, TANG M. Textbook case of Visual Basic programming [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007:30-78(in Chinese).
- [3] YE X L, SHI Y J. Application ANSYS engineering analysis software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:5-20(in Chinese).
- [4] LI M, ZHANG L M. Optimal design of plane frame based on ANSYS [J]. *Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition)*, 2009, 37(5):146-148(in Chinese).
- [5] QIU D R, DONG H Y, LIU J. Program of optimal design for portal frame based on APDL [J]. *Steel Construction*, 2008, 23(1):69-71(in Chinese).
- [6] ZHANG X Y, XIONG J, HAO X, *et al.* Finite element analyses and structure optimal design of the column of a horizontal processing center [J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2008, 27(12):1602-1605(in Chinese).
- [7] ZHANG R, CHEN Zh Y, YANG Sh M. Optimize and redesign the primary mirror supporting system of space solar telescope[J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1):23-26(in Chinese).
- [8] ZHAO D B, FAN J, LI G Zh. Topology optimization design of bicycle frame based on ANSYS[J]. *Journal of Engineering Design*, 2009, 16(5):391-394(in Chinese).
- [9] ZHANG Sh, WU F Q. The optimum design of ultraviolet polarizing prism of iceland and barium fluoride[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3):285-287(in Chinese).
- [10] LI G L, SONG L K, HAO D Zh, *et al.* Optimal design of rhomb-type achromatism retarder[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(5):539-540(in Chinese).
- [11] OU P, YAN P, GONG M L, *et al.* Optimum design of three-position-pumped high-power double-clad fiber lasers[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(1):57-60(in Chinese).
- [12] SHI G, LIAO Y, WANG Y X, *et al.* The optimal analysis of Siegman rate equations of passively *Q*-switched microchip laser[J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6):636-638(in Chinese).
- [13] CAO X G, ZHOU J Zh, YUAN G D, *et al.* Orthogonal optimum design of laser peen forming based on finite element simulation[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(6):656-658(in Chinese).