

文章编号: 1001-3806(2007)04-0406-02

带宽可调型光学滤波器的研究

张大勇, 刘仓理, 李剑峰, 罗 飞, 骆永全, 刘海涛
(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究带宽可调型光学滤波器, 采用对手性液晶膜施加电压的方法, 对手性液晶布喇格反射带宽随外加电场的变化规律进行了分析和测量。实验结果表明, 在外加电场到达一定的阈值后, 液晶分子要旋转一定的角度; 在外加电场和液晶盒边界条件的共同限制下, 手性液晶的螺距在螺旋轴方向上形成了梯度变化, 造成了手型液晶布喇格反射带宽的加宽, 且反射带宽随外加电压的增加而增加, 以此可制成带宽可调型光学滤光片。

关键词: 激光光学; 光学滤波器; 手性液晶; 布喇格反射; 带宽

中图分类号: O753⁺. 2; TN713⁺. 1 **文献标识码:** A

Research of adjustable-bandwidth optical filter

ZHANG Da-yong, LIU Cang-li, LI Jian-feng, LUO Fei, LUO Yong-quan, LIU Hai-tao
(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: In order to study adjustable-bandwidth optical filters, the variation of Bragg reflection bandwidth induced by electric field in cholesteric liquid crystal (CLC) was measured and analyzed. Experimental results showed that field-induced reorientation might happen when the applied electric field reached a threshold value. The pitch of CLC became gradient along the axis under the combine restriction of applied electric field and boundary condition of liquid crystal cell and the bandwidth was broadened with the input voltage, based which adjustable optical filter can be manufactured.

Key words: laser optics; optical filter; cholesteric liquid crystals; Bragg reflection; bandwidth

引 言

手性液晶具有独特的空间螺旋式结构, 当入射光线波长同手性液晶螺距基本相等时, 手性液晶要对入射光产生 Bragg 反射现象, 其反射中心波长 λ_{\max} 表示为^[1~3]: $\lambda_{\max} = n \cdot p$, 其中, $n = (n_e + n_o) / 2$, n_e 表示液晶异常光折射率, n_o 表示液晶寻常光折射率, p 表示手性液晶的螺距, 其反射带宽 $\Delta\lambda$ 满足: $\Delta\lambda = \Delta n \cdot p$, 其中, $\Delta n = n_e - n_o$, 利用手性液晶的这种 Bragg 反射性质可以制成反射式液晶滤光片^[4~6]。由于液晶滤光片的带宽主要取决于液晶材料的双折射率 Δn , 而一般液晶材料的最大双折射 Δn 大约为 0.3, 在可见区带宽的上限为 100nm。为了提高手性液晶选择性反射的带宽, 必须要引入一个螺距梯度, 该螺距是按一定要求变化^[7~9]。

目前在增加手性液晶反射带宽的研究中, 大部分都是研究固定式的增加手性液晶反射带宽, 对于可控

制带宽的研究方法并不多。作者以具有一定预倾角的手性液晶为研究对象, 讨论了在外加电场作用下, 手性液晶 Bragg 反射带宽的变化规律。以此制作的带宽可调型反射式滤光片, 在光电探测系统的激光防护和激光精密元器件上具有一定的应用价值。

1 理论分析

液晶介电常数各向异性 $\Delta\epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ 的数值随液晶材料的不同而有正有负, 其中 ϵ_{\parallel} 和 ϵ_{\perp} 分别表示平行方向和垂直方向的介电常数^[10]。对于负性液晶来说, $\epsilon_{\parallel} < \epsilon_{\perp}$, 在外电场 E 作用下, 它的分子将趋向于与 E 相垂直排列。以具有一定预倾角 θ_0 , $\Delta\epsilon < 0$ 的沿面排列手性液晶结构为例, 其液晶分子坐标示意图如图 1 所示。

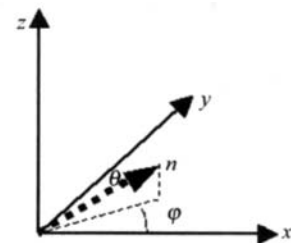


Fig 1 The director coordinate system

液晶分子指向矢同 z 轴的夹角为 $\pi/2 - \theta_0$, 液晶分子指向矢在 x - y 平面上的投影同 x 轴的夹角为 ϕ 。

基金项目: 中国工程物理研究院科学基金资助项目 (20040427)

作者简介: 张大勇 (1975-), 男, 助理研究员, 现从事液晶激光元器件研究。

E-mail: zdywx1874@sohu.com

收稿日期: 2006-04-13; 收到修改稿日期: 2006-08-07

在没有外加电场作用时,手性液晶指向矢的坐标方程如右所示:

$$\vec{n} = [\cos\phi \cos\theta_0, \sin\phi \cos\theta_0, \sin\theta_0] \quad (1)$$

如果施加电场的方向是沿着 z 轴的方向,外加电场可以表示为:

$$E_x = 0, E_y = 0, E_z = E \quad (2)$$

施加电场后,假设液晶指向矢分子向电场垂直方向旋转了一个角度 θ ,变化后的液晶指向矢坐标方程表示为:

$$\vec{n} = [\cos\phi \cos(\theta_0 - \theta), \sin\phi \cos(\theta_0 - \theta), \sin(\theta_0 - \theta)] \quad (3)$$

在外加电场作用下,手性液晶的自由能密度表示为下面两式^[1]:

$$f = \frac{1}{2} \left[k_{11} (\nabla \cdot n)^2 + k_{22} \left(n \cdot \nabla \times n - \frac{k_2}{k_{22}} \right)^2 + k_{33} (n \times \nabla \times n)^2 - \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon (n \cdot E)^2 \right] \quad (4)$$

$$k_2 = - \frac{2\pi}{p_0} (k_{22} \cos^2 \theta_0 + k_{33} \sin^2 \theta_0) \quad (5)$$

式中, k_{11} 表示展曲弹性常数, k_{22} 表示扭曲弹性常数, k_{33} 表示弯曲弹性常数, $\Delta \epsilon = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$, p_0 表示预倾角为 θ_0 时的初始螺距。把坐标方程组代入手性液晶的自由能密度公式可以得到与之相对应的欧拉-拉格朗日方程组,求解该欧拉-拉格朗日方程组可以得到:

$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{2\pi (k_{22} \cos^2 \theta_0 + k_{33} \sin^2 \theta_0)}{p_0 [k_{22} \cos^2(\theta_0 - \theta) + k_{33} \sin^2(\theta_0 - \theta)]} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & [k_{11} \cos^2(\theta_0 - \theta) + k_{33} \sin^2(\theta_0 - \theta)] \frac{d^2\theta}{dz^2} + \\ & \frac{1}{2} \left(\frac{d\theta}{dz} \right)^2 \frac{d}{d\theta} [k_{11} \cos^2(\theta_0 - \theta) + k_{33} \sin^2(\theta_0 - \theta)] - \\ & k_2 \frac{d\phi}{dz} \frac{d}{d\theta} \cos^2(\theta_0 - \theta) - \frac{1}{2} \left(\frac{d\phi}{dz} \right)^2 \frac{d}{d\theta} \left[\cos^2(\theta_0 - \theta) \times \right. \\ & \left. [k_{22} \cos^2(\theta_0 - \theta) + k_{33} \sin^2(\theta_0 - \theta)] \right] + \\ & \frac{1}{2} \epsilon_0 \Delta \epsilon E^2 \sin(\theta_0 - \theta) \cos(\theta_0 - \theta) = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

从 (6) 式和 (7) 式可以知道,在外加电场和边界强锚定条件限制下,手性液晶的旋转角 θ 是一个与电场作用距离和外加电压有关的量。这样,在外加电场和边界条件的共同作用下,手型液晶的正常螺旋结构发生了扭曲变形,螺距在螺旋轴方向上形成了梯度变化,而梯度变化可以造成手性液晶反射带宽的增加^[9]。随着外加电压的增加,螺距变化的趋势在逐渐增强,造成了反射谱段的逐渐加宽。

此外从 (6) 式中还可以看出, ϕ 角的变化不仅跟预倾角 θ_0 有关,还跟 k_{33}/k_{22} 的值有关。而 k_{33}/k_{22} 与手性添加剂的浓度有关,因此,在一定的手性添加剂浓度情况下,较小的预倾角也可以引起一定的梯度变化。

2 实验结果

实验中所用的手性液晶滤光片结构示意图如图 2 所

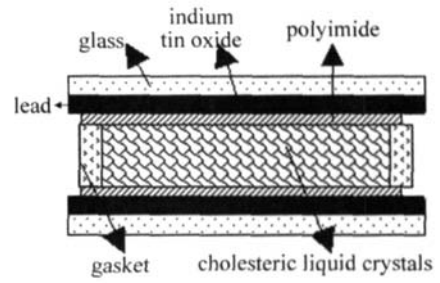


Fig 2 The structure of optical filter

示,整个液晶滤光片采用传统的 sandwich 结构,在氧化铟锡 (indium-tin oxide, ITO) 基板玻璃上均匀涂覆聚酰亚胺 (polyimide, PI) 配向膜,在实验中使用的是水平配向膜 (预倾角 6°)。基板玻璃经固化、摩擦后两片贴合制成液晶盒,利用垫片来控制液晶盒的厚度为 $5\mu\text{m}$ 。手性液晶采用 Merck 公司的负性液晶 MLC6610 ($\Delta \epsilon = -3.1$) 和手型添加剂 S811 的混合物, S811 在 MLC6610 中的质量分数为 0.3。手性液晶混合物经充分搅拌、加热后灌入液晶盒,形成手性液晶滤光片。

整个滤光片测试实验布局如图 3 所示。光源发出

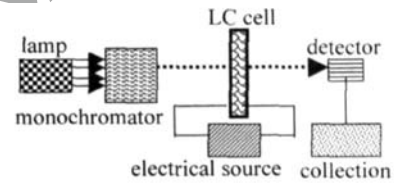


Fig 3 Experiment setup

的光经单色仪后,变成连续可调的准单色光,经过液晶盒的传输后被光电探测器接收。用一个电压可调电源对液晶盒施加电压信号,电源频率为 50Hz。通过信号采集/处理系统测量施加电压前后透射光谱的变化,利用透射光谱来检测、分析 Bragg 反射带宽的变化。测试结果如图 4 所示。

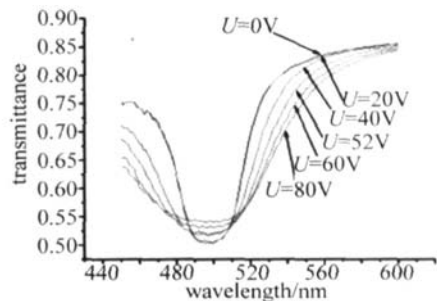


Fig 4 Experiment data

从图 4 的实验结果可以看出,在没有施加电压前,透射光谱呈现手性液晶选择性反射透射光谱特性,中心波长为 500nm,透射带宽约为 30nm。当施加电压小于 20V 时,透射光谱没有发生变化;当外加电压超过 20V 后,透射带宽随外加电压的增加而逐渐变宽。

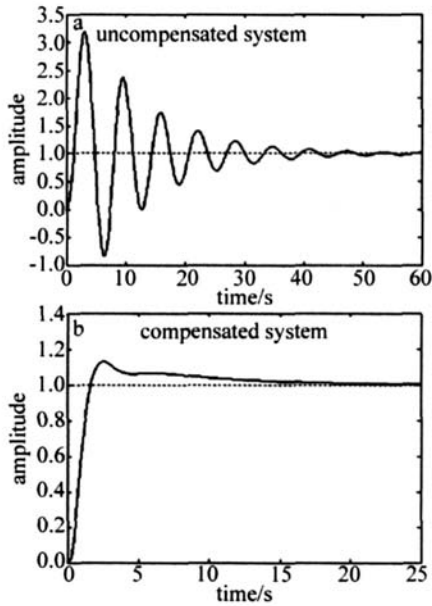


Fig 5 System unit-step input response curve

6 结论

设计了一种高稳定的 LD 温度控制系统。通过对 PD 控制网络的调整,优化了 TEC 模块的响应,并根据给出的系统数学模型,分析了系统的稳态误差和稳定性,最后采用 MATLAB 仿真软件进行仿真比较,结果表明,调整后的控制系统具有很好的稳定性和瞬态特性。

通过适当地选择 TEC 模块的驱动部件和 PD 控制网络等各参数,温度的控制精度可达到 $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$,完全能保证半导体激光器输出特性的稳定。

参考文献

- [1] LU Z J, ZHOU Y Y, HU L L *et al*. Fiber communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2002. 52~80 (in Chinese).
- [2] LAWRENCE A. Johnson controlling temperatures of diode lasers and detectors thermoelectrically [EB/OL]. <http://www.ilxlightwave.com/appnotes>, 2006-01-11.
- [3] HAN X J, LI Z J, ZHU C H. Temperature control of medical laser-diode appliance [J]. Laser Technology, 1998, 22 (4): 250~253 (in Chinese).
- [4] ZHANG N, YU Y, TAN X J *et al*. Theory and application on the constant temperature control of laser diode [J]. Journal of Jilin University (Science Edition), 2002, 40 (3): 284~287 (in Chinese).
- [5] ZENG H L, JIANG P F, XIE F Z. Temperature control of semiconductor laser for interferometry [J]. Laser & Infrared, 2004, 34 (5): 339~346 (in Chinese).
- [6] QU J, LIM D. Numerical simulation on performance of thermoelectric refrigerator elements [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2005, 4 (4): 373~376 (in Chinese).
- [7] ZHONG M, ZHANG Y, SOCKOLOV S. How to design high performance thermoelectric cooler [EB/OL]. <http://www.ednc.com.cn/txt/021105.htm>, 2002-10-30.
- [8] KATSUHIKO O. Modern control engineering [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2000. 215~253 (in Chinese).
- [9] XUE D Y, CHEN Y Q. System emulation and application based on MATLAB/Simulink [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002. 224~228 (in Chinese).

(上接第 407 页)

3 结论

理论分析和实验结果表明:具有一定预倾角 $\Delta\epsilon < 0$ 的手性液晶结构,当沿着螺旋轴方向的外加交变电场达到一定的阈值后,手性液晶螺距沿螺旋轴方向形成了梯度变化,造成了手性液晶布喇格反射带宽随外加电场的增加而加宽,可以制成带宽可调式滤光片。

参考文献

- [1] COLLINGS P J, PATEL J S. Handbook of liquid crystal research [M]. New York: Oxford University Press, 1997. 29~30.
- [2] KHOO I C, WU S T. Optics and nonlinear optics of liquid crystals [M]. Singapore: World Scientific, 1993. 231~232.
- [3] BAHADUR B. Liquid crystals application and uses [M]. Singapore: World Scientific, 1990. 24~26.

- [4] ZHANG D Y, LI J F, LU C L. Study of cholesteric liquid crystals filter [J]. Applied Laser, 2005, 25 (5): 316~318 (in Chinese).
- [5] ZHANG D Y, LI J F, LU C L. Analysis of Bragg reflection of cholesteric liquid crystals using dynamical reflection theory [J]. Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays, 2005, 20 (2): 107~110 (in Chinese).
- [6] LI L, LI J F, FAN B S. Reflective cholesteric liquid crystal polarizers and their applications [J]. Modern Displays, 1998, 18 (4): 29~36 (in Chinese).
- [7] QI H. Optical wave propagation in a cholesteric liquid crystal using the finite element method [J]. Liquid Crystal, 2003, 30 (3): 367~375.
- [8] LI L. Single layer reflective super broadband circular polarizer & method of fabrication therefor [P]. U S Patent: 5691789, 1997-11-25.
- [9] FAN B S. Controllable bandwidth polarizer [P]. U S Patent: 6697133, 2004-02-24.
- [10] WANG W, LI G H. Experimental study of electric-thermo-optic effect of nematic liquid crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28 (3): 275~277 (in Chinese).