

# 液晶可调谐光滤波器的实验研究

申瑞林 宋开 张阳安 李玲 叶培大

(北京邮电大学光通信实验室, 北京 100088)

**摘要** 对液晶可调谐光滤波器进行了实验研究。初步研制出带宽为 0.3~0.5 nm, 精细度为 100~200, 连续可调谐范围大于 70 nm 的液晶 F-P 腔光滤波器。

**关键词** 光滤波器, 向列相液晶, 半高全宽, 精细度

## 1 引言

光滤波器是重要的光无源器件之一, 在光学测量、光传感、光谱分析以及光通信领域中有着十分广泛的应用。光滤波器有很多种类型, 目前较为流行的光滤波器主要有两种, 一是光纤型 F-P 腔光滤波器 (FFP), 它是通过压电陶瓷的伸缩来改变 F-P 腔的几何腔长达到调谐的目的; 二是 SiO<sub>2</sub> 集成的 Mach-Zehnder (M-Z) 波导型光滤波器。另外, 还有光栅型光滤波器, 声光型光滤波器。它们的调谐范围一般可以做得较大, 但带宽很难控制在 0.5 nm 以下。全光纤型 F-P 腔光滤波器和 M-Z 波导型光滤波器制作难度较大, 目前国内尚无成熟的研究报道。液晶调谐 F-P 腔光滤波器 (LCFP) 是近几年来得到重视的一种新型光滤波器<sup>[1~5]</sup>, 它以液晶作为腔内的调谐介质, 利用液晶的双折射性质来改变 F-P 腔的光学腔长, 达到调谐的目的。这种器件易于低电压调谐, 制作工艺相对简单, 并可获得较高的精细度和窄的带宽。我们在成功地研制出准光纤型 F-P 腔光滤波之后, 对液晶调谐 F-P 腔光滤波器进行了实验研究, 该滤波器可望成为实用化的光学滤波器。

## 2 工作原理

液晶调谐 F-P 腔光滤波器的工作原理是基于干涉仪原理和液晶的电控双折射效应。鉴于向列相液晶的分子排列特点和强烈的电控双折射性质, 我们选用了这种液晶。向列相液晶由长径比很大的丝状分子所组成, 如图 1 所示, 分子质心没有长程有序性, 具有类似于液体的流动性, 分子不排列成层, 它能上下、左右、前后滑动, 在分子长轴方向上保持相互平行或近于平行。分子长轴彼此互相平行的自发取向过程使液晶产生高度的双折射性。

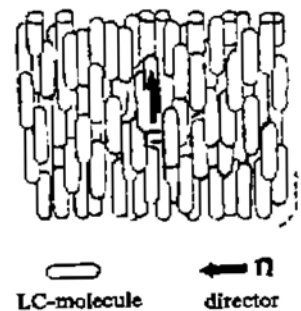


图 1 向列相液晶分子的排列示意图  
Fig. 1 Structure of nematic liquid crystal molecules

无外电场作用时,液晶分子沿 F-P 腔平面排列,其分子长轴沿  $x$  方向(此方向由玻璃片的表面处理来决定,用取向剂摩擦取向),与入射光传播方向垂直,平行于分子长轴方向的折射率为  $n_{\parallel}$ ,垂直于分子长轴方向的折射率为  $n_{\perp}$ 。首先将入射光调节为线偏振光,并使其偏振方向平行  $x$ ,这时入射光对应的液晶折射率为  $n_{\parallel}$ ,当  $y$  方向施加电场时,液晶分子长轴在外电场作用下开始向电场方向偏转,偏转的角度  $\theta$  与外电场的有效电压成比例增长,根据折射率椭球,可以很容易求出入射光偏振方向上的折射率

$$n(\theta) = \frac{n_{\perp} n_{\parallel}}{\sqrt{n_{\perp}^2 \cos^2 \theta + n_{\parallel}^2 \sin^2 \theta}}$$

由上式可知,在初始态时,  $\theta = 0, n(\theta) = n_{\parallel}$ ; 当外电场使  $\theta = \theta_{\max} = 90^{\circ}$  时,  $n(\theta) = n_{\perp}$ 。由此可见,液晶的折射率在电场作用下的变化范围为  $n_{\parallel} \sim n_{\perp}$ ,一般  $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$  称为液晶的双折射率,折射率的变化改变了 F-P 腔的光学腔长。

液晶 F-P 腔最大的调谐范围为

$$\Delta \lambda \cong \frac{n_{\parallel} - n_{\perp}}{n_{\parallel}} \lambda_0$$

如果入射光的电场有垂直于  $x$  的分量,例如以椭圆偏振光入射或线偏振入射光的偏振方向与  $x$  有偏离,这时对于垂直于  $x$  的光波电场分量,液晶的折射率在不加外电场和施加外电场时均为  $n_{\perp}$ ,入射光的这一偏振模将无法通过 F-P 腔,因此液晶 F-P 腔滤波器具有偏振敏感性。使用时应尽可能将其它偏振态的入射光调整为线偏振光,并使其偏振方向平行于液晶分子长轴,从而把偏振造成的损失降到最小程度。

另外,使用液晶 F-P 腔光滤波器时,应进行温度控制, J. S. Patel 等人测得的波长随温度的漂移量为  $0.1 \sim 1 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ <sup>[1]</sup>,漂移量与工作温度和驱动电压有关,因而 LCFP 工作温度的变化应小于  $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

### 3 滤波器的设计

液晶 F-P 腔光滤波器的基本结构如图 2 所示,它有以下几部分组成:玻璃基片、ITO 透明

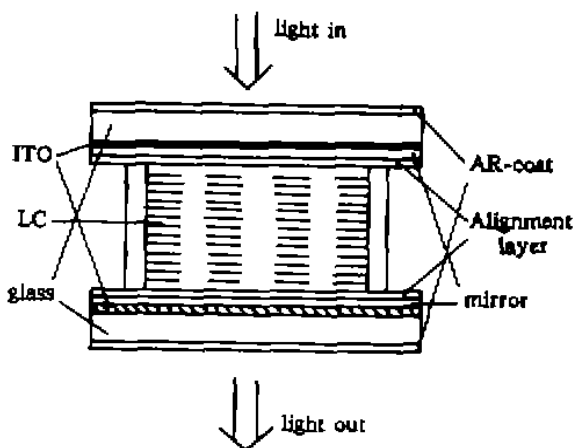


图 2 液晶 F-P 腔光滤波器的结构示意图

Fig. 2 Structure of the liquid crystal Fabry-Perot interferometer

导电膜、介质高反膜、介质消反膜、向列相液晶和绝缘垫圈。向列相液晶层约  $10 \mu\text{m}$  厚,介质高反膜的反射率为  $95 \sim 99.6\%$  (对于波长  $1450 \sim 1600 \text{ nm}$ )。由于 ITO 透明导电膜在  $1.55 \mu\text{m}$  波长附近有一定的吸收,因而 ITO 膜镀在介质高反膜之外,并且其厚度应选择适当,我们选择的 ITO 膜厚度为  $50 \text{ nm}$ ,面电阻为  $300 \Omega/\text{cm}^2$ 。玻璃基片的大小为  $50 \times 50 \text{ (mm)}$ ,厚度约为  $1 \text{ mm}$ ,其对  $1.55 \mu\text{m}$  波长的透过率为  $99\%$ ,表面光圈为  $1/2$ ,平行差为  $30'$ 。实验测得,在  $1.55 \mu\text{m}$  波长上镀有 ITO 导电膜的玻璃基片的透过率为  $86\%$ 。为使液晶分子达到良

好的取向,需要在玻璃基片的高反膜层表面进行反平行摩擦处理<sup>[2]</sup>,然后即可制成液晶盒,再注入液晶并完成封装。

消反膜的作用是为了避免形成附加腔<sup>[3]</sup>。器件的驱动电压为双极性脉冲,频率在 1 kHz 左右,占空比为 0.5,这样液晶中将不会出现电流。液晶选用的是清华大学液晶材料公司的正性向列相液晶,其主要技术参数见表 1。

表 1 液晶的主要技术参数

Table 1 The characteristic parameters of the liquid crystals

Type	Molten point (°C)	Clearing point (°C)	Threshold voltage (V)	Resistivity ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )	$\Delta n$ (20°C)
TEB-30A	<-20	$\geq 60$	1.42	$>1 \times 10^{10}$	0.1703
TEB-32A	<-20	$\geq 60$	1.47	$>1 \times 10^{10}$	0.1635
TEB-34A	<-20	$\geq 60$	1.55	$>1 \times 10^{10}$	0.1592
TEB-36A	<-20	$\geq 60$	1.65	$>1 \times 10^{10}$	0.1536
TEB-38A	<-20	$\geq 60$	1.81	$>1 \times 10^{10}$	0.1464
TEB-40A	<-20	$\geq 60$	2.04	$>1 \times 10^{10}$	0.1445

## 4 实验结果及讨论

测试光路如图 3 所示,中心波长为 1.536  $\mu\text{m}$  的窄线宽 DFB 激光器(线宽小于 150 MHz)

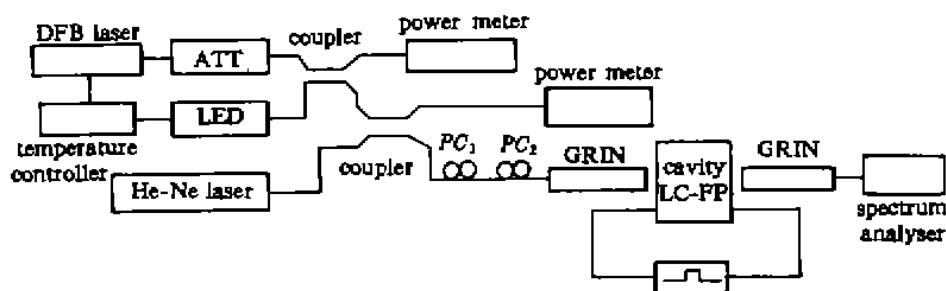


图 3 LCFP 的测试光路

Fig. 3 Experimental setup of LCFP measurement

用来测试 LCFP 的插入损耗;中心波长为了 1.5  $\mu\text{m}$ ,带宽为 90 nm 的 LED 用来测试 LCFP 的自由谱域 (FSR)和半高全宽(FWHM),从而得到精细度 ( $F$ ),  $F = \text{FSR}/\text{FWHM}$ 。调谐范围的测量方法是逐渐增大 LCFP 的驱动电压,得到在不同电压下的透射谱, LCFP 的同一级纵模的最大波长差即为连续调谐范围。

$\text{PC}_1$  和  $\text{PC}_2$  分别为光纤型极化器和偏振控制器,光谱分析仪 (MS9001B1 Anristu) 的测量分辨率为 0.1 nm, LCFP 的驱动电压信号为 1 kHz 的双极性脉冲,占空比为 0.5,其可调谐范围在 0~10 V,电压稳定度为  $\pm 0.001$  V。

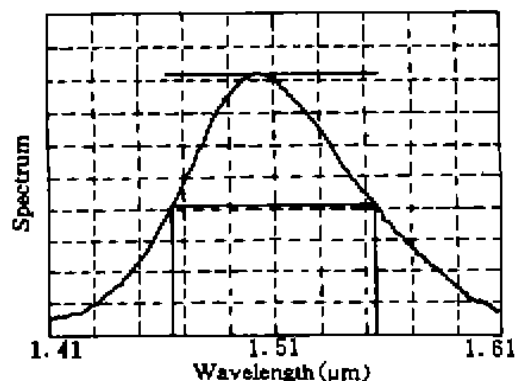


图 4 LED 的光谱图

Fig. 4 Optical spectrum of LED

图4为LED的光谱,其中心波长为 $1.50\ \mu\text{m}$ ,FWHM为 $92\ \text{nm}$ 。图5(a)、(b)分别为不加偏振控制和加偏振控制时的LCFP透射谱,由图中可知LCFP的自由谱域约为 $60\ \text{nm}$ 。图6是图5(b)中一个纵模的精细光谱,其FWHM为 $0.34\ \text{nm}$ ,从而可知精细度为176。图7是在加偏振控制下测得的LCFP两个纵模的调谐曲线,连续可调谐范围大于 $70\ \text{nm}$ 。用DFB半导体激光器测得LCFP的插入损耗为 $5\sim 6\ \text{dB}$ 。

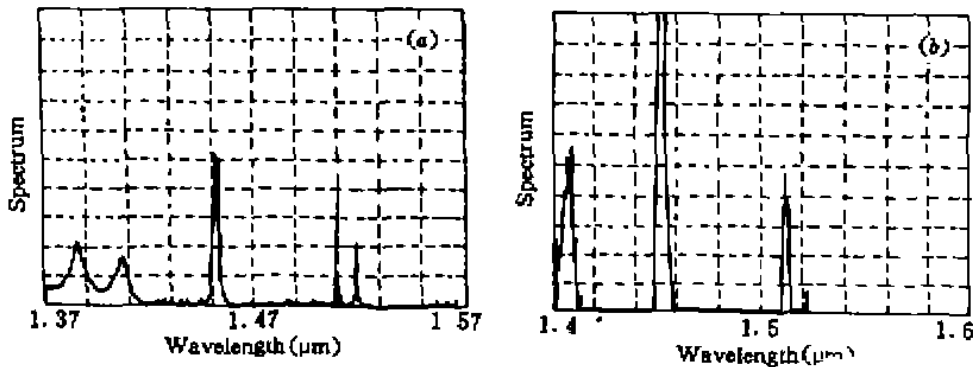


图5 (a) 不加偏振控制时LCFP的透射谱图;(b) 加偏振控制时的LCFP透射谱图

Fig. 5 Spectra of LCFP (a) no polarization control and (b) with polarization control

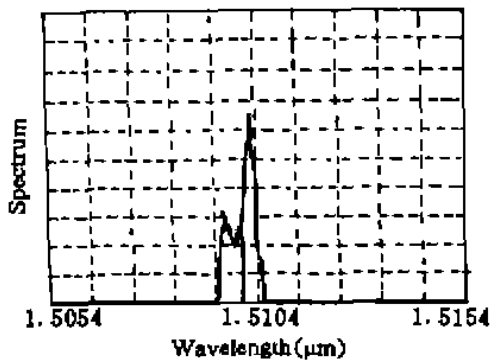


图6 LCFP的FWHM

Fig. 6 FWHM of the LCFP spectrum gives the fineness of the LCFP to be 176

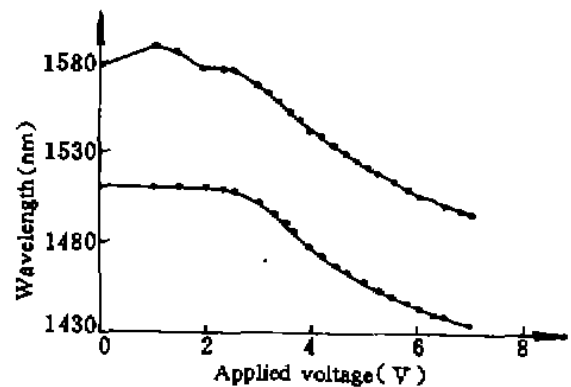


图7 LCFP的调谐曲线

Fig. 7 Tuning curve of LCFP

从图5(a)中可以看到:当不加偏振控制时,在LCFP的一个FSR内出现双峰光谱,这是平行于液晶分子轴和垂直于液晶分子轴的两个偏振模的透射谱。这两个偏振模的自由谱域有极小的差异,其FWHM也有微小的差异,其原因是腔镜反射率的带宽有限,使得不同波长处的谱产生了一定的差异,两个偏振模的自由谱域不均匀是由于液晶的两个折射率 $n_{\parallel}$ 、 $n_{\perp}$ 与波长有关造成的:

$$\Delta\text{FSR} \approx |\text{FSR}_{\perp} - \text{FSR}_{\parallel}| = \frac{c(n_{\parallel} - n_{\perp})}{2n_{\parallel}n_{\perp}l}$$

式中 $l$ 为腔长, $c$ 为真空中光速。

ITO导电膜的吸收、玻璃基片表面的散射和腔面不够平行造成损耗较大,提高ITO膜材料的纯度和玻璃基片表面的加工精度将会有所改善。FWHM的进一步减小可通过增大腔长的方法来实现,若将现有的 $10\ \mu\text{m}$ 后的液晶层增至 $20\ \mu\text{m}$ ,则FWHM会减小一半,但厚度在 $25\ \mu\text{m}$

以上的液晶层是各向异性的,具有大的损耗,目前国外采用蒸镀  $\text{SiO}_2$  层的方法增加腔长<sup>[4]</sup>。偏振敏感性这一问题的解决仍在探索中,可采用四分之一波片和反射镜将入射光分成透射光和反射光,反射光经四分之一波片和反射镜后,其偏振旋转  $90^\circ$ ,然后再进入滤波器,从而降低偏振敏感性<sup>[5]</sup>。也可采用扭曲向列相液晶来降低偏振敏感性<sup>[1]</sup>。

**致谢** 感谢清华大学化学系液晶技术公司的万博泉总工程师、张伟工程师,电子部 11 所的孙龙英高工和本教研室的李青博士给予的合作与帮助。

### 参 考 文 献

- 1 J. S. Patel, S. D. Lee. An electrically tunable and polarization insensitive Fabry-Perot etalon with a liquid crystal film. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58: 2491~2493
- 2 K. Hirabayashi. Narrow-band tunable wavelength-selective filters of Fabry-Perot interferometers with a liquid crystal intracavity. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(3): 213~215
- 3 M. W. Maeda, J. S. Patel, Chinlon Lin. Electronically tunable liquid-crystal-etalon filter for high-density WDM systems. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1990, 2(11): 820~822
- 4 K. Hirabayashi, H. Tsuda. Frequency tracking of tunable liquid-crystal wavelength filter for WDM transmission. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1991, 3(8): 741~743
- 5 Katsuhiko Hirabayashi, Takashi KuroKawa. A tunable polarization-independent liquid-crystal Fabry-Perot interferometer filter. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1992, 4(7): 740~742

## Experimental Investigation of a Tunable Liquid-crystal-etalon Filter

Shen Ruilin Song Kai Zhang Yangan Li Ling Ye Peida

(Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100088)

**Abstract** This paper describes the experimental study of a tunable liquid-crystal-etalon filter. The liquid crystal Fabry-Perot optical filter was developed that has narrow bandwidth (0.3~0.5 nm), high fineness (100~200) and a large continuously tunable range (>70 nm).

**Key words** optical filter, nematic liquid crystal, FWHM, fineness