

文章编号: 0253-2239(2004)08-1095-4

# 一种用于密集波分复用系统中的可调谐液晶 法布里-珀罗滤光片

陈海星 黄腾超 沈伟东 李海峰 顾培夫

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 基于液晶分子的双折射特性,设计并制作了一种结构简单的可用于波分复用系统中的可调谐液晶法布里-珀罗滤光片。对器件的光谱调谐特性进行了分析和模拟,并得到了液晶分子的折射率调制与其分子在电场作用下产生的转动角度之间的关系式。最后,对所设计的结构进行了制作和实验,测试结果显示了滤光片的性能受液晶分子的排列特性和法布里-珀罗腔的反射镜参量的影响较大,同时实验表明了这种利用向列型液晶分子作为法布里-珀罗腔内介质的可调谐滤光片在加电压调试下其调谐性能良好,调谐范围可覆盖 C 波段,透过峰的半峰全宽达到了 0.8 nm,实验结果与设计相吻合。

**关键词:** 光纤通信技术;密集波分复用;液晶双折射;法布里-珀罗腔;可调谐滤光片

中图分类号: O436 文献标识码: A

## Tunable Liquid Crystal Fabry-Perot Filter for Dense Wavelength Division Multiplexing System

Chen Haixing Huang Tengchao Shen Weidong Li Haifeng Gu Peifu

(State Key Labs of Modern Optical Instrumentation, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

(Received 26 June 2003; revised 2 October 2003)

**Abstract:** Based on the birefringent effect of liquid crystal, a liquid crystal Fabry-Perot filter in simple structure is designed and fabricated. This device can be used in wavelength division multiplexing. The tunable characteristic of this device was analyzed and simulated; the formula of the relation between the liquid crystal refractive index modulation and the rotary angle of the liquid crystal molecule arose from the modulated voltage is got. The test of the fabricated tunable filter shows that the performance of the device is mainly affected by the alignment of the liquid crystal molecule and the parameter of the reflectors of the Fabry-Perot cavity, and the tunable characteristic is good for this kind of device with the nematic liquid crystal as the media in the Fabry-Perot cavity. The tunable range of the tunable filter covers the C band and the full width at half maximum (FWHM) could reach 0.8 nm, the experimental result was coincident with the design well.

**Key words:** optical fiber communication technology; dense wavelength division multiplexing; liquid crystal birefringence; Fabry-Perot cavity; tunable filter

## 1 引 言

随着密集波分复用光通信系统的快速发展,单根光纤所需容纳的通道数越来越多,为了对多通道

中的某一个波长进行处理,就必须使用复用和解复用器。目前实现复用和解复用器的方法很多,主要包括薄膜滤光片<sup>[1]</sup>、阵列波导光栅<sup>[2]</sup>和马赫-曾德尔光纤干涉仪<sup>[3]</sup>等等,其中通过使用梳状滤光片<sup>[4]</sup>将通道间隔扩大后再由低通通道数的滤光片进行滤波是目前密集波分复用中一种较经济、简便的方法。然而,未来的光网络将朝更加智能、灵活和可配置性

E-mail: seastarchen@yahoo.com.cn

收稿日期:2003-06-26;收到修改稿日期:2003-10-02

方面发展,而具备可调谐功能的滤光器则是实现这一趋势的重要器件。

已经有大量用于波分复用系统的可调谐滤光器的研究报道,包括声光可调谐滤光器<sup>[5]</sup>,压电陶瓷驱动的法布里-珀罗干涉仪<sup>[6]</sup>和马赫-曾德尔干涉滤光器<sup>[7]</sup>。光栅型和声光型滤光器可调谐范围大于 100 nm,但它们的带宽却不够窄。压电控制法布里-珀罗干涉仪虽然有足够大的可调谐范围和窄的带宽,但却由于要求非常高的定位精度使得制作很困难。马赫-曾德尔干涉滤光器有非常窄的带宽,但截止度不够深。相对于以上构造,液晶法布里-珀罗干涉滤光片(LCFPF)具有很多优点:包括结构简单、低压驱动、成本低和良好的光学性能。因此,日本的 NTT 实验室<sup>[8]</sup>和美国的贝尔实验室<sup>[9]</sup>都对可调谐液晶法布里-珀罗滤光片进行了详细的研究。

本文利用液晶分子的双折射效应,通过对液晶分子的电压调制,改变其有效折射率,从而使其具有波长选择性,设计并制成了一种可用于密集波分复用系统的可调谐液晶法布里-珀罗滤光器。

## 2 设计原理

利用法布里-珀罗腔的多光束干涉效应可以得到波长间隔较密集的精细条纹,并已广泛应用于制作光通信器件中。而通过将法布里-珀罗腔的空气间隔层换成可以进行折射率调制的液晶材料,则可以得到可调谐的法布里-珀罗滤光器件。基本的液晶可调谐滤光器如图 1 所示。

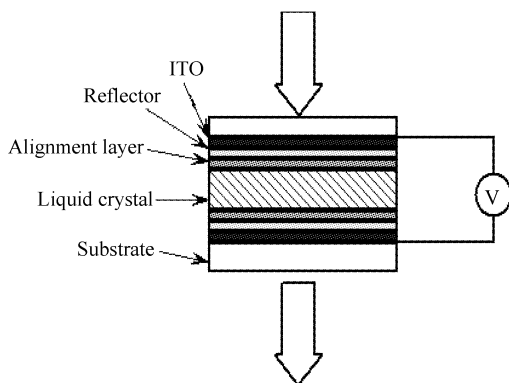


Fig. 1 Schematic structure of LCFPF

液晶层的两边分别为定向层、反射镜和氧化锡铟(ITO)导电层,最外层为玻璃基板。当对导电层施加一定的电压时,液晶的光轴将在电场的驱动下,沿电场的方向重新排列,这样随着所加电压的不同,液晶的有效折射率将不同。从而实现对透射波长的调制。设计中采用的液晶材料为 Merck 公司的

E44 向列型液晶,20 °C 时,其 o 光和 e 光的折射率差,波长 589.3 nm 处可达到 0.26,因此,用于可调谐法布里-珀罗滤光器时可得到较大的调谐范围。

液晶法布里-珀罗腔的透射峰处的波长  $\lambda_0$  可由下式决定:

$$\lambda_0 = \frac{2nL}{m}, \quad (1)$$

式中  $n$  为液晶的折射率, $L$  为腔厚, $m$  则为干涉级次。而腔厚可由(2)式推出:

$$L = \frac{1}{2n} \left( \frac{\lambda_0^2}{R_{FS}} - \lambda_0 \right), \quad (2)$$

即当确定需要的自由光谱范围  $R_{FS}$  后,就可以计算出液晶法布里-珀罗腔的所需厚度。器件的可调谐范围( $\Delta\lambda$ ) 在腔厚决定后,主要是由液晶的 o 光和 e 光的折射率之差  $\Delta n$  来决定的:

$$2\Delta nL = m\Delta\lambda. \quad (3)$$

我们设计的液晶法布里-珀罗腔滤光器的腔厚为 10  $\mu\text{m}$ ,反射镜的反射率为 98%,液晶材料 E44 的 o 光和 e 光折射率在 589.3 nm 波长处的折射率分别为 1.5277 和 1.7904。模拟计算的光谱透过率如图 2 所示。

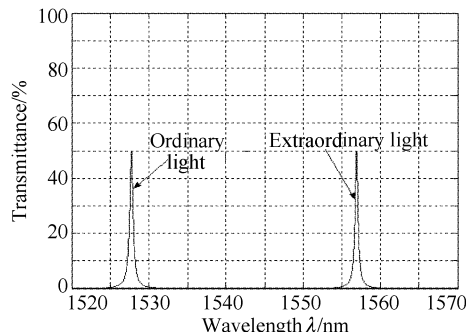


Fig. 2 Simulation of transmittance of LCFPF

从图 2 可以看出,当一束自然光正入射到器件时,透射光谱将有两个峰值出现,一个是 o 光的最大透射峰,另一个为 e 光的最大透射峰,理论上两个透射峰的透过率都是 50%,但是,实际上,由于入射光本身一般不是理想的自然光,而是椭圆偏振光,因此,两个正交分量的值不相等,所以,入射到器件后的透射光谱中 o 光和 e 光是不相等的,同时,由于液晶分子的取向是在一定范围内的平均效应并且是有一定波动性的。因而,这也决定了两种偏振光的透射光强是不相等的。从模拟计算的光谱中可看出器件的半峰全宽(FWHM)约为 0.6 nm,一般来说,半峰全宽越小,调谐速度可以越快,因为这时电压的微小变化,就可以使透射峰发生移动。但是,由于电压引起的折射率变化并不是和所加电压成线性关系,

因此,实际驱动电压需要随之改变以获得线性折射率调制。我们知道,液晶的有效折射率  $n(\theta)$  与入射光和液晶分子的光轴夹角  $\theta$  的关系为

$$n(\theta) = (\sin^2\theta/n_e^2 + \cos^2\theta/n_o^2)^{-1/2}, \quad (4)$$

对(4)式进行微分,则可以得到  $n(\theta)$  相对于  $\theta$  的变化函数  $n'(\theta)$ :

$$n'(\theta) = \frac{1}{2} \frac{\sin 2\theta(1/n_o^2 - 1/n_e^2)}{(\sin^2\theta/n_e^2 + \cos^2\theta/n_o^2)^{3/2}}, \quad (5)$$

函数曲线如图 3 所示,从图中可以看出,当 o 光和 e 光的折射率分别为 1.5277 和 1.7904 时,液晶有效折射率变化的极大点所对应的  $\theta$  角为  $51.6^\circ$  (0.9 rad)。设液晶分子在 e 光平面内转动(如图 4 所示),则随着所加调制电压的增加,开始时,折射率随液晶分子旋转角度的增大而缓慢减小,但折射率的变化率却逐渐增大,在  $\theta$  角为  $51.6^\circ$  时达到最大,随后变化率随旋转角度的继续增大而逐渐减小。需要指出的是,这种变化率随旋转角度的变化关系是和液晶材料有关的,当 e 光的折射率和 o 光的折射率的比值不同时,函数曲线也不同。因此实际使用中,为了获得线性度较好的驱动电压与折射率变化的关系,就需要按照实际液晶材料折射率的图 3 变化规律进行相应的电路设计。

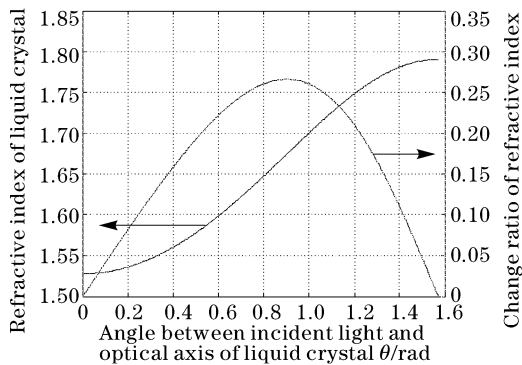


Fig. 3 Relation of refractive index vs.  $\theta$

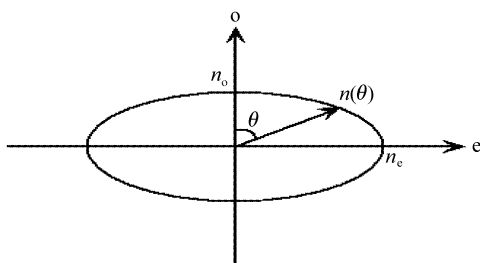


Fig. 4 Refractive index ellipse

### 3 实验结果及讨论

实验中,首先在镀有 ITO 透明导电薄膜的平板玻璃表面镀上  $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$  介质高反射膜,反射率约为

98%,然后,在其上面用旋涂的方法镀上一层聚酰亚胺液晶定向层,并对其进行平行定向处理,最后,在经处理的两平行平板玻璃之间注入液晶材料,两平行平板玻璃的间隔通过控制间隔层厚度来调节。通过对 ITO 引出电极施加电压,对器件在室温,相对湿度为 70%的环境下进行加电压调制的测试。测试光源采用 EXFO 的 FLS-2600 可调谐激光器。未加调制电压时的实际测试光谱曲线如图 5 所示,图中,透射率峰值分别为相对于 100% 偏振光入射时的透射率。

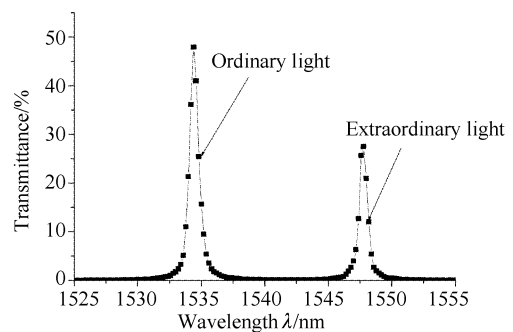


Fig. 5 Transmittance spectrum of LCFPF

由图 5 可以看出,一方面由于输出激光通过光纤出射后,已变成了椭圆偏振光;另一方面,如前所述,由于液晶分子取向的波动性,这两个原因共同作用的结果使得 o 光的透射率要大于 e 光的透射率。实测光谱中,o 光和 e 光的透射峰波长位置和模拟的结果稍有差别,这是由于所选择的测试点处腔厚的误差引起的。同时,o 光和 e 光的透射峰间隔比模拟计算的要小,这是因为未加调制电压时,液晶分子排列并不一致,折射率是一个平均效果,所以实际的折射率值要比理论值小,导致 o 光和 e 光的透射峰间隔比模拟值小。当施加调制电压时,理论上 e 光的透射峰将移动,而 o 光将不变化。图 6 为器件调谐时的光谱图,从图中可以明显看出,当施加 5.7 V 均方根电压时,液晶分子排列趋于一致,因此,e 光的透射峰移至模拟计算所对应的波长处,当继续加大电压时,峰值朝短波方向移动,这是由于此时的液晶有效折射率变小的缘故。同时,实际测试中可以看到 o 光峰值还有一定细微移动,这也是液晶分子取向不一致的结果。理论计算中采用的是 589.3 nm 处的折射率值,得到 o 光的峰值在 1528 nm 处,实际测试中,如图 6 所示,o 光峰值位置基本不发生移动,在 1523 nm 左右。考虑到实验中的一些误差因素,可近似认为 E44 液晶材料的色散较小。图中加上调制电压后,o 光峰值要小于 e 光峰值,这说明电场迫使液晶分子重新定向后,沿 e 光方向排列的分子占有优势。图中可以看到透射峰有凹

陷现象,这是因为激光入射时,器件的两个反射镜的玻璃基板形成了两个腔,因此实际上是三个腔的耦合,而多腔耦合时,反射镜的反射率匹配不当时,易造成有凹峰<sup>[10]</sup>。

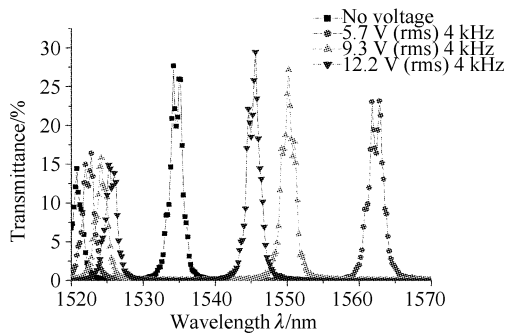


Fig. 6 Transmittance peak shift with the change of voltage

由于光通信中使用的掺铒光纤放大器波段为 1520~1570 nm,因此测试时激光器扫描的波段为这个波长区域。从图 6 可以看出,当对器件所加电压 5.7 V,频率为 4 kHz 时,e 光的峰值波长由 1534.5 nm 移至 1562.5 nm;电压逐渐加至 9.3 V 时,峰值波长为 1550 nm;当电压为 12.2 V 时,峰值波长调谐至 1545 nm,实验测得 e 光的整个调谐范围可从 1534.5 nm 至 1562.5 nm,为 28 nm;而 o 光的透射峰值波长基本保持不变。器件的调谐半峰全宽可由图 7 看出,约为 0.8 nm,和理论计算所得值较为接近,可满足波分复用系统的要求。如前所述,要使器件的半峰全宽进一步减小,就要使反射镜的反射率增大,这将对两反射镜的中心波长的一致性要求提出更高要求,细微的差别将导致透射率的急剧下降,影响器件的使用性能。

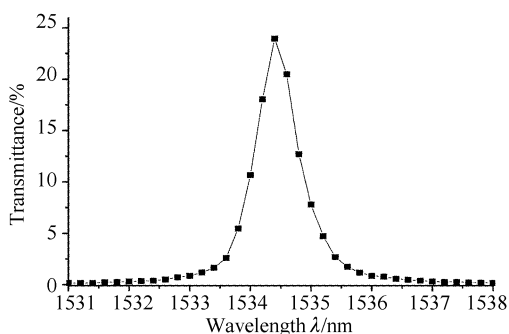


Fig. 7 The full width at half maximum of LCFPF

**结论** 本文设计了一种可用于波分复用系统的可调谐液晶滤光片,其实验结果和设计基本吻合,论证了这种结构的可行性。液晶器件具有良好的双折射特性和可以产生足够大的折射率差、驱动电压低、功耗小、可选用的材料成本较低和工艺成熟等优点,使得其在显示、光通信等领域中发挥着重要的作用。但目前使用的液晶光器件还存在一些问题,比如温度稳定性、插入损耗、偏振敏感性等,这些都是亟待解决的问题。因此,今后的研究将以减小插入损耗,提高器件的光学性能方面作为努力的方向。

### 参 考 文 献

- 1 Gu Peifu, Bai Shengyuan, Li Haifeng *et al.*. Design of DWDM thin film interference filters. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7):794~797 (in Chinese)
- 2 Munoz P, Pastor D, Company J. Modeling and design of arrayed waveguide gratings. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(4):661~674
- 3 Kuznetsov M. Cascaded coupled Mach-Zehnder channel dropping filters for wavelength-division-multiplexed optical systems. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(2): 226~230
- 4 Chen Haixing, Li Haifeng, Gu Peifu *et al.*. Interleaver design based on phase characteristics of Fabry-Perot cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1): 37~40 (in Chinese)
- 5 Cheung K W, Choy M M, Kobrinski H. Electronic wavelength tuning using acousto-optic tunable filter with broad continuous tuning range and narrow channel spacing. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, **1**(1): 38~40
- 6 Stone J, Stulz L W, Marcuse D *et al.*. Narrow-band FiEnd etalon filters using expanded-core fibers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1992, **10**(12):1851~1854
- 7 Wooten L, Stone R L, Miles E W *et al.*. Rapidly tunable narrowband wavelength filter using LiNbO<sub>3</sub> unbalanced Mach-Zehnder interferometers. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(11): 2530~2536
- 8 Hirabayashi K, Kurokawa T. Tunable wavelength-selective demultiplexer using a liquid crystal filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(7): 737~740
- 9 Sneha A, Johnson K M. High-speed continuously tunable liquid crystal filter for WDM networks. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 1067~1079
- 10 van de Stadt H, Muller J M. Multimirror Fabry-Perot interferometers. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1985, **2**(8): 1363~1370