

文章编号: 0253-2239(2004)11-1538-5

## 可调谐液晶滤波器的调谐性能研究\*

吕玮阁 陈海星 顾培夫 刘旭

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

**摘要:** 在电调谐液晶法布里-珀罗腔滤波器的连续调谐过程中, 存在“透射峰跳跃”现象, 影响器件的单调调谐性。为了改善器件的单调调谐性能, 对此现象进行了分析, 表明这是由于法布里-珀罗腔干涉级次在调谐过程中发生改变引起的; 进而给出了法布里-珀罗腔透射波长  $\lambda$ , 干涉级次  $m$  与腔内介质折射率  $n$  的关系, 以及器件实际的有效调谐范围。当腔长为  $10 \mu\text{m}$ 、折射率差为 0.05 时, 就可以使器件的单调调谐范围达到整个 C 波段。数值模拟与实验结果相吻合。并针对改善器件的单调调谐性能, 提出了几种可行的方案。

**关键词:** 薄膜光学; 可调谐滤波器; 液晶双折射; 法布里-珀罗腔

中图分类号: O484.4<sup>+</sup>1 文献标识码: A

### Study of the Tuning Performance of Tunable Liquid Crystal Filter

Lü Weige Chen Haixing Gu Peifu Liu Xu

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

(Received 6 November 2003; revised 5 April 2004)

**Abstract:** In the continuous tuning process of the electric tunable liquid crystal Fabry-Perot filter (LCFPF), the phenomenon of the jumping of the transmission peak spectrums is found. And this phenomenon influences the monotone tuning performance of the device. Analysis for this phenomenon shows that it's due to the change of the interference order of Fabry-Perot cavity in the tuning process. And the relationship between the transmission peak wavelength  $\lambda$ , the interference order  $m$ , and the index  $n$  of the medium in the Fabry-Perot cavity is given, as well as the effective tuning range of the device. When the length of the cavity is  $10 \mu\text{m}$ , the tuning range will cover the whole C Band with the index difference of only 0.05. The experimental result is in agreement with the numeric simulation. At last, some approaches are presented in order to improve the monotone tuning performance of the device.

**Key words:** thin film optics; tunable filter; birefringence of liquid crystal; Fabry-Perot cavity

## 1 引 言

未来的密集波分复用全光网络将向更加智能、灵活和可配置性方面发展, 因此对各种滤波器的性能提出越来越高的要求<sup>[1~3]</sup>, 包括调谐范围、响应速度、带宽、截止度、平坦度以及调谐的单调性和线性等等。

关于波分复用系统中的可调谐滤波器, 已有大量研究报道, 包括声光可调谐滤波器<sup>[4]</sup>, 压电陶瓷驱动的法布里-珀罗干涉仪<sup>[5]</sup>和马赫-曾德尔干涉滤波

器<sup>[6]</sup>。其中液晶法布里-珀罗干涉滤波器<sup>[7~9]</sup>具有很多优点: 结构简单、低压驱动、成本低和良好的光学性能。因此, 日本 NTT (Nippon Telegraph and Telephone Corporation) 实验室<sup>[10,11]</sup> 和美国贝尔实验室<sup>[12]</sup> 等都对可调谐液晶法布里-珀罗干涉滤波器进行了详细的研究。本文从实验出发, 对电调谐液晶法布里-珀罗干涉滤波器的单调调谐性能进行了研究。

本文从实验出发, 对电调谐液晶法布里-珀罗干涉滤波器的单调调谐性能进行了研究; 利用液晶的双折射效应, 通过对液晶分子的电压调节, 控制其有效折射率的可调谐范围, 从而避免连续调谐过程中出身“透射峰跳跃”的现象, 保证对波长的单调调谐。实验

\* 高等学校重点实验室项目资助课题。

E-mail: lvweige@hotmail.com

收稿日期: 2003-11-06; 收到修改稿日期: 2004-04-05

结果与数值模拟结果非常一致,从而为确定波长有效调谐范围提供了依据。

## 2 实验及分析

将法布里-珀罗腔的空气间隔层换成可以进行折射率调谐的液晶材料,即得到图 1 所示的可调谐液晶法布里-珀罗干涉滤波器器件。其透射峰值波长  $\lambda_0$  可由下式决定:

$$\lambda_0 = 2nL/m, \quad (1)$$

式中  $n$  为液晶的折射率,  $L$  为腔厚,  $m$  则为干涉级次。

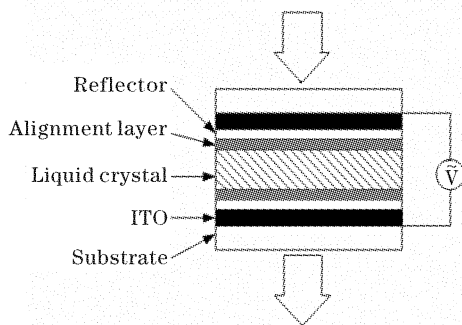


Fig. 1 Schematic structure of tunable liquid crystal Fabry-Perot filter (LCFPF)

如图 1 所示,液晶层的两边分别为定向层、反射镜和氧化铟锡 (ITO) 透明导电层,最外层为玻璃基板。当对导电层施加一定的调节电压时,原来平行于玻璃基板的液晶分子的光轴在电场的驱动下,沿电场的方向重新排列;对于偏振方向平行于液晶分子的偏振光,随着调节电压的增加,折射率将逐渐从  $n_e \rightarrow n_o$ , 由(1)式,透射峰值波长也将从  $2n_e L/m \rightarrow 2n_o L/m$ , 从而实现透射波长的调谐,如图 2 所示。然而在实际测试中,透射峰值波长的改变并不与以上分析完全吻合。取滤波器上的某个点,测量当调节电压改变时,它的透过率和调谐性能,如图 3 所示。可调谐激光器的输出波段为 1520 ~ 1570 nm, 所用液晶材料  $n_o = 1.5277, n_e = 1.7904$ 。图中,在 1521 nm 处保持不变的波峰对应 o 光;随电压改变的波峰对应 e 光。可见,在调节电压为 0 ~ 6.5 V 时,透射峰值波长发生了明显的跳变。

分析以上实验发现,(1)式中干涉级次  $m$  在调谐过程中并不是确定不变的,透射峰值波长沿长波方向的移动实际上是由于  $m$  的改变引起的,波长可调范围并不就对应于折射率的可变范围。为便于分析,假设干涉级次  $m$  不变,由(1)式可得

$$\Delta\lambda = \frac{\Delta n}{n} \lambda_0, \quad (2)$$

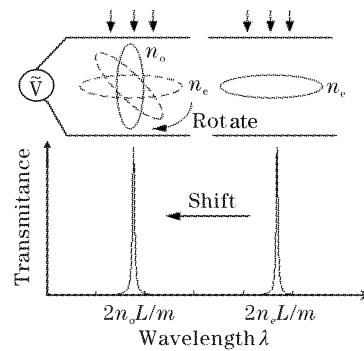


Fig. 2 Schematic drawing of tunable liquid crystal Fabry-Perot filter modulation (LCFPF)

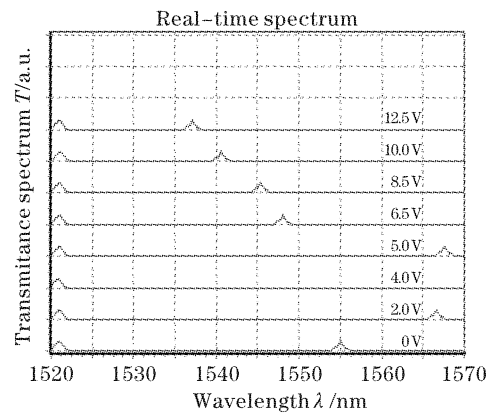


Fig. 3 Experimental spectrum of tunable liquid crystal Fabry-Perot filter (LCFPF)

取实际制作的可调谐液晶法布里-珀罗干涉滤波器参量:  $L = 10 \mu\text{m}, n = n_e, m = 23, \lambda_0 = 1559.6 \text{ nm}$ , 可得自由光谱范围(FSR)约为 65 nm。依据(2)式,相应的折射率调谐范围只需  $\Delta n \approx 0.075$  (考虑在 1520 ~ 1570 nm 范围,所需  $\Delta n$  将更小),远小于实际的液晶分子折射率差 0.2627,因此,级次  $m$  必然改变。级次改变量和折射率改变量与波长改变量的关系可以用下式表示:

$$\Delta\lambda = \left[ 1 - \left( \frac{m}{m + \Delta m} \right) \left( \frac{n - \Delta n}{n} \right) \right] \lambda, \quad (3)$$

取初始状态  $n = n_e, \lambda = \lambda_0$ , 由(3)式计算得到的结果列于表 1。

Table 1 The calculated result of  $\lambda'$ , from Eq. (3)

$\Delta m$	$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda / \text{nm}$						
	$\Delta n$						
	0.03	0.05	0.08	0.10	0.15	0.18	0.20
1	1467	1450	1425	1409	1367	1342	1325
0	1531	1513	1487	1470	1426	1400	1383
-1	1600	1582	1555	1537	1491	1464	1446
-2	1677	1658	1629	1610	1562	1534	1515
-3	1760	1740	1710	1690	1640	1610	1590

表 1 中用斜体表示的波长值,表示折射率改变时在观察窗口(1520~1570 nm)内透过的峰值波长,可见,随着调谐过程中折射率  $n$  减小,观察窗口内透射峰值波长对应的干涉级次  $m$  也会减小;同时,当干涉级次改变时,透射峰值波长也没有按照  $2n_e L/m \rightarrow 2n_o L/m$  的趋势一直向短波方向移动,反而会向长波方向跳变,同实验中出现的“透射峰跳跃现象”吻合。

### 3 单调调谐性能分析及实验

由(1)式可以给出液晶材料的折射率  $n$  与  $\lambda$  及  $m$  的关系,图 4 表示腔厚  $L=10 \mu\text{m}$  时的情况。

当  $L=10 \mu\text{m}$  时,折射率  $n$  从 1.7904 减小到 1.5277,共有 4 个级次依次出现在观察窗口(1520~1570 nm)内。在观察窗口内,当  $n$  从 1.7904 降到 1.75,中心波长从 1556 nm 逐渐减小到 1520 nm,对应  $m=23$ ;从 1.75 到 1.725,观察窗口内没有波峰透过;从 1.725 到 1.675,中心波长又跳到 1570 nm,然后逐渐减小到 1520 nm,对应  $m=22$ 。这样,在同一个级次内,波长随折射率减小单调减小;跨越不同级次时,观察窗口中的波峰就有可能向长波跳变,这就是实验中观察到的“透射峰跳跃”现象,将会影响滤波器的单调调谐性能。

利用 Matlab 软件,对同一级次和跨越级次两种

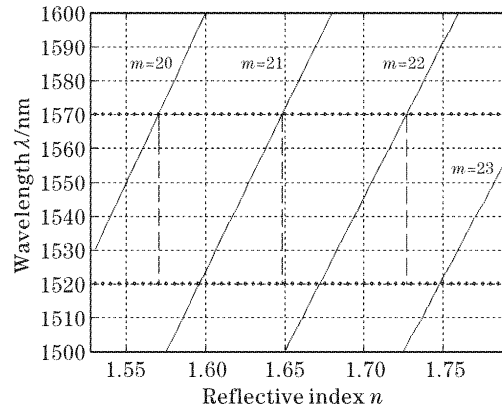


Fig. 4 The relation between  $n, \lambda$  and  $m$  for  $L=10 \mu\text{m}$ . For  $m=23, 22$ , the effective tunable ranges of the refractive index are  $1.7904-1.75=0.0404, 1.725-1.675=0.050$ , respectively; the corresponding tunable ranges of wavelength are 36 nm, 50 nm

情况下的波长调谐进行了模拟,并对照图 4 标出了相应的级次  $m$ ,如图 5 所示。在图 5(a)中,当折射率由 1.7904→1.7404 减小时,透射峰值波长向短波方向移动,具有单调调谐性。其中,在 1520~1570 nm 的观察范围内,折射率  $n=1.7904 \rightarrow 1.75$  均对应同一干涉级次  $m=23$ ;而  $n=1.7404$ ,超出折射率的有效调谐范围,因此对应透射峰值波长在观察窗口之外。而在图 5(b)中,当调谐过程中折射率变化较大时,干涉级次发生了变化,导致单调性被破坏。

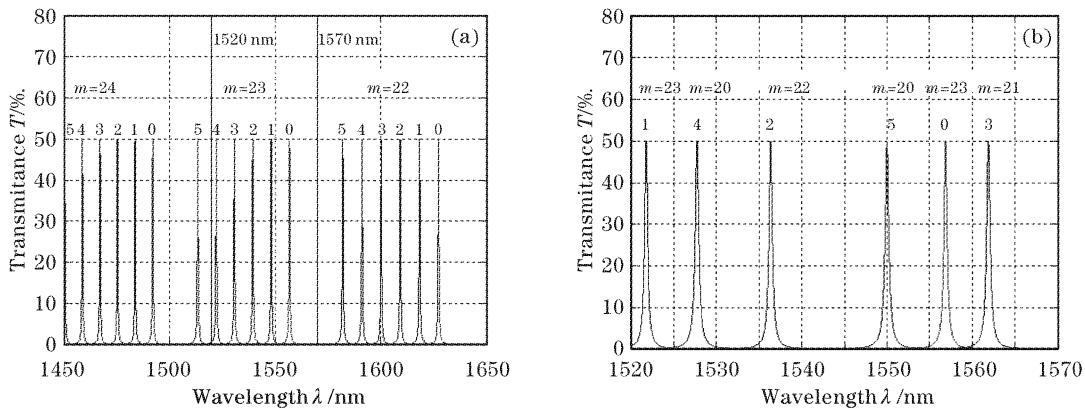


Fig. 5 (a) The monotonic tuning in the same interference order. The spectrums are labeled 0,1,2,3,4,5, corresponding to the indices 1.7904,1.7804,1.7704,1.7604,1.7504,1.7404, respectively, (b) the non-monotonic tuning in different interference orders. The spectrums are labeled 0,1,2,3,4,5, corresponding to the indices 1.7904,1.75,1.69,1.64, 1.55,1.5277, respectively

进一步从实验可以验证:如果调节电压增量取得足够小,在 1520~1570 nm 的观察范围内,可以看到透射峰值波长从长波向短波循环移动的现象,每一次循环对应不同的干涉级次。

用实验验证了这种循环,如图 6 所示,图中在

1538 nm 处保持不变的波峰对应 o 光;随电压改变的波峰对应 e 光。图 6 中,调节电压  $U$  清楚地观察到干涉级次的改变。

由图 6 还可看出,虽然在同一级次内,  $\Delta\lambda$  与  $\Delta n$  成线性关系,但在液晶双折射电光效应中,  $\Delta n$  与电

压  $U$  成非线性关系。因而,图中  $\Delta\lambda$  与  $\Delta U$  也成非

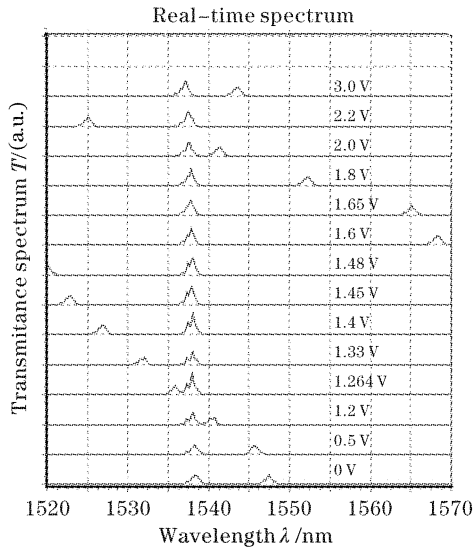


Fig. 6 Experimental spectrum of tunable liquid crystal Fabry-Perot filter under different tuning voltages

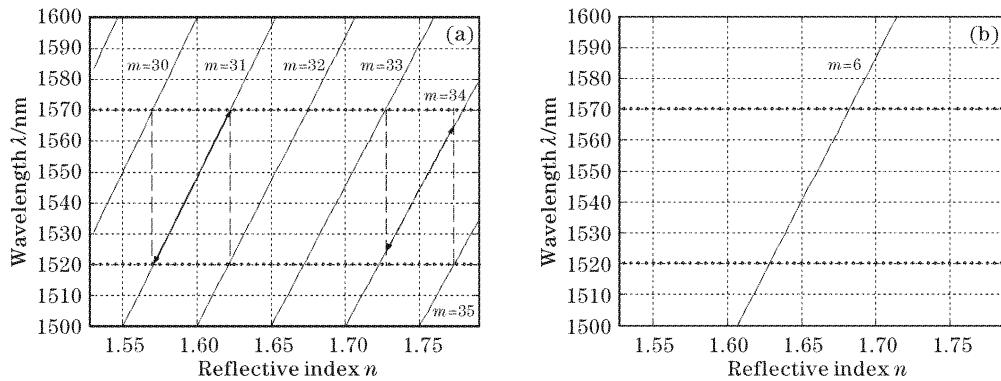


Fig. 7 The relation between  $n, \lambda$  and  $m$  for (a)  $L=15 \mu\text{m}$ , (b)  $L=2.8 \mu\text{m}$

#### 4 改善器件单调调谐性能的方法

根据以上分析,为了实现对波长的单调调谐,可采取以下方案:

1) 减小腔厚  $L$ , 或者在某个有效调谐范围内调谐折射率,使自由光谱范围大于  $(2n_c L/m - 2n_o L/m)$ ,从而保证调谐过程中级次  $m$  不变。如图 4 中,当  $L=10 \mu\text{m}$  时,取折射率的调谐范围为  $1.725 \sim 1.675$ ,则对应波长的调谐范围为  $1570 \sim 1520 \text{ nm}$ ,即以  $0.05$  的折射率差使器件调谐范围达到了整个 C 波段。通过设计腔厚  $L$ ,可以得到合适的波长调谐范围。由于实际利用的折射率有效调谐范围很小,可以选择折射率改变较小的材料。

2) 对不同的  $n, m$ , 计算出中心波长,按照波长线性的调谐要求选取合适的调节电压值。这种情况

线性关系,仅在某些区域接近线性。

图 7 表示腔厚为  $15 \mu\text{m}$  和  $2.8 \mu\text{m}$  时器件调谐过程中干涉级次的变化。从图可知,随着腔厚  $L$  增大,自由光谱范围(FSR)减小,这样在一定的内  $\Delta n$ ,干涉级次  $m$  改变增多。如果观察窗口取得过大,超过自由光谱范围,就会同时出现多个透射峰,干扰单调调谐。为此,定义折射率的有效调谐范围,即在此调谐范围内,观察窗口中出现唯一的谱线,并随折射率单调变化;对应的波长范围定义为波长有效调谐范围。

当  $L=15 \mu\text{m}, m=34$  时,在观察窗口内,波长有效调谐范围(以箭头标出)小于被窗口所截的范围,则在折射率有效调谐范围外,如  $n=1.78$ ,将出现两条谱线,对应  $m=34, 35$ ,因此不在波长有效调谐范围内。 $m=31$  时,有效调谐范围恰是观察窗口所截部分。而对  $L=2.8 \mu\text{m}$ ,观察窗口及有效调谐范围显然还有扩大的余地。

也出现在前述实验中(图 3,  $5 \sim 12.5 \text{ V}$ )。但是使用前需要预先计算或者实验测出所需电压值。

**结论** 利用液晶的双折射效应,通过对液晶分子的电压调节,控制其有效折射率的可调谐范围,从而避免连续调谐过程中出现“透射峰跳跃”的现象,保证对波长的单调调谐。实验结果与数值模拟结果非常一致,从而为确定波长有效调谐范围提供了依据。

#### 参 考 文 献

- 1 Dan Sadot, Efraim Boimovich Ben Gurion University, Tunable Optical Filters for Dense WDM Networks, *IEEE Communications Magazine*, December 1998, 50~55
- 2 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)

- 3 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)
- 4 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**: 38~40
- 5 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
- 6 Wooten E 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
- 7 Liu Jianyu, Johnson K M. Analog Smectic C \* ferroelectric liquid crystal Fabry-Perot optical tunable filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(11): 1309~1311
- 8 Wang Ning, Li Guohua, Yun Maojin. Voltage-dependent birefringence measurements of liquid crystals. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(12): 1064~1066 (in Chinese)
- 9 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Study of tunable liquid crystal filter by voltage. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(9): 1119~1122 (in Chinese)
- 10 Hirabayashi K, Kurokawa T. Tunable wavelength-selective demultiplexer using a liquid crystal filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(7): 737~740
- 11 Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T. Tunable liquid-crystal Fabry-Perot interferometer filter for wavelength-Division multiplexing communication systems. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(12): 2033~2043
- 12 Sneh A, Johnson K M. High-speed continuously tunable liquid crystal filter for WDM networks. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6): 1067~1079