

文章编号: 0253-2239(2003)05-0627-05

# 利奥型可调谐液晶电光滤波器的特性分析

云茂金<sup>1,2</sup> 李国华<sup>1</sup> 吴福全<sup>1</sup> 王 宁<sup>1</sup> 孔伟金<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 曲阜师范大学激光研究所, 曲阜 273165

(<sup>2</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

**摘要:** 根据液晶的电光效应和利奥滤波器的原理设计了利奥型液晶电光调谐滤波器, 并且从理论上和实验上证明了其可行性; 为了克服其在红外波段的缺点, 设计了法布里-珀罗腔液晶可调谐滤波器, 并且给出了理论模拟。理论模拟证明法布里-珀罗腔液晶可调谐滤波器具有调谐范围大、带宽窄的优点。

**关键词:** 光学器件; 液晶; 法布里-珀罗腔; 调谐滤波器

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

## 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、光谱分析及光通信领域中有着广泛的应用。基于不同的机制, 滤波器的种类很多, 早期采用的机械控制式滤波器、压电陶瓷光纤法布里-珀罗型可调谐滤波器具有控制电压高、响应慢等缺点。后来出现的声光可调谐滤波器曾因应用灵活、调谐范围宽成为研究的热点, 但其结构复杂、能量消耗比较高。

为克服以上缺点, Mallison<sup>[1]</sup> 于 1987 年提出液晶调谐滤波器, 因其带宽窄、能量消耗低、调谐范围宽、驱动电压低、结构简单、成本较低等一系列优点, 引起各国研究部门的关注。美国贝尔实验室以 Patel 为主的研究小组和日本光电子技术实验室以 Takashi Kurokawa 为主的研究小组在这方面作了一系列的工作, 制作出了已接近实用化的产品<sup>[2~5]</sup>。但国内在这方面的研究却很少。

本文根据利奥(Lyot)型滤波器原理, 利用北方液晶研究中心提供的液晶材料设计了利奥型液晶调谐滤波器, 并且从理论上和实验上证明了其可行性; 为了克服所设计的利奥型液晶调谐滤波器在红外波段带宽比较宽的缺点, 进一步给出了法布里-珀罗腔液晶可调谐滤波器理论模拟。理论模拟证明法布里-珀罗腔液晶可调谐滤波器具有调谐范围大, 带宽窄的优点。

## 2 理论分析

利奥型可调谐液晶电光滤波器<sup>[6,7]</sup> 是根据液晶的电光效应, 把利奥型滤波器中间的晶体改为液晶盒研制而成的, 其结构如图 1 所示: 使液晶盒平行于两偏振镜  $P_1$ 、 $P_2$ , 并且使两个偏振镜的透射光相互平行, 假设两偏振方向与  $x$  轴的夹角分别为  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ , 并在液晶盒上施加交流电场。通过对液晶施加电场使腔体介质折射率改变的方法实现对透过波长的调谐。液晶分子轴随着液晶所加电压的不同而旋转, 旋转的角度  $\alpha$  是电压  $V$  的函数, 根据折射率椭球得出入射光偏振方向上的折射率为

$$n(\alpha) = \frac{n_o n_e}{(n_o^2 \cos^2 \alpha + n_e^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}} \quad (1)$$

由此可见, 通过改变加在液晶上的电压, 来改变液晶的折射率, 从而改变液晶盒的光学腔长  $nL$  ( $L$  为液晶层的厚度), 也就实现了透射峰波长的调谐。鉴于加上电场后, 液晶分子同时具有旋光性和双折射特性, 所以我们利用液晶的琼斯矩阵<sup>[8]</sup>, 用矩阵光学的方法来计算透射光的强度。

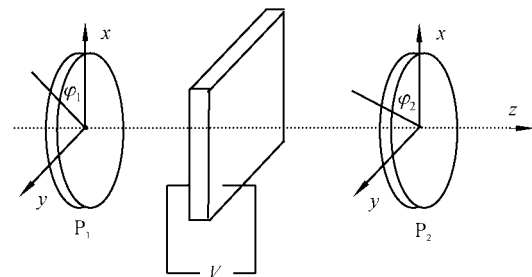


Fig. 1 Lyot tunable liquid crystal filter  
由琼斯算法可得出透射光的表达式为

E-mail: qfymj@sina.com

收稿日期: 2002-03-22; 收到修改稿日期: 2002-04-28

$$E_{\text{out}} = \mathbf{R}(\varphi_2)\mathbf{R}(-\varphi_d)\mathbf{J}(\beta)\mathbf{R}(\varphi_1)E_{\text{in}}$$

盒及  $P_1$  的琼斯矩阵:

其中  $\mathbf{R}(\varphi_2)$ 、 $\mathbf{R}(-\varphi_d)$ 、 $\mathbf{J}(\beta)$ 、 $\mathbf{R}(\varphi_1)$  分别为  $P_2$ 、液晶

$$\mathbf{R}(-\varphi_d) = \begin{bmatrix} \cos \varphi_d & -\sin \varphi_d \\ \sin \varphi_d & \cos \varphi_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos x - \frac{i\beta \sin r}{r} & \frac{\varphi_d \sin r}{r} \\ -\frac{\varphi_d \sin r}{r} & \cos x + \frac{i\beta \sin r}{r} \end{bmatrix},$$

其中

$$\beta = \pi(n_c - n_o) \frac{d}{\lambda}, \quad r = \sqrt{\varphi_d^2 + \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 + \beta^2}.$$

这样我们可以得出

$$E_{\text{out}} = \mathbf{R}(\varphi_2)\mathbf{R}(-\varphi_d)\mathbf{J}(\beta)\mathbf{R}(\varphi_1)E_{\text{in}} = \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi_2 & -\sin \varphi_2 \cos \varphi_2 \\ \sin \varphi_2 \cos \varphi_2 & \sin^2 \varphi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \times \\ \begin{bmatrix} \cos x - \frac{i\beta \sin r}{r} & \frac{\varphi_d \sin r}{r} \\ -\frac{\varphi_d \sin r}{r} & \cos x + \frac{i\beta \sin r}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos^2 \varphi_1 & -\sin \varphi_1 \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \cos \varphi_1 & \sin^2 \varphi_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}.$$

可得出透射比(利奥液晶调谐滤光片的出射光强和入射光强的比值)为

$$T = \frac{E_{\text{out}}}{E_{\text{in}}} = \left[ \frac{\pi}{2r} \sin r \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + \cos r \sin(\varphi_1 - \varphi_2) \right]^2 + \left[ \frac{\beta}{r} \sin r \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \right]^2. \quad (2)$$

由此可见通过改变电压,我们可以改变  $\beta$ 、 $r$  的值,从而改变透射峰的波长。由(2)式可以看出当  $\varphi_1 = \varphi_2 = 0$  时

$$T = (\pi/2r)^2 \sin^2 r. \quad (3)$$

据此我们可以得出  $T$  随  $\beta$  变化的理论曲线如图 2(a) 所示。

同理我们可以得出当  $\varphi_1 = 90^\circ$ ,  $\varphi_2 = 0$  或  $\varphi_2 = 90^\circ$ ,  $\varphi_1 = 0$  时

$$T = 1 - (\pi/2r)^2 \sin^2 r, \quad (4)$$

可得出其理论曲线如图 2(b) 所示。由以上两组曲线我们可以看出,在液晶光轴随电压旋转的最大角度  $90^\circ$  以内,透射比与旋转角  $\beta$  基本上成线形关系,而  $\beta$  与液晶上所加的电压有关。由此可见从理论上我们可以得到性能较好的电调谐液晶滤波器。

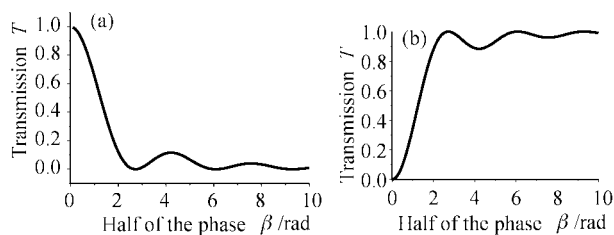


Fig. 2 Relation between  $T$  and  $\beta$

### 3 实验结果与分析

在岛津 UV-3101PC 型分光光度计的基础上搭建的测量光路如图 3 所示。测试系统有以下几个部分组成:1)光源及分光系统;2)信号检测系统;3)数据采集与处理系统。光源及分光系统有光源、会聚透镜、单色仪组成,主要是为测量提供单色光。光源为 24 V, 150 W 卤钨灯。分光仪为美国 ARC 公司生产的 SP-300 型单色仪,配有三块不同闪耀波长的光栅,光谱范围为 190 ~ 2000 nm。

图 4 为在温度为  $15^\circ\text{C}$  的条件下利用该测试系统对上述利奥型液晶可调谐滤波器进行测试的结果,图 4(a)为 400~1600 nm 的滤光情况,图 4(b)为 400~600 nm 滤光情况的放大。图 4 中的三条曲线对应频率为 1 kHz,电压分别为 0、1 V、2 V 的交流电压下该滤波器的透射比与波长的关系。由图中曲线可以看出随着电压的增大滤波器的透射峰值向短波方向移动,这与在一定的电压范围内液晶的双折射率随电压的增大而减小相吻合。由图可以看出在 400~800 nm 的波段范围内,该利奥型可调谐滤波器在可见光范围内的滤光性能较好,带宽比较窄、精细度大;而在红外波段其带宽宽、精细度小。另外由于系统在 820 nm 左右更换光栅,导致曲线不太连贯。进一步的实验证明该调谐滤波器在 0~8 V

的电压范围内其调谐范围可达到 70 nm。鉴于目前调谐滤波器在光纤通信中的重要作用及该调谐滤波

器在红外波段滤光的缺陷,我们对其做如下改进,并且给出改进后的理论模拟。

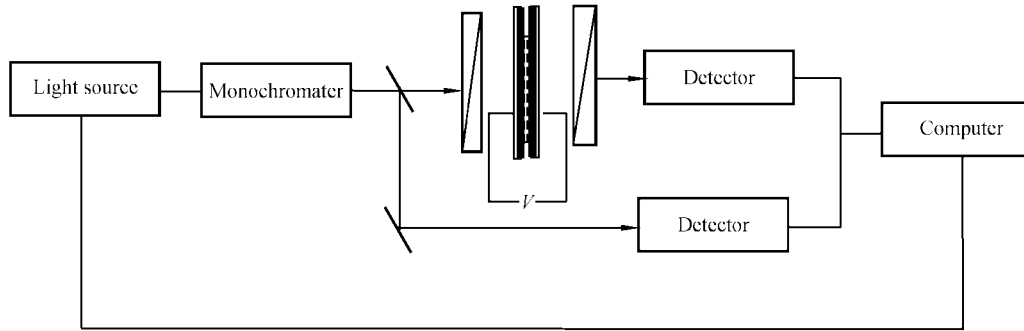


Fig. 3 Experimental setup

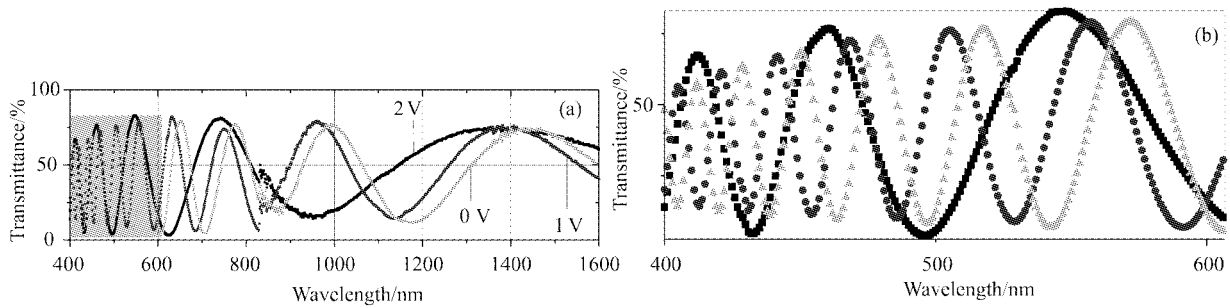


Fig. 4 Spectra of Lyot tunable liquid crystal filter under 15 °C, 0, 1 V, 2 V (▲ 0, ● 1 V, ■ 2 V)

#### 4 法布里-珀罗腔液晶调谐滤波器的理论模拟

根据以上的实验我们知道上述利奥型液晶调谐滤波器在红外波段带宽太宽,以至于其在红外波段的使用受到限制。我们知道法布里-珀罗腔对输入的非单色光起挑选波长、压缩线宽,从而提高单色性的作用。为此我们可设计法布里-珀罗腔液晶调谐滤波器,即把法布里-珀罗腔中的介质更换为液晶。如图 5 所示它有以下几部分组成:玻璃基片、氧化铟锡(ITO)透明导电电极、高反膜和液晶 LC 组成。液晶中的分子取向在外加电场的作用下重新排列。分子的取向决定了液晶的对 e 光和 o 光的折射率差,从而也就改变了法布里-珀罗腔的有效长度。对于法布里-珀罗腔液晶调谐滤波器<sup>[9~11]</sup>,其透射峰值波长满足

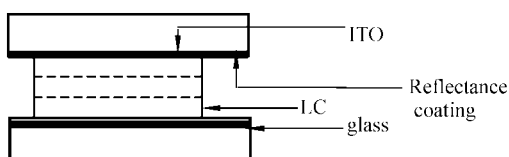


Fig. 5 Structure of Fabry-Pero liquid crystal filter

$$2nL = k\lambda, \tag{5}$$

$n$  是液晶的折射率, $L$  是法布里-珀罗腔的腔长, $k$  是整数。当在法布里-珀罗腔液晶调谐滤波器上施加电压时,随着电压的增大,液晶分子重新排列致使其非常光的折射率  $n_e$  逐渐变为寻常光的折射率  $n_o$ ,因此其透射波长的移动须满足

$$2n_e L = k\lambda_1, \quad 2n_o L = k\lambda_2. \tag{6}$$

根据法布里-珀罗腔的色分辨本领:

$$\frac{\lambda}{\delta\lambda} = \pi k \frac{\sqrt{R}}{1-R}, \tag{7}$$

知道对于同一  $k$  值而言,分束板镀银面的反射率越高其色分辨本领越大,带宽越窄。改变液晶盒的外加电压,电场将改变液晶的指向矢的方向,从而改变液晶的对 e 光和 o 光的折射率差,结果导致法布里-珀罗标准具的相位发生变化,而使另一组分立的窄带光束透过。法布里-珀罗液晶盒的透射率  $T$  可以根据多光束干涉的原理表示为

$$T = \left[ 1 + \frac{4R\sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2} \right]^{-1}, \tag{8}$$

其中, $R$  为液晶盒内侧反射膜的反射率, $\delta$  为相邻光线之间的相位差,且

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L = \frac{4\pi n L \cos \gamma}{\lambda}.$$

其中  $\gamma$  为入射角。由(8)式可以看出反射率  $R$  越大、

液晶层的厚度  $h$  越大,对比度越高,谱线越窄。

针对光纤通信波长 1300~1600nm,我们来设计法布里-珀罗液晶电光调谐滤波器的参量。根据式(8)可知两个相邻的透射峰值之间的相位差为  $2\pi$ 。如果只用一个模式来调谐覆盖整个光纤通信的波段范围,需要极大的对 e 光和 o 光的折射率差,而根据以前测量液晶的对 e 光和 o 光的折射率差的实验可以看出  $\Delta \leq 0.3$ 。因此为了达到在整个波段范围内调谐的目的,必须设计多模的法布里-珀罗腔。

根据(5)式其透射峰值须满足

$$2nL = k\lambda.$$

在不施加外场的条件下,设  $\lambda_1 = 1600 \text{ nm}$  为该滤波器的最大透射波长,则有

$$2n_e L = k\lambda_1. \quad (9)$$

设  $\lambda_2$  为透射的第  $k+1$  个透射波,有

$$2n_e L = (k+1)\lambda_2. \quad (10)$$

当施加的外加电场使液晶分子的指向矢转过  $90^\circ$  时,e 光变为 o 光,则有 ( $\lambda_3 \leq \lambda_2$ )

$$2n_o L = k\pi\lambda_3. \quad (11)$$

根据(9)式、(10)式、(11)式可以得出

$$n_e/n_o = \lambda_1/\lambda_3, \quad \lambda_1/\lambda_2 = k+1/k.$$

对于我们所用的液晶材料有  $n_e/n_o = 1.2$ ,于是  $k+1/k \leq n_e/n_o = 1.2$  得出  $k \geq 5, d \geq 3 \mu\text{m}$ 。根据法布里-珀罗腔的原理知道,腔长越长对比度越高,谱线越窄,所以我们取  $d=10 \mu\text{m}$ 。假设  $R=95\%$ 。根据其透射比公式我们可以用计算机模拟该调谐滤波器在 1300~1600 nm 的滤光情况。图 6(a)中 a 为所设计的法布里-珀罗液晶调谐滤波器在不施加外场的情况下(或电压小于 0.8 V 的情况下)的滤光情况,此时对应非常光的折射率为 1.8,非常光与寻常光的折射率之差最大,由图可以看出该条件下 1550 nm 的光完全被截止。在 1300~1600 nm 的波段范围内有 5 个模式,对应的峰值波长分别为 1564 nm、1499 nm、1439 nm、1384 nm、1333 nm。

当在法布里-珀罗液晶调谐滤波器上施加外场,其对 e 光和 o 光的折射率差改变,当其非常光的折射率变为 1.55 时,其透光情况如图 6(a)中 2 所示,在此状态下有 4 个峰值波长分别为 1550 nm、1475 nm、1408 nm、1347 nm。因为施加电场后,随着电压的增加液晶的对 e 光和 o 光的折射率差减小,对应的峰值波长由不加电压时的波长向短波方向移动。原来的峰值波长 1564 nm 移动到 1550 nm,1499 nm 移动到 1475 nm,1439 nm 移动到 1408 nm,

1384 nm 移动到 1347 nm,1333 nm 移动到小于 1300 nm 的波段内。此时光纤通信的主要波长 1550 nm 有较高的透射比,对应的半峰全宽为 2 nm,透射率为 20% 时,线宽为 3 nm。

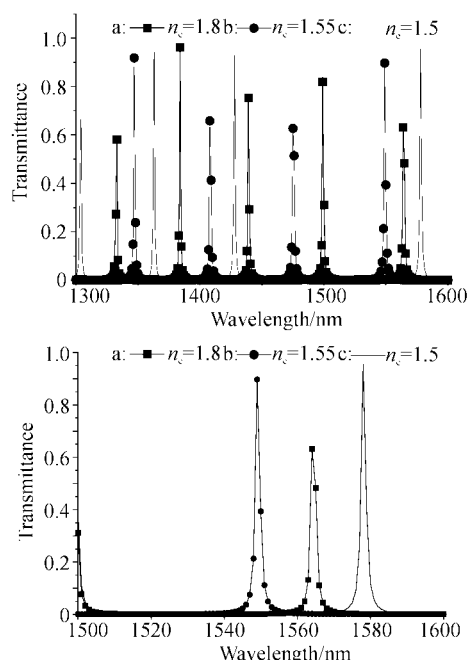


Fig. 6 The ideal spectra of Fabry-Pero tunable liquid crystal filter

图 6(a)中 3 为外加电场使液晶分子转过  $90^\circ$ ,非常光变为寻常光,对应折射率变为 1.5(对应液晶的对 e 光和 o 光的折射率差最小)时的滤光情况,我们可以看出此时又恢复为 5 个模式,对应的峰值波长为 1578 nm、1499 nm、1428 nm、1363 nm、1304 nm。其中 1578 nm 的模式是由于电压的变化从 1600 nm 以外的波段范围内移来的。图 6(b)中三条图线对应波长范围为 1500~1600 nm 时所设计的法布里-珀罗液晶调谐滤波器的滤光曲线。

**讨论** 由上面的理论模拟可以看出,由于外加电压的增加,使液晶的对 e 光和 o 光的折射率差不断减小,直到非常光变为寻常光,此时再增加电压对 e 光和 o 光的折射率差也不会改变。对应的可调谐范围也达到最大,在电压由最小到最大的过程中 1564 nm 的模移动到 1499 nm,其调谐范围为 65 nm,同理 1499 nm 的移动了 71 nm,1439 nm 的模移动了 76 nm,1384 nm 的模移动了 80 nm,因此通过上面的模拟我们可以计算出所设计的法布里-珀罗液晶电光调谐滤波器的平均调谐范围可达 73 nm,并且带宽都比较窄,在几纳米的范围内。在设计法布里-

珀罗液晶调谐滤波器的过程中为了减小线宽而增大了腔长,但这时也带来了另一缺点:腔长的增加致使其响应速度变慢。因此我们可以在腔长较小的情况下增加内表面的反射率达到减小线宽的目的。

法布里-珀罗液晶电光调谐滤波器可以通过改变氧化铟锡的形状作为解复用器用于光纤通信中的波分复用系统及密集波分复用系统<sup>[12]</sup>,为实现其解复用功能,氧化铟锡透明电极可被处理成条状;另外根据法布里-珀罗液晶电光调谐滤波器响应速度快、调谐范围宽、控制电压低等优点,也可用于制作可调谐光源<sup>[13]</sup>,并且该调谐光源具有谐振腔短的优点。由此可见,法布里-珀罗液晶调谐滤波器在光纤通信中有一定的应用前景。

### 参 考 文 献

- 1 Mallison S. Wavelength-selective filters for single-mode fiber WDM systems using Fabry-Perot interferometer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3):430~436
- 2 Patel J S, Macceda M W. Tunable polarization diversity liquid crystal wavelength filter. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 1991, **3**(8):213~215
- 3 Staromlynska J. Electrooptic broadband tunable filters using liquid crystals. *J. Modern Opt.*, 1990, **37**(4):639~652
- 4 Scymour R S, Rees S M. Design considerations for a liquid crystal Lyot filter for laser bathymetry. *Opt. Engng.*, 1994, **33**(3):915~923
- 5 Wu Shin-Tson. Design of a liquid crystal based electrooptic filter. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(1):48~52
- 6 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Ning. Research in electro-optical tunable liquid crystal filter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(8) (in Chinese)
- 7 Yun Maojin, Li Guohua, Kong Yong. Tunable liquid crystal filter used for line selection of Ar<sup>1</sup> laser. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2002, **A29**(2):135~137 (in Chinese)
- 8 Chen Huaixin, Wei Honggang. A controllable array fresnel zone plates using liquid crystal spatial light modulator. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2001, **30**(5):562~566 (in Chinese)
- 9 Patel J S, Lee Sin-Doo. Electrically tunable and polarization insensitive FP etalon with a Liquid crystal film. *Apply. Phys. Lett.*, 1991, **58**(22):2491~2493
- 10 Hirabayshi H, Tsuda H, Kurokawa T. Narrow band tunable wavelength-selective filters of FP interferometers with a liquid crystal intracavity. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 1991, **3**(3):213~215
- 11 Matsumoto S, Hirabayshi K, Sakata S *et al.*. Tunable wavelength filter using nano-sized droplets of liquid crystal. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 1999, **11**(4):442~444
- 12 Maeda M W, Patel J S, Lin Chinlon *et al.*. Electronically tunable liquid crystal etalon filter for high-density WDM systems. *IEEE Photo Technol. Lett.*, 1990, **2**(11):820~822
- 13 Tsuda H, Hirabayashi K, Tohmori Y *et al.*. Tunable light source using a liquid crystal Fabry-Perot interferometer. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 1991, **3**(6):504~506

## Characteristics of Lyot Tunable Liquid Crystal Filters

Yun Maojin<sup>1,2</sup> Li Guohua<sup>1</sup> Wu Fuquan<sup>1</sup> Wang Ning<sup>1</sup> Kong Weijin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laser Research Institute of Qufu Normal University, Qufu 273165

<sup>2</sup> Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800

(Received 22 March 2002; revised 28 April 2002)

**Abstract:** According to the electro-optic effect of liquid crystal and the theory of Lyot filter, the tunable liquid crystal filter is designed. Its feasibility is tested theoretically and experimentally. In order to overcome its disadvantages in infrared band, Fabry-Pérot tunable liquid crystal filter is designed and its analogue is given. It is proved that the Fabry-Pérot tunable liquid crystal filter has great tuning range and narrow band.

**Key words:** optical device; liquid crystal; Fabry-Pérot cavity; tunable filter