

文章编号 : 0253-2239(2002)09-1119-04

# 电压调谐液晶滤光片的研究

云茂金 李国华 王 宁

(曲阜师范大学激光所, 曲阜 273165)

摘要: 对以液晶为腔内物质的液晶法布里-珀罗调谐滤光片进行了改进, 在原来法布里-珀罗腔的两侧各加一偏振镜, 使两个偏振镜的起偏方向平行, 并且偏振方向都相对于液晶分子长轴的方向成  $45^\circ$  角, 入射光经多光束干涉后再经偏光干涉, 导出其透射峰满足的条件为  $2(n_{//} - n_{\perp})L\cos\theta = m\lambda$ , 这样便克服了原有调谐滤光片两套光谱难以区分的缺点。对改进后的滤光片进行测试, 在 1550 nm 附近对该电调谐滤光片的滤光特性做了细致的分析。

关键词: 液晶; 调谐滤光片; 法布里-珀罗干涉仪

中图分类号: O753+.2 文献标识码: A

## 1 引 言

未来光通信中的光波分复用、频分复用技术将极大提高光纤传输系统的速率及容量。滤光片作为其中的关键部件, 成为各国研究的热点。基于不同的机制, 滤光片的种类很多, 早期采用的机械控制式滤光片、压电陶瓷光纤法布里-珀罗型可调谐滤光片具有控制电压高、响应慢等缺点<sup>[1]</sup>。后来出现的声光可调谐滤光片曾因应用灵活、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<sup>[2]</sup>。为克服以上缺点, Mallison 于 1987 年提出以液晶为腔内物质的液晶法布里-珀罗滤光片<sup>[3~5]</sup>, 其因带宽窄、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 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。本文对传统的液晶法布里-珀罗滤光片的特性进行分析并予以改进。

## 2 液晶法布里-珀罗滤光片的原理

法布里-珀罗滤光片的原理<sup>[6]</sup>如下: 图 1 为一法布里-珀罗标准具, 三种介质由两个平行的部分反射镜分开, 从而形成一个波长可选择的法布里-珀罗腔。与左边镜子的法线成  $\theta$  角的入射光部分透过镜子, 然后向右传播的光束在右边镜子处部分透射、

部分反射。此后从右边镜子来的反射光还要在左边镜子处部分反射部分透射。从左边镜子来的新的反射光又要在右边镜子处部分透射、部分反射。此过程一直持续下去, 最后在右边镜子处有无限多的透射光。所有这些透射光是彼此相干的。这些光彼此之间相同的光程差, 如果彼此对应的相位差为  $2\pi$  的整数倍, 则透射后彼此相干相加, 所以这些光将发送出去。反之, 则相干相消, 只有极少数的光能量通过滤光片传输出去。所以所有光必须处于同相, 即在腔内往返一次的传播距离是波长的整数倍。即

$$2nL\cos\theta = m\lambda, \quad (1)$$

由 (1) 式可知当  $m$  值确定之后, 确定满足相位条件的具有峰值透射波长的因素有三个,  $m$  (腔内介质折射率)  $L$  (腔长)  $\theta$ , 因此调节改变这三个量即可达到波长调谐的目的。

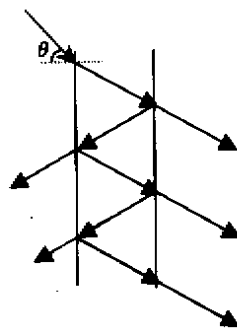


Fig. 1 Fabry-Pero cavity

电压调谐液晶滤光片采用在法布里-珀罗腔内注入液晶作为腔内介质(图 2), 通过对液晶施加电场使腔内介质折射率改变的方法实现对透过波长的调谐。鉴于向列相液晶的分子排列的特点和强烈的

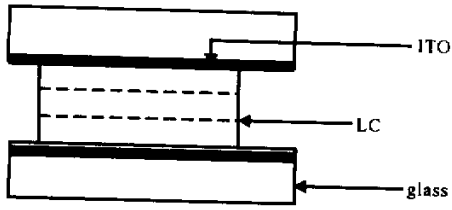


Fig.2 Liquid crystal tunable filter

电控双折射特性,我们实验所用的液晶调谐滤光片<sup>[7]</sup>以其为材料。向列相液晶由长径比很大的丝状分子所组成,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,且分子长轴方向上保持相互平行或近于平行<sup>[8]</sup>。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特性。无外电场作用时,液晶分子沿法布里-珀罗腔平面排列,其分子长轴沿  $x$  方向(图3),与入射光的传播方向垂直,平行于分子长轴方向的折射率为  $n_{//}$ ,垂直方向的折射率为  $n_{\perp}$ 。首先将入射光调节为线偏振光,并使其偏振方向平行于  $x$ ,此时入射光对应的折射率为  $n_{//}$ ,当  $y$  方向施加电场时,液晶分子在电场的作用下向电场方向偏转,偏转的角度  $\alpha$  与外电场的有效电压成比例增长,根据折射率椭球得出入射光偏振方向上的折射率为  $n(\alpha) = n_{//} n_{\perp} / (n_{\perp}^2 \cos^2 \alpha + n_{//}^2 \sin^2 \alpha)^{1/2}$ 。(2)由此可见,通过改变加在液晶上的电压,来改变液晶的双折射率,从而改变法布里-珀罗腔的光学腔长。即可实现透射光波长调谐。

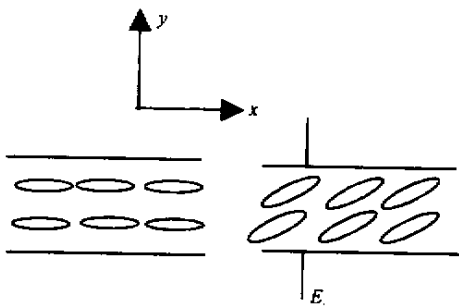


Fig.3 Structure of neumatic liquid crystal

根据法布里-珀罗滤光片原理中所述的公式  $2nL\cos\theta = m\lambda$ ,对液晶等双折射晶体来说同一  $m$  值应该有两套光谱,分别为

$$2n_{//} L\cos\theta = m\lambda_{//}, \quad (3)$$

$$2n_{\perp} L\cos\theta = m\lambda_{\perp}, \quad (4)$$

而两者( $\lambda_{//}$ 、 $\lambda_{\perp}$ )的峰值相差很小,所以很难区分。

为此,对上述液晶调谐滤光片进行如下改进:在上述液晶法布里-珀罗腔的两侧各放一偏振镜,使两

个偏振镜的起偏方向平行,并且偏振方向都相对于液晶分子长轴的方向成  $45^\circ$  角,这样入射光经多光束干涉后再经偏光干涉(图4)。

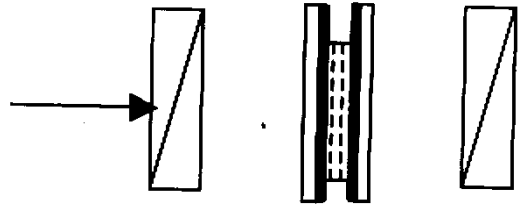


Fig.4 Improved filter

根据多光束干涉的理论<sup>[6]</sup>,所有透射的  $o$  光的合成振幅和  $e$  光的合成振幅可以分别表示为

$$U_{To} = \frac{At't}{1 - r^2 \exp(j\delta_1)},$$

$$U_{Te} = \frac{At't}{1 - r^2 \exp(j\delta_2)},$$

其中  $t$  和  $t'$  分别为的两个表面的振幅透射率,  $r$  为反射率,  $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别表示透过的平行于分子长轴方向的光和垂直方向光的相位差,  $A$  为入射光振幅。根据法布里-珀罗腔的干涉原理得知

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{//} L\cos\theta = 2m\pi,$$

$$\delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_{\perp} L\cos\theta = 2m\pi,$$

所以可得出  $U_{To} = U_{Te} = At't(1 - r^2)$ ,合成后的两束光经过检偏镜,符合干涉条件,所以再经双光束干涉,可得其强度为

$$I = I_0 c \sin^2(\delta_i/2), \quad (5)$$

其中  $I_0 = A^2$ ,  $c = \left(\frac{t't}{1 - r^2}\right)^2$ ,  $\delta_i = 2\pi(n_{//} - n_{\perp})d/\lambda_i$ ,  $\lambda_i$  表示入射光的真空波长,  $\delta_i$  为与  $\lambda_i$  对应的相位差。

从理论上可以看出改进型的滤光片的透射峰满足的条件为

$$2(n_{//} - n_{\perp})L\cos\theta = m\lambda. \quad (6)$$

这样便把原来对应于  $n_{//}$ 、 $n_{\perp}$  的两套光谱转变为对应于  $n_{//} - n_{\perp}$  的一套光谱,从而克服原有调谐滤光片两套光谱( $\lambda_{//}$ 、 $\lambda_{\perp}$ )难以区分的缺点。

我们利用偏光干涉法在温度为  $27^\circ\text{C}$  时,将液晶置于频率为  $1000\text{ Hz}$  的交流电场中,垂直入射光波长为  $560\text{ nm}$ ,测量了本文所用的实验材料向列相液晶 BL-009 的非常光折射率与寻常光折射率的差值随外加电压的变化情况(如图5)。由此可见液晶的电控双折射最大的优点是:控制电压低,电压的微小

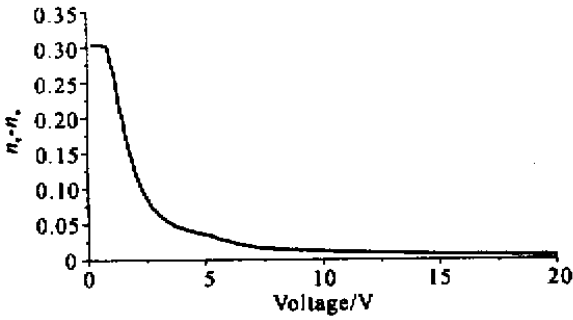


Fig.5 Voltage-dependent birefringence of BL-009 liquid crystal  $\lambda = 560 \text{ nm}$  ;LC cell excitation-sine wave , 1 kHz ; temperature  $T = 27 \text{ }^\circ\text{C}$  ;thickness of liquid crystal layer  $d = 11 \text{ }\mu\text{m}$

变化(0.8 V ~ 4 V),即可引起双折射率的很大变化。所以 根据液晶的电控双折射效应制成的液晶调谐滤光片有调节方便、能量损耗小的优点。

### 3 实验研究

在岛津 UV-3101PC 型分光光度计的基础上搭建如下测量光路(图 6),测量改进的电调谐液晶滤光片的有关性质。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。

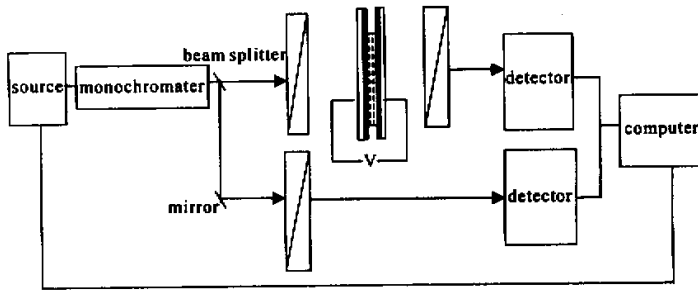


Fig.6 Experimental setup

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,配有三块不同的闪耀波长的光栅,光谱范围为 190 nm ~ 2000 nm。信号检测系统采用 ARC 公司生产的光电倍增管,工作于光伏模式。数据采集系统通过计算机配以相应的软件实现。

随着掺铒光纤放大器的广泛应用,1550 nm 远距离光纤通信系统的应用越来越广泛,为此我们研究该调谐滤光片在 1500 nm ~ 1600 nm 的波段范围内的滤光情况。实验测得在频率为 1 kHz,电压为 1.6 V 的交流电时该液晶调谐滤光片 1500 nm ~ 1600 nm 的波段范围内滤光情况如图 7 所示。

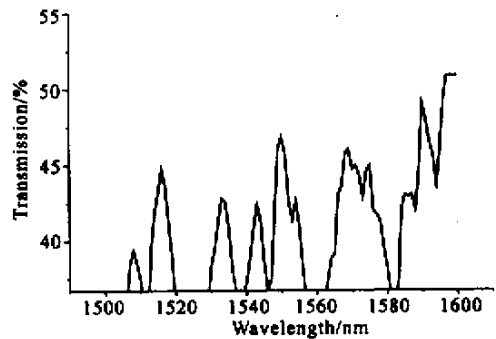


Fig.7 Relation between transmission and wavelength under 28 °C , 1.6 V

由图 7 我们可以看出在 1528 nm ~ 1556 nm 的波段范围内,其滤光性能较好,在这个波段范围内有三个峰值波长,分别是 1533 nm、1543 nm、1552 nm。自由波谱范围(FSR)约为 10 nm,其中以 1552 nm 波长的透射率最高,我们还可以得出在此通带的半峰全宽(FWHM)为 3 nm。从而其精细度  $F = 10 \text{ nm}/3 \text{ nm} = 3.3$ 。

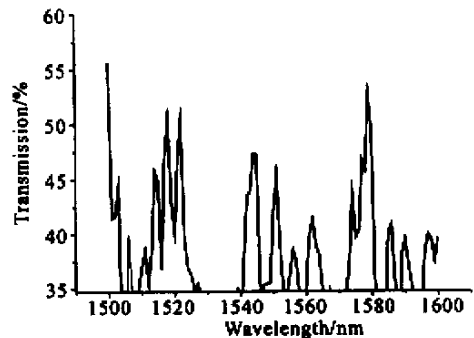


Fig.8 Relation between transmission and wavelength under 28 °C , 1.9 V

当在液晶上加频率为 1 kHz,电压为 1.9 V 的交流电时,由图 8 我们可以看出在 1540 nm ~ 1564 nm 的波段范围内,该滤光片的特性较好,有四

个透射峰值。其峰值波长分别为 1544 nm、1551 nm、1556 nm、1562 nm,自由光谱范围(FSR)

约为 6 nm, 该自由光谱范围内以 1551 nm 为中心波长的通带最窄, 其全峰半宽约为 1.5 nm, 从而其精细度为  $F = 6 \text{ nm} / 1.5 \text{ nm} = 4$ 。

当在液晶上加频率为 1 kHz, 电压为 2.3 V 的交流电时, 由图 9 我们可以看出在 1552 nm ~ 1584 nm 的波段范围内, 该滤光片的特性很好, 两个峰值波长分别为 1554 nm、1580 nm, 自由光谱范围 (FSR) 约为 26 nm。该自由光谱范围内以 1554 nm、1580 nm 为中心波长的通带的全峰半宽约为 2 nm, 从而其精细度为  $F = 26 \text{ nm} / 2 \text{ nm} = 13$ 。

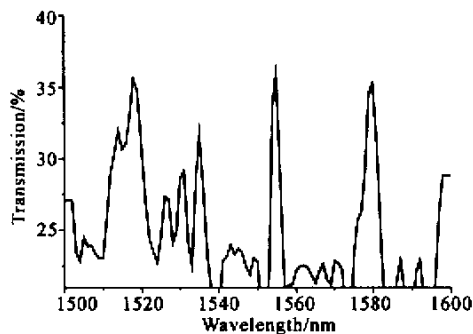


Fig. 9 Relation between transmission and wavelength under 28 °C, 2.3 V

结论 由以上实验我们可以看出, 该调谐滤光片的透射峰值波长随外加电压的变化而变化。并且当该调谐滤光片所加电压有频率为 1 kHz, 电压为 2.3 V 的交流电时, 在 1550 nm 附近该滤光片的滤光特性很好, 两个峰值波长分别为 1554 nm、1580 nm, 自由光谱范围 (FSR) 约为 26 nm, 其精细度可达 13。由

此可见电压的微小变化即可实现透射峰值波长的移动, 进一步的研究证明电压在 0 ~ 8 V 之内其调谐范围可达几十纳米, 并且带宽较窄。

鉴于液晶受温度、电场、磁场的影响较大, 该实验的重复性不是很好, 另外其透射率偏低, 最高透射率在 45% 左右。

## 参 考 文 献

- [1] Hirabayashi K, Tsuda H, Kurokawa T. Narrow band tunable wavelength-selective filters of FP interferometers with a liquid crystal intracavity. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **3**(3) 213 ~ 215
- [2] 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
- [3] Patel J S, Maceda M W. Tunable polarization diversity liquid crystal wavelength filter. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(8) 213 ~ 215
- [4] Patel J S, Lee S D. Electrically tunable and polarization insensitive FP etalon with a liquid crystal film. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, **58**(22) 2491 ~ 2493
- [5] Matsumoto S, Hirabayashi K. Tunable wavelength filter using nano-sized droplets of liquid crystal. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(4) 442 ~ 444
- [6] Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* (光学). Beijing: Publishing House of Beijing University, 1984. 330 (in Chinese)
- [7] Li Guohua, Pang Yantao. Study of tunable liquid crystal filter. *J. Optoelectronics · Laser*, 2001, **12**(2): 141 ~ 143
- [8] Shen Ruilin, Song Kai, Zhang Yangan *et al.*. Experimental investigation of a liquid crystal etalon filter. *Chinese J. Laser*, 1997, **24**(1) 41 ~ 45

## Study of Tunable Liquid Crystal Filter by Voltage

Yun Maojin Li Guohua Wang Ning

( Laser Research Institute of Qufu Normal University, Qufu 273165 )

( Received 4 September 2001 ; revised 7 December 2001 )

**Abstract:** An improvement to the traditional Fabry-Perot tunable liquid crystal filter which makes liquid crystal as the intracavity dielectric layer is presented. Placing one polarizer on each side of the filter, and the angle between optical axis of the two paralleled polarizers and the molecular major axis of liquid crystal is 45°. The incident beam first generates multiple-beam interference, then polarized beam interference. It is concluded that the resonance wavelength is given by  $2(n_{\parallel} - n_{\perp})L \cos\theta = m\lambda$ . So the disadvantage that the two spectra can't be distinguished of the traditional Fabry-Perot tunable liquid crystal filter is overcome. Near 1550 nm, the characteristics of this tunable filter is analysed under 1.6 V, 1.9 V, 2.3 V.

**Key words:** liquid crystal; tunable filter; Fabre-Perot interferometer