

文章编号: 0258-7025(2003)Supplement-0046-03

# 电光液晶调谐滤波器的研究

云茂金, 李国华, 王宁

(曲阜师范大学激光所, 山东 曲阜 273165)

**摘要** 根据液晶的电光效应和 Lyot 滤波器的原理设计了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, 在 1550 nm 附近对该调谐滤波器在同一频率为 1 kHz, 电压分别为 1.6 V, 1.9 V, 2.3 V 情况下的滤光特性作了细致的分析。

**关键词** 液晶; 调谐滤波器; 法布里-珀罗干涉仪

**中图分类号** O753+.2; TN713 **文献标识码** A

## Research in electro-Optical Tunable Liquid Crystal Filter

YUN Mao-jin, LI Guo-hua, WANG Ning

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

**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 by the theory and experiment. The character of this tunable filter under 1.6 V, 1.9 V, 2.3 V is analyzed.

**Key words** liquid crystal; tunable filter; F-P interferometer

## 1 引言

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 F-P 型可调谐滤波器具有控制电压高、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<sup>[2]</sup>。为克服以上缺点, Mallison 于 1987 年提出以液晶为内腔物质的液晶法布里-珀罗滤波器<sup>[3-5]</sup> (Liquid crystal Fabry-Perot Filter), 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 J. S. 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。本文对传统的液晶法布里-珀罗滤波器的特性进行分析并给予改进。

## 2 液晶法布里-珀罗滤波器的原理

根据 F-P 滤波器的原理<sup>[6]</sup>知道透射波长须满足

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

其中,  $n$  为腔内介质的折射率,  $L$  为腔长,  $\theta$  为入射角。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比波长的因素有三个,  $n, L, \theta$ , 因此调节改变这三个量即可达到波长调谐的目的。

电调谐液晶滤波器采用在法布里-珀罗腔内注入液晶作为腔内介质(如图 1), 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。鉴于向列相液晶的分子排列的特点和强烈的电控双折射特性, 实验所用的液晶调谐滤波器<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, 在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 F-P 腔平面排列, 其分子长轴沿水平方向, 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

作者简介: 云茂金(1975-), 男, 山东高唐人, 曲阜师范大学激光所获硕士学位, 现为中国科学院上海光学精密机械研究所博士研究生, 研究方向为星际光通信。E-mail: qfymj@sina.com

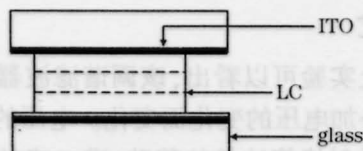


图1 液晶调谐滤光片

Fig.1 Liquid crystal tunable filter

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  $n$ , 当竖直方向施加电场时, 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

$$n(\alpha) = n n_1 / (n_1^2 \cos^2 \alpha + n^2 \sin^2 \alpha)^{1/2} \quad (2)$$

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 F-P 腔的光学腔长。即可实现透射光波长调谐。

根据(1)式, 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

$$2n L \cos \theta = m \lambda, \quad (3)$$

$$2n_1 L \cos \theta = m \lambda_1 \quad (4)$$

而两者 ( $\lambda, \lambda_1$ ) 的峰值相差很小, 所以很难区分。对此, 对上述液晶调谐滤波器进行如下改进, 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, 并且偏振方向都与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。根据多光束干涉的理论<sup>[6]</sup>, 所有透射的  $o$  光的合振幅和  $e$  光的合振幅可以分别表示为

$$U_o = At't/(1-r^2 e^{i\delta_1}), \quad U_e = At't/(1-r^2 e^{i\delta_2})$$

其中  $t$  和  $t'$  分别为两个表面的振幅透射比,  $r$  为反射比,  $\delta_1, \delta_2$  分别表示透过的平行于分子长轴方向光和垂直方向光的位相差, 根据 F-P 腔的干涉原理得知

$$\delta_1 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n L \cos \theta = 2m\pi, \quad \delta_2 = \frac{2\pi}{\lambda} 2n_1 L \cos \theta = 2m\pi$$

所以可得出  $U_o = U_e = At't/(1-r^2)$ , 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, 可得其透射光强为

$$I = I_0 \cos^2(\delta_j/2) \quad (5)$$

其中  $I_0 = A^2, c = [t't/(1-r^2)]^2, \delta_j = 2\pi(n - n_1)d/\lambda_j$ 。

从理论上可以看出改进型的滤波器的透射峰满足的条件为: 单色仪

$$2(n - n_1)L \cos \theta = m \lambda \quad (6)$$

这样便把原来对应于  $n - n_1$  的两套光谱转变为对应于  $n - n_1$  的一套光谱, 从而克服原有调谐滤波器两套光谱 ( $\lambda, \lambda_1$ ) 难以区分的缺点。

### 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 2), 测量改进的液晶电调谐滤波器的有关性质。测试系统由光源及分光系统、信号检测系统、数据采集与处理系统 3 部分组成。

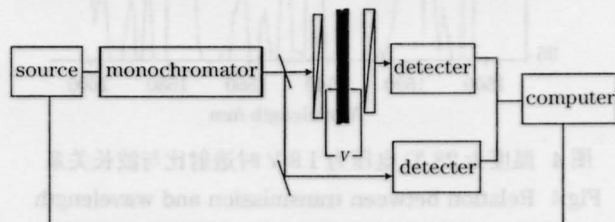


图2 实验装置图

Fig.2 Experiment setup

目前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, 为此我们主要研究该调谐滤波器在 1500~1600 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波器在 1500~1600 nm 波段范围内的滤光情况如图 3 所示。

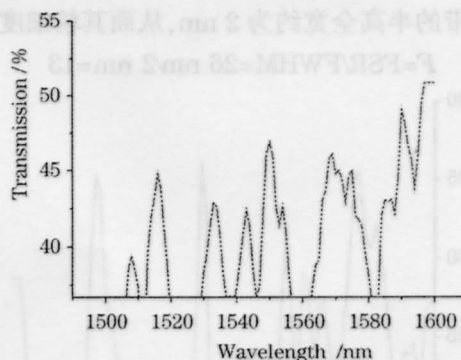


图3 温度为 28 °C, 电压 1.6 V 时透射比与波长的关系

Fig.3 Relation between transmission and wavelength under 28 °C, 1.6 V

由图 3 可以看出在 1528~1556 nm 的波段范围内, 其滤光性质较好, 在这个波段范围内有 3 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 波长的透射比最高, 我们还可以得出在此通带的半高全宽(FWHM)为 3 nm。从而其精细度

$$F = \text{FSR}/\text{FWHM} = 10 \text{ nm}/3 \text{ nm} = 3.3$$

当在液晶上加频率为 1 kHz, 电压为 1.9 V 的交流电时, 由图 4 可以看出在 1540~1564 nm 的波段范围内, 该滤波器的特性较好, 有 4 个透射峰值。其峰值波长分别为 1544 nm, 1551 nm, 1556 nm, 1562 nm, 自由波谱范围(FSR)约为 6 nm, 该自由波谱范

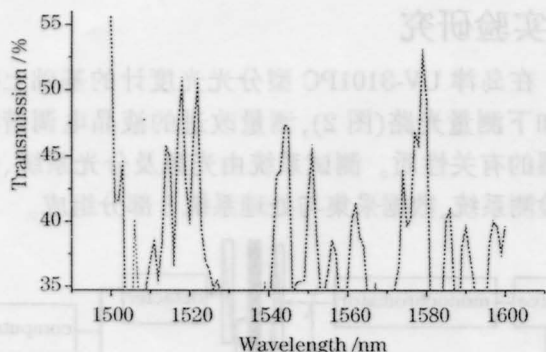


图4 温度为 28 °C,电压为 1.9 V 时透射比与波长关系

Fig.4 Relation between transmission and wavelength under 28 °C, 1.9 V

围内以 1551 nm 为中心波长的通带最窄,其半高全宽约为 1.5 nm,从而其精细度为

$$F = \text{FSR}/\text{FWHM} = 6 \text{ nm}/1.5 \text{ nm} = 4$$

当在液晶上加频率为 1 kHz,电压为 2.3 V 的交流电时,由图 5 可以看出在 1552~1584 nm 的波段范围内,该滤波器的特性很好,两个峰值波长分别为 1554 nm,1580 nm,自由波谱范围(FSR)约为 26 nm 该自由波谱范围内以 1554 nm,1580 nm 为中心波长的通带的半高全宽约为 2 nm,从而其精细度为

$$F = \text{FSR}/\text{FWHM} = 26 \text{ nm}/2 \text{ nm} = 13$$

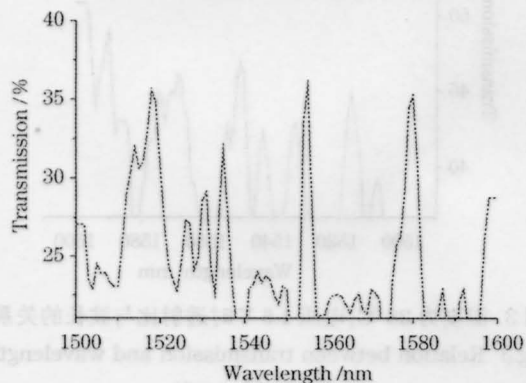


图5 温度为 28 °C,电压为 2.3 V 时透射比与波长关系

Fig.5 Relation between transmission and wavelength under 28 °C, 2.3 V

## 4 结论

由以上实验可以看出,该调谐滤波器的透射峰值波长随外加电压的变化而变化。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,另外其透射比偏低,最高透射比在 45%左右。

## 参考文献

- 1 Katsubhiko Hirabayshi, Hiroyuki Tsuda, Takashi Kurokawa. Narrow band tunable wavelength-selective filters of FP interferometers with a liquid crystal intracavity[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 3(3): 213-215
- 2 K. W. Cheung, M. M. Choy, H. Kobrinski. Electronic wave-length tuning using acousto-optic tunable filter with broad continuous tuning range and narrow channel spacing[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1989, 1(1):38-40
- 3 J. S. Patel, M. W. Maceda. Tunable polarization diversity liquid crystal wavelength filter[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, 3(8):213-215
- 4 J. S. Patel, Sin-Doo Lee. Electrically tunable and polarization insensitive FP etalon with a Liquid crystal film[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1991, 58(22):2491-2493
- 5 Shiro Matsumoto, Katsuhiko Hirabayashi. Tunable wavelength filter using nano-sized droplets of liquid crystal[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, 11(4): 442-444
- 6 Zhao Kaihua, Zhong Xihua. *Optics* [M]. Beijing: Publishing Hhouse of Beijing University, 1984.330
- 7 Li Guohua, Pang Yantao. Study of tunable Liquid crystal filter[J]. *J. Optoelectronics·Laser*(光电子·激光), 2001, 12(2):141-143 (in Chinese)
- 8 Shen Ruilin, Song Kai. Experimental Investigation of a liquid crystal etalon filter[J]. *Chinese J. Laser* (中国激光), 1997, A24(1):41-45 (in Chinese)