

## 液晶损耗对可调谐液晶光学滤波器性能的影响

张爱玲, 丁 镭, 张铁群, 郭转运

**摘 要:** F-P型可调谐液晶光学滤波器是一种小体积窄带宽低压调谐滤波器。液晶作为腔内工作物质, 其损耗对器件的性能有重要的影响。文章以F-P干涉仪为基础, 分析了液晶损耗对这类滤波器的半强度带宽(FWHM)和峰值透过率的影响, 以利于不同要求的滤波器的设计制作。

**关键词:** 可调谐液晶光学滤波器; 液晶; 液晶损耗

**中图分类号:** TN713; TN873.93 **文献标识码:** A

### Effect of liquid crystal loss on tunable liquid crystal optical filter

ZHANG Ai-ling, DING Lei, ZHANG Tie-qun, GUO Zhuan-yun  
(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** The F-P type tunable liquid crystal (LC) optical filter is a kind of compact tunable filter with narrow bandwidth and low tuning voltage. The loss of LC, which is used as work substance in the cavity, has great effects on the characteristics of this device. The influence of the loss of LC on the peak transmissivity and bandwidth (FWHM) of the device is emphatically analyzed based on F-P interferometer, so that different kinds of filters can be designed.

**Keywords:** tunable LC optical filter; liquid crystal; loss of LC

## 1 引言

光学测量系统中, 广泛采用分光或滤波技术。棱镜、光栅、各种滤光片、甚至整个光谱仪的工作都可看作是一种光学滤波过程。信息光学和光谱技术的发展对相应的滤波技术不断提出新的要求。新型滤波器件的出现, 也会促进光学频段谱测量技术进一步的发展。如光纤通信中信道分离就要求一种高性能的窄带梳型滤波器, 而小型窄带可调谐滤波器的实现, 也使得小型便携式光谱仪成为可能。

液晶光学滤波器是一种体积较小的滤波器。这种可调谐光学滤波器在最近几年已有报道<sup>[1~4]</sup>, 它的F-P腔结构使其能实现窄的带宽, 同时, 液晶折射率对外加电压的敏感性, 又使它可以实现低电压调谐。小体积、低电压、低功耗等优点使这种滤波器将在传感技术和谱测量仪器小型化方面进一步得到应用。

液晶损耗是影响这种光学滤波器特性的因素之一<sup>[5]</sup>。本文以F-P干涉仪为基础, 讨论了液晶损耗对这种滤波器的透过率、半强度带宽等参数的影响, 可作为不同性能滤波器设计制作时的参考。

## 2 滤波器的结构与工作原理

可调谐液晶光学滤波器是利用液晶作为工作物质的F-P干涉仪。它由两块内侧依次镀有透明导电膜、高反膜、定向膜的平板玻璃平行放置构成。在F-P腔内充有液晶，导电膜有电极引出，可以在液晶两端加电压，如图1所示。

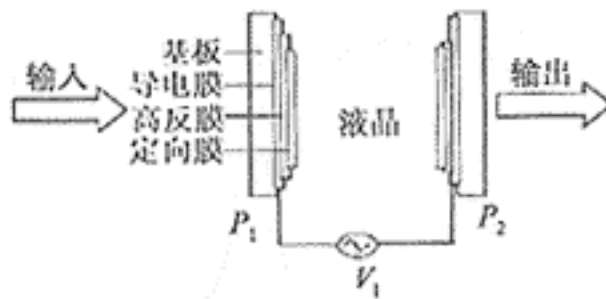


图1 滤波器的结构  
Fig.1 Structure of the filter

当光束照射到该滤波器上时，由于高反膜的作用，使得光在F-P腔内多次反射，形成了多光束干涉，入射光正入射时，相邻两束光的位相差为

$$\delta = \frac{4\pi nd}{\lambda} \quad (1)$$

式中， $n$ 为F-P腔内工作物质（液晶）的折射率， $d$ 为F-P腔的腔长， $\lambda$ 为入射光波长。不考虑损耗时，滤波器的透过率为

$$T = \frac{1}{1 + F \sin^2 \frac{\delta}{2}} \quad (2)$$

式中， $F = \frac{4R}{(1-R)^2}$ ， $R$ 为高反膜的反射率。以波长表示的半强度带宽（FWHM）为

$$FWHM = \frac{\lambda^2}{\pi nd \sqrt{F}} = \frac{\lambda^2(1-R)}{2\pi nd \sqrt{R}} \quad (3)$$

自由光谱范围(FSR)为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nd + \lambda} \quad (4)$$

当F-P干涉仪满足条件 $2nd \gg \lambda$ 时，自由光谱范围（FSR）简化为常用的形式：

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nd} \quad (5)$$

F-P腔内充上液晶后，调节外加电压，可改变液晶的折射率 $n$ ，滤波器峰值透过波长也会发生相应的变化，从而实现电压对滤波器的调谐。考虑液晶的吸收时，液晶的折射率可表示成复数形式：

$$n = n_1 + in_2 \quad (6)$$

$n_1$ 为通常的折射率， $n_2$ 与液晶的吸收有关。故相邻两束光的位相差为

$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d + i \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d = \delta_1 + i\delta_2 \quad (7)$$

式中， $\delta_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 d$ 是相邻两束光的位相差， $\delta_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d$ 是光经过工作物质（液晶）时所引起的吸收项，其中， $\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} n_2$ 称为液晶的吸收系数。分析表明，考虑液晶的吸收时，滤波器的透过率为

$$T = \frac{\frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{(1 - R e^{-\alpha d})^2}}{1 + F' \sin^2 \frac{\delta_1}{2}} \quad (8)$$

其中， $F' = \frac{4R e^{-\alpha d}}{(1 - R e^{-\alpha d})^2}$ 。则峰值透过率为

$$T_{\max} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{(1 - R e^{-\alpha d})^2} \quad (9)$$

半强度带宽（FWHM）为

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{\pi n_1 d \sqrt{F'}} = \frac{\lambda^2 (1 - R e^{-\alpha d})}{2\pi n_1 d \sqrt{R} e^{-\frac{1}{2}\alpha d}} \quad (10)$$

自由光谱范围（FSR）仍为

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2n_1d + \lambda} \quad (11)$$

### 3 液晶损耗对可调谐液晶光学滤波器特性的影响

从式(9)可以看出, 液晶的吸收系数  $\alpha$  和高反膜的反射率  $R$  对器件的峰值透过率均有影响。取  $d=10 \mu\text{m}$  (一般液晶器件的典型值), 峰值透过率随  $\alpha$  和  $R$  的变化如图2所示。可见, 滤波器的峰值透过率随着  $\alpha$  和  $R$  的增加而减小, 并且  $R$  越高,  $\alpha$  对峰值透过率的影响越明显。这是由于  $R$  越大, 光在腔内有效反射次数越多, 能量的吸收损耗越大, 导致峰值透过率下降更多。

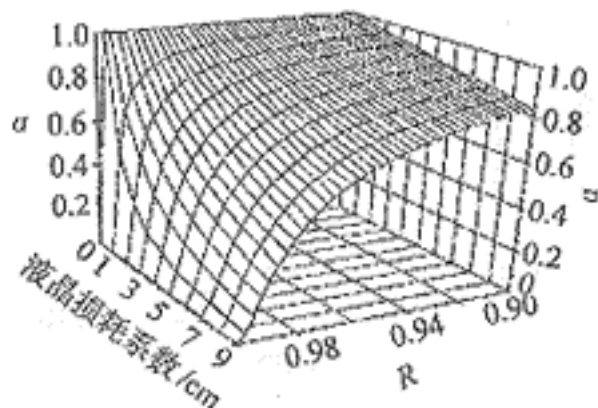


图2 最大透过率随  $R$  和  $\alpha$  的变化

Variation of maximum transmissivity with loss coefficient and reflectivity

由式(10)可知,  $\alpha$  和  $R$  对器件的FWHM也有影响, 取  $d=10 \mu\text{m}$ ,  $n_1=1.5$ ,  $\lambda=1.55 \mu\text{m}$ , 器件的FWHM随  $\alpha$  和  $R$  的变化如图3所示。器件的FWHM随着  $\alpha$  的增加而增大, 随  $R$  的增加而减小, 且近似成线性关系。因此, 选择  $\alpha$  值小的液晶及  $R$  值大的高反膜是减小滤波器FWHM的重要手段。

式(11)反映出  $\alpha$  和  $R$  对自由光谱范围(可调谐范围)没有影响。自由光谱范围只与  $d$ 、 $n_1$  和  $\lambda$  有关, 只要器件的腔距  $d$ 、腔内介质的折射率  $n_1$ 、入射光的波长  $\lambda$  确定, 器件的自由光谱范围就确定了。

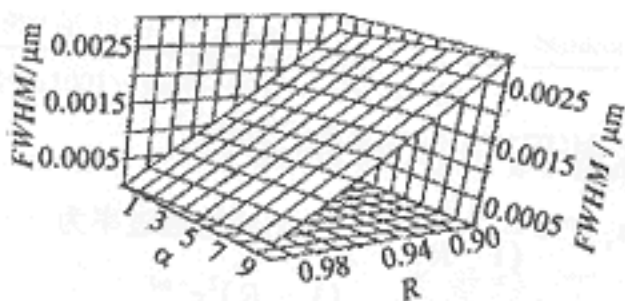


图3 半强度带宽随损耗系数和反射率变化曲线  
Variation of FWHM with loss coefficient and reflectivity

液晶在使用时，由于定向的不完善及向错的出现都会引起散射损耗。液晶的散射与吸收有相近的形式，故可将上述各式中的  $\alpha$  视为由于液晶的吸收、散射引起的损耗系数。

为了考察元件参数对滤波器参数的影响，根据式(8)，我们计算了几种典型的情况下滤波器的透过谱。由文献[6]知，在1.4~1.6  $\mu\text{m}$  波长，液晶的损耗系数  $\alpha$  低的可达0.2/cm [6]，当液晶含有杂质时，其吸收与散射损耗可成量级增加。取 $d=10\ \mu\text{m}$ ， $n_1=1.5$ ， $R=99\%$ ， $\alpha$  分别为0.2/cm，10/cm时滤波器的 $T \sim \lambda$  曲线如图4所示； $R=95\%$ ，

$\alpha$  分别为0.2/cm，10/cm时滤波器的 $T \sim \lambda$  曲线如图5所示； $R=80\%$ ， $\alpha$  分别为0.2/cm，10/cm时滤波器的 $T \sim \lambda$  曲线如图6所示。从图中可以看出，随着  $\alpha$  的减小，器件的峰值透过率增大，FWHM变窄，其响应特性变好。随着 $R$ 的增大，FWHM变窄，其峰值透过率减小。因此，减小  $\alpha$  能改善器件的性能。而 $R$ 的改变不能同时改善器件的透过率和带宽。

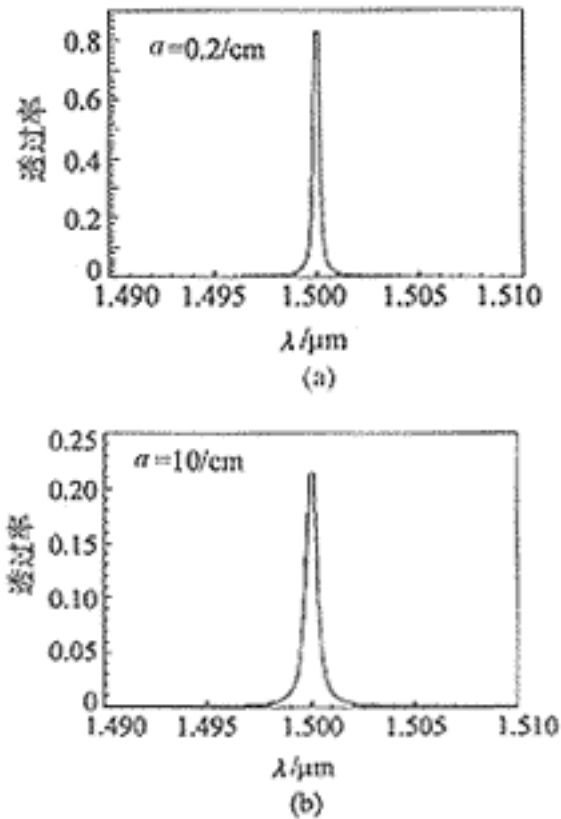


图4  $R=99\%$ 时的 $T \sim \lambda$  曲线  
Fig.4 Curve of  $T \sim \lambda$  ( $R=99\%$ )

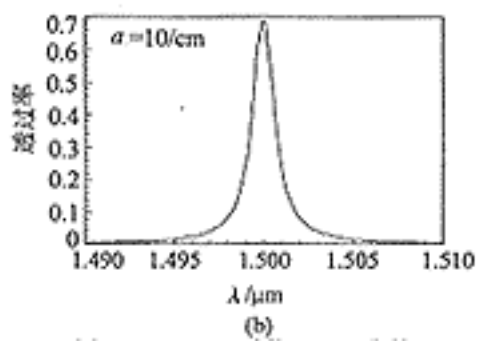
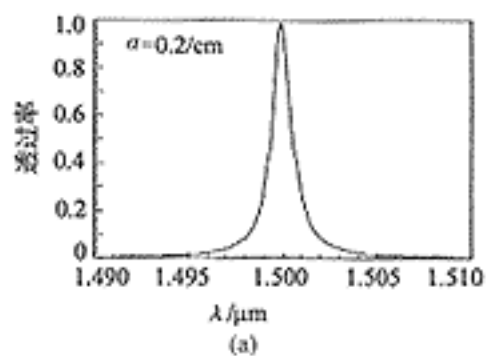


图5 R=95%时的T ~ 曲线  
Fig.5 Curve of T ~ (R=95%)

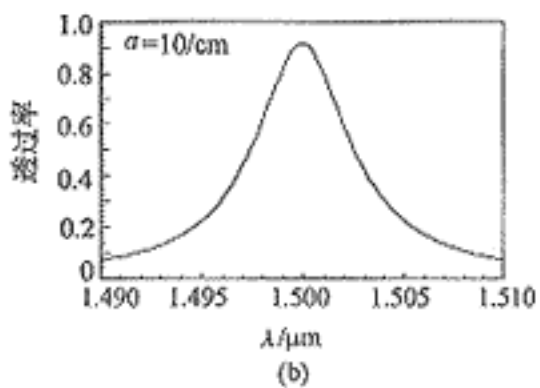
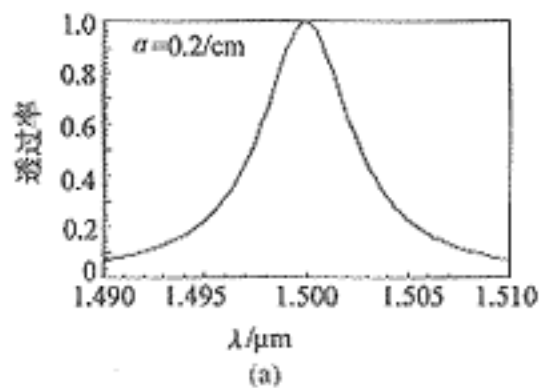


图6 R=80%时的 $T \sim$  曲线  
Fig.6 Curve of  $T \sim$  (R=80%)

## 4 结论

综上所述,液晶损耗的存在使得器件的峰值透过率降低,FWHM展宽,器件的性能降低。因此,在制作滤波器选择液晶时,除了按液晶器件的要求作常规考虑外,特别要选取损耗系数较小的液晶,并使工作波长避开它的吸收峰,因为即使较小的吸收峰也会使器件的性能明显降低。

腔镜反射率 $R$ 的增大可以使FWHM减小,但会降低峰值透过率。通过 $R$ 的变化不能同时改善器件的透过率和带宽。因此,在器件制作时,在保证尽可能小的基础上,要根据具体要求(带宽、峰值透过率)来选择反射率 $R$ 值,如果 $R$ 值太大,会使器件的透过率迅速降低, $R$ 值太小,又会使器件的带宽迅速增加。

在器件的制作过程中,由于进行多次镀膜,基片难免会受到污染,在高反射膜中及其表面,形成附加的吸收与散射,基片表面的机械损伤,会导致液晶定向不完善,引起相应的衍射和散射,这些因素造成的损耗都会使器件的性能下降。

作者简介:张爱玲(1973-),女,1996年毕业于聊城师范学院物理系,并于同年进入南开大学现代光学研究所攻读硕士研究生,研究方向为光电子学。现从事可调谐液晶滤波器的研究。

作者单位:南开大学 现代光学研究所,天津 300071

## 参考文献:

- [1] Patel J S, Saifi M A, Berreman D W, et al. Electrically tunable optical filter for infrared wavelength using liquid crystal in a Fabry-Perot etalon [J]. Appl. Phys. Lett., 1990, 57(17): 1 718 ~ 1 720.
- [2] Katsuhiko Hirabayashi, Hiroyuki Tsuda, Takashi Kuro-kawa. Narrow-band tunable wavelength-selective filters of Fabry-Perot interferometers with a liquid crystal intracavity [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1991, 3(3): 213 ~ 215.
- [3] Sneh A, Johnson K M, Liu J Y. High-speed wavelength tunable liquid crystal filter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1995, 7(4): 379 ~ 381.
- [4] Chen P L, Lin K C, Chuang W C, et al. Analysis of a liquid crystal Fabry-Perot etalon filter: a novel model [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 1997, 9(4): 467 ~ 469.
- [5] Katsuhiko Hirabayashi, Hiroyuki Tsuda, Takashi Kuro-kawa. Tunable liquid-crystal Fabry-Perot interferometer filter for wavelength-division multiplexing communication systems [J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1993, 11(12): 2 033 ~ 2 043.
- [6] 吴诗聪. 在紫外、可见和红外区液晶吸收光谱的测量 [J]. 现代显示, 1998, 16(2): 4 ~ 11.

收稿日期: 1999-01-20

## 微波滤波器设计培训——视频课程

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立, 致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养, 是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司, 以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们推出的微波滤波器设计培训专题, 有资深工程师领衔主讲, 课程既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 设计原理和设计仿真实践相结合, 向大家呈现各种结构的微波滤波器的完整设计流程。旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。



### 微波滤波器设计培训专题视频课程

高清视频, 专家授课, 中文讲解, 直观易学; 既有微波滤波器设计原理的详细解释, 也有像 ADS、CST、HFSS 各种仿真分析工具的实际设计应用讲解, 旨在帮助大家透彻地理解并实际的掌握各种微波滤波器的设计。

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/filter/>

### 更多专业培训课程:

- **HFSS 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

- **CST 视频培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

- **天线设计专业培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>