

# 用于 DWDM 系统可调谐光滤波器的设计

郭丽, 唐棣芳

(上海交通大学)

**摘要:**本文根据 DWDM 系统对光滤波器的要求,分析了可调谐 F-P(法布里-珀罗)光滤波器的工作原理及性能特点,并进行了仿真。论文重点对可调谐 F-P 光滤波器进行了优化设计。

**关键词:**可调谐光滤波器; F-P 谐振腔

**Abstract:** This article analyses the Principles and characteristic of the tunable F-P filter in accordance with demand for light filter of the Dense Wavelength Division Multiplexed system, and it gives emulation. This article emphasizes on the Optimizing designing of the tunable F-P filter.

**Keywords:** Tunable F-P filter; Tunable F-P resonator

## 1 前言

可调谐光滤波器是实现波分复用的重要器件,它被用来在不同的光通道中动态的分配波长信号,或在接受端对波长进行选择滤波。另外,由于网络对光源的苛刻要求,激光器的单频输出真正的自适应路由和波长分配,还必须考虑光通道上的业务流量,根据使用情况按照相应算法增加/减少信道数据速度。

纵上所述,光滤波器的性能会影响到整个网络的运行情况,成为了新一代的光纤通信中至关重要的一个环节。我们将具体介绍法布里-珀罗(F-P)可调谐光滤波器的性能及其优化的设计。

## 2 DWDM 系统对 F-P 滤波器参数的要求

F-P 滤波器用作波分复用系统的解复用器,对于 F-P 腔的几个参数是有相应的要求的。

1、自由谱域 FSR 必须大于多信道复用信号的总的频谱宽度,以防止产生信号的混迭,造成收信的混乱。ITU-T 关于波分复用系统的波长安排的建议中规定:以基准 1925.500 THz 安排的波长范围是 1530.33 nm (195.900 THz) - 1565.50 (191.500 THz),所以自由谱域 FSR 需大于 4,400 THz。

2、3 dB 带宽  $\Delta F$  必须较小。在 DWDM 系统中,要求在一个自由谱域 FSR 中容纳尽可能多的信道,即要求信道的间距小,而且不能有串扰效应。一般要求信道间距小于 1 nm,甚至是几十个 GHz。

这两个要求综合起来,也就是要求精细度 F 必

须提高。在十分稳定的情况下,F-P 腔滤波器可以使信道复用数达到  $N = F/6.4$ 。但是,从前面的分析可以知道精细度 F 的提高要受到反射率 R 的限制,因此一般只能达到 100 左右。

## 3 F-P(法布里-珀罗)可调谐光滤波器的结构

F-P 可调谐光滤波器是根据法布里-珀罗干涉原理制成的,输入光纤的两个端面被抛光,镀银,形成两个透镜。分别装在两个活动支架上。两个端面向对放置,中间有一缝隙。如图 1 所示。调节缝隙的大小就可以调节滤波器的通频带。一般采用压电陶瓷对活动支架进行微调,300~500 伏的电压可使陶瓷产生所需的变形量。通频的光能经半反射镜进入输出光纤。

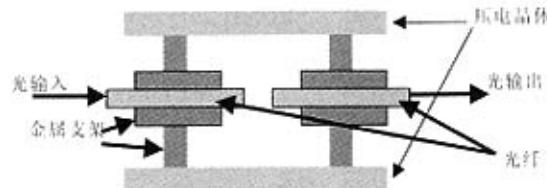


图 1 法布里-珀罗滤波器

法布里-珀罗滤波器输出的光谱呈梳状,且是具有周期分布的多谱线。

法布里-珀罗可调谐滤波器是一种无源器件。他的带宽可以做得十分窄,即具有很高的分辨率,可以小于 0.01 nm。但是,缺点是调谐的速度较慢,大约是 1 ms。最近,这种滤波器得到了改进。方法是:在光纤缝隙中添入液晶 (liquidCrystal)。原因是:

是液晶的折射率在通电后能迅速的改变。改进后的滤波器调谐时间可缩短到10 μs, 可调谐范围为80 nm, 波长分辨率为0.05—10 nm。而且, 因为法布里-珀罗滤波器的功率小, 制作方便, 成本低而受到了普遍的欢迎。

#### 4 F-P 可调谐滤波器工作原理

F-P 可调谐滤波器是基于干涉原理的滤波器, 它的基本原理与 F-P 干涉仪相似。我们先介绍一下 F-P 干涉仪的结构:

在 F-P 干涉仪中, 干涉产生于平面薄板的多光束干涉, 其中, 薄板就是具有高反射率( $R>0.9$ )的两平行平面中间的空气层。一般来说, 可以在一对光学玻璃板上镀高反射膜来构成 F-P 干涉仪。

F-P 腔如图 2 所示。其中, M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 分别表示两面平行放置的玻璃板; r, t 为镜面的反射系数和透射系数, n 为中间介质的折射率, 当介质为空气的时候 n=1, d 为腔长。

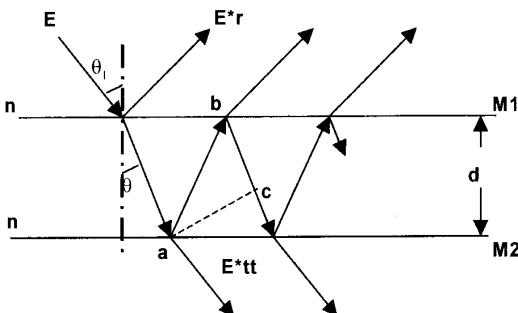


图 2 F-P 腔工作原理图

当光波以入射角  $\theta_i$  入射该 F-P 腔, 将在两反射膜 M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> 之间发生多次的反射和透射。每次反射的往返时间所对应的相位延迟  $\phi$  为:

$$\phi = \frac{4\pi nd \cos\theta}{\lambda_0}$$

为了讨论的方便, 我们先假设  $\theta=90^\circ$

$$\theta = \frac{4\pi nd}{\lambda_0} = \frac{4\pi nd f}{c}$$

如图 2 所示,  $E_0$  为入射光的电场强度(振幅), 可以求得反射光束和透射光束的光电场强度分别为:

$$A_1 = rE_0, A_2 = tt'r'e^{-\#}E_0, A_3 = tt'r'^3e^{-2\#}E_0 \dots\dots \\ B_1 = tt'E_0, B_2 = tt'r'^2e^{-\#}E_0, B_3 = tt'r'^4e^{-2\#}E_0 \dots\dots$$

式中 r, t 分别为光波从空气入射到介质时反射膜对光电场的反射系数和透射系数,  $r', t'$  分别为光波从介质入射到空气时反射膜对光电场的反射系数和

透射系数,  $r, t$  和  $r', t'$  之间的关系可从图 3 得出。

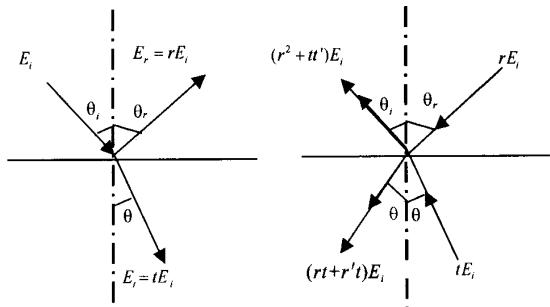


图 3 反射系数与透射系数的关系

并推导出:

$$r' = -r$$

$$tt' + r^2 = 1$$

根据定义给出:

$$\text{反射功率 } R: R = r^2 = r'^2$$

$$\text{透射功率 } T: T = tt'$$

反射光束迭加后的合场强为:

$$A_r = \sum_{p=1}^{\infty} A_p = \frac{(1 - e^{-\#}) \sqrt{R}}{1 - Re^{-\#}} E_i$$

透射光束迭加后的合场强为:

$$B_t = \sum_{p=1}^{\infty} B_p = \frac{T}{1 - Re^{-\#}} E_i$$

由此, 求出透射光的功率  $P_t$

$$P_t = B_t B_t^* = \frac{E_0^2 T^2}{1 - 2R \cos\phi + R^2} =$$

$$P_t \frac{T^2}{1 - 2R \cos\phi + R^2} = P_t \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1 - R)^2 \sin^2(\frac{\phi}{2})}} =$$

$$P_t \frac{1}{1 + [\frac{2F}{\pi} \sin(\frac{\phi}{2})]^2}$$

式中  $P_t$  为入射强光,

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1 - R}$$

F-P 腔的功率传递系数为:

$$\tau = \frac{P_t}{P_i} = \frac{1}{1 + [\frac{2F}{\pi} \sin(\frac{\phi}{2})]^2}$$

由于, 其中的变量受到频率的控制, 我们可以根据上面的式子了解到 F-P 腔的频率响应, 根据上式进行仿真, 见图 4:

这一组曲线以一定的周期, 出现峰值, 峰间有

最小值,表明出现了谐振现象。图中:F 越大,干涉曲线越细锐,所以 F 又称为精细度。

当  $\phi = 2q\pi$  ( $q = 1, 2, 3, 4 \dots$ ), 对应传输系数最大值为:

$$P_{\text{max}} = P_t, \tau_{\text{max}} = 1$$

当  $\phi = (2q+1)\pi$ , 对应传输系数最小值为:

$$\tau_{\text{min}} = \frac{1}{1 + (\frac{2F}{\pi})^2}$$

由此可以求出谐振频率:

$$f_q = \frac{qc}{2nd}, \lambda_q = \frac{2nd}{q} (q = 1, 2, 3, 4 \dots)$$

由于 F-P 腔的这个特性,它成为了最常用的密集型波分复用系统的光滤波器。将 F-P 腔的谐振频率调到与所选的信道频率重合,就可以从多个组合的信道中选出该信道。

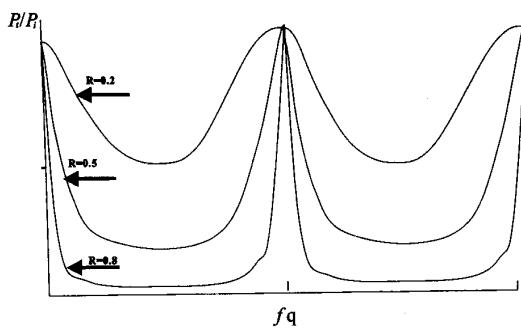


图 4 F-P 腔频谱特性仿真图形

## 5 F-P 滤波器的特性参数

比较常用的参数有:FSR(自由谱域), $\Delta F$ (3dB 带宽),F(精细度), $\tau_{\text{max}}$ (峰值传输系数),以下分别介绍:

### 1、FSR(free spectral range)

自由谱域指的是相邻的两个谐振频率的间距。

$$FSR = f_q - f_{q-1} = \frac{c}{2nd}$$

由于 F-P 腔的多谐性,使用时输入光谱不能大于这个范围,否则会造成两个谐振频率同时通过滤波器,而无法得到所需的信号,它限制了总信号带宽。

### 2、3 dB 带宽

3 dB 带宽  $\Delta F$  定义为系数的数值降到最大值一半时所对应的频带宽度,这一参数描绘了 F-P 腔的谐振曲线的锐度,

$$\tau = \frac{1}{1 + (\frac{2F}{\pi})^2 \sin^2(\pi Vf / FSR)}$$

其中  $Vf = f - f_q$  是对于谐振频率的偏移,由此可以求出 3 dB 带宽  $\Delta F$  为:

$$VF = \frac{FSR}{F} = \frac{c(1-R)}{2\pi d n \sqrt{R}}$$

### 3、精细度 F

F 的定义为自由谱域 FSR 于 3 dB 带宽  $\Delta F$  的比值

$$F = \frac{FSR}{VF}$$

由此式我们可以看出自由谱域 FSR,3 dB 带宽  $\Delta F$ ,精细度 F 这三个参量并不是独立的,知道其中的两个就可以方便的求出第三个参量。

在前面我们已经得到了无损时精细度 F 为:

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{1-R}$$

可见反射率 R 越大,精细度 F 也越大。

### 4、峰值传输系数 $\tau_{\text{max}}$

对于峰值传输系数  $\tau_{\text{max}}$  的定义为输入和输出功率之比的最大值

F-P 腔的功率传输系数为:

$$\tau = \frac{P_t}{P_i} = \frac{1}{1 + [\frac{2F}{\pi} \sin(\frac{\pi}{2})]^2}$$

由于,其中的变量  $\tau$  受到频率的控制,是一个周期函数,当没有损耗时:

$$\tau_{\text{max}} = 1 \quad \phi = 2q\pi (q = 1, 2, 3, 4 \dots)$$

如果传输中存在损耗,则峰值传输系数会受到影响,我们将在下面的内容进行讨论,并且会对于这个损耗提出一定的优化方案。

## 6 可调谐 F-P 腔

在上面我们得到 F-P 腔的谐振频率:

$$f_q = \frac{qc}{2nd}, \lambda_m q = \frac{2nd}{q} (q = 1, 2, 3, 4 \dots)$$

可以看出,当我们改变腔长 d,或是入射角  $\theta$  时,谐振频率也将同时发生相应的变化。这样,我们就可以实现 F-P 腔的调谐(按照习惯,采用腔长 d 调谐时就称为可调谐 F-P 腔;采用角度  $\theta$  调制时就称为可调标准具)。

由上式可以求得发生谐振时的腔长为:

$$d = \frac{m\lambda}{2}, (m = 1, 2, 3 \dots)$$

我们可以看出,谐振发生在半波长整数倍的腔长上,每当腔长改变半个波长时,谐振将会移动一个自由频域。

$$FSR = \frac{c}{2nd}$$

所以在一般情况下,F-P腔只需要在半个波长的范围内调谐即可,并且能够选出任意一个信道来。我们可以观察以下的仿真及其结果(见图5):

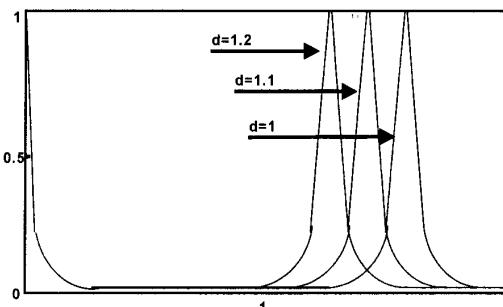


图5 FSR随着腔长的变化

当腔长改变时,可以看出腔长越长,则自由谱域 FSR 越小,也就是可调谐的范围就越小;反之,当腔长越大,自由谱域 FSR 就越大,可调谐的范围也越大。接着,再看看以下腔长的变化引起的其他参数的变化:

同时,我们也可以看出随着腔长的变化,3 dB 带宽  $\Delta F$  也将随之变化。当腔长越大,3 dB 带宽  $\Delta F$  就越大,滤波器的选择性就越好(见图6)。

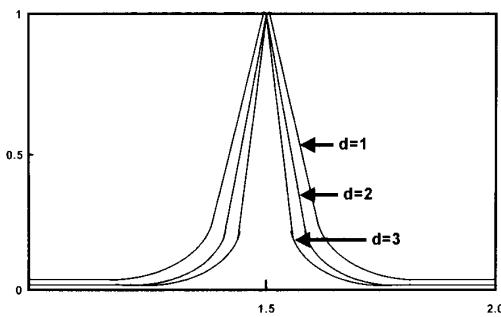


图6  $\Delta F$  随着腔长 d 的变化

当腔长  $d$  不变,入射角发生改变时,也可得出相同的结论。但是要注意的是:当入射角过大时,由于横向位移,将使各透射光束不能很好的重叠而使干涉的效果变差,这正是角度调谐的不足之处。

## 7 F-P 滤波器的优化设计

### 7.1 F-P 腔的损耗

在以前的讨论中,我们没有考虑过损耗对于 F-P 腔的影响。F-P 腔的损耗主要有两个来源:反射膜(Loss due to reflecting mirror imperfections),其中包括了反射膜的不平整引起的损耗以及反射膜的吸收损耗;衍射损耗(Diffraction loss),是光波在 F-P 腔中来回反射引起的。

#### 7.1.1 反射膜损耗对于 F-P 腔的影响

我们先不考虑衍射损耗,而只考虑反射膜的吸收损耗(反射膜不平整等引起的损耗在下一小节中讨论)。在描述 F-P 腔的特性参数峰值传输系数  $\tau_{max}$  我们提到了 F-P 腔中的反射膜损耗,当我们考虑损耗时,须将前面的式子进行改变:

$$R + T + A = 1$$

其中  $A$  为反射膜的光吸收损耗系数,为损耗功率与输入功率之比。我们再把这个式子代入传输系数  $\tau$  的式子中,就可以求得新的传输系数  $\tau$ :

$$\begin{aligned} P_o &= \left(\frac{T}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1+R)^2} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} = \\ &\quad \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2 \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1+R)^2} \sin^2\left(\frac{\phi}{2}\right)} \end{aligned}$$

式中  $P_o$  表示存在反射膜损耗时 F-P 腔的透射功率,我们可以看出反射膜损耗对于 F-P 腔的 3 dB 带宽  $\Delta F$ ,精细度  $F$  都没有任何的影响,它只影响光功率透过率(Throughput),也就是说谐振时 F-P 腔的光功率传输系数。我们也就得到了峰值传输系数  $\tau_{max}$

$$\tau_{max} = \left(1 - \frac{A}{1-R}\right)^2$$

我们可以对以上的损耗进行仿真:

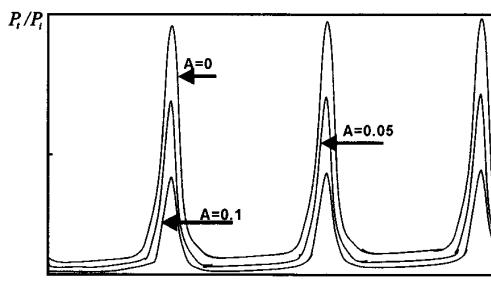


图7 损耗对于 F-P 腔性能的影响

通过仿真所得的数据(见图 7):

当  $A=0$  时, 即不计人反射膜损耗, 峰值传输系数  $\tau_{max}=1$ ;

当  $A=0.05$  时, 峰值传输系数  $\tau_{max}=0.694$ ;

当  $A=0.1$  时, 峰值传输系数  $\tau_{max}=0.447$ ;

根据上式和我们进行的仿真所得出的结论, 很明显这时候峰值系数  $\tau_{max}$  不再唯一, 而且将随着  $A$  的增大而迅速的减小, 从而给整个系统带来很大的插入损耗。

### 7.1.2 衍射损耗对于 F-P 腔性能的影响

前面讨论过 F-P 腔的衍射现象是光束在腔内多次来回的反射的结果。由于反射膜的尺度有限, 因此反射都要给光束带来衍射损耗。事实上, 象 F-P 腔这样的开放式谐振腔内稳定光场的建立, 是一种初始光场被两个有限孔径的反射镜一次或多次衍射的结果。而这样的场的描述需要利用菲涅尔—基尔霍夫积分公式, 建立 F-P 腔中的光场自治方程。

与上一节中一样, 先假设反射膜损耗不存在( $A=0, R+T=1$ ), 损耗只由衍射引起。并且设单程光功率的损耗系数为  $\alpha_p$ , 这样, 我们可以把前面得到的反射膜对于光功率的透射功率改写为:

$$B_1 = tt'e^{-\alpha_p l/2} E_0, B_2 = tt'r^2 e^{(\phi-3\alpha_p l/2)} E_0 \dots$$

这样就可以求得此时 F-P 腔的功率传输系数  $\tau$ :

$$\tau = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha_p l}}{(1-R \cdot e^{-\alpha_p l})^2} \cdot \frac{1}{1 + \frac{4Re^{-\alpha_p l}}{(1-R \cdot e^{-\alpha_p l})^2} \sin^2(\frac{\phi}{2})}$$

这样就可以知道它的峰值传输率以及精细度分别为:

$$\tau_{max} = \tau = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha_p l}}{(1-R \cdot e^{-\alpha_p l})^2}$$

$$F = \frac{\pi \sqrt{R \cdot e^{-\alpha_p l}}}{1 - R \cdot e^{-\alpha_p l}} = \frac{\pi \sqrt{R_e}}{1 - R_e}$$

式中:

$$R_e = R \cdot e^{-\alpha_p l}$$

我们可以通过仿真工具来观察一下衍射损耗的影响, 仿真的结果如图 8:

再次通过仿真所得的数据:

当  $\alpha=0$  时, 即不计人单程光功率的损耗, 峰值传输系数  $\tau_{max}=1$ ;

当  $\alpha=0.05$  时, 峰值传输系数  $\tau_{max}$  已经减小为 0.591;

当  $\alpha=0.1$  时, 峰值传输系数  $\tau_{max}$  更是缩小到了 0.364;

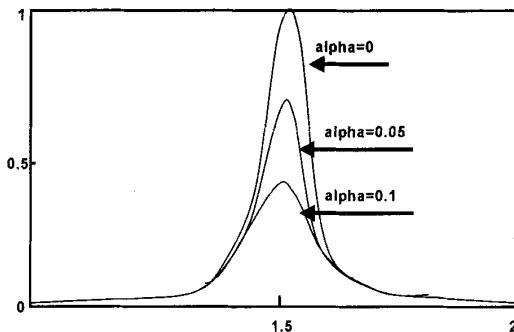


图 8 衍射损耗对于 F-P 腔的影响

根据以上仿真所得出的结论, 当整个系统计人了衍射损耗时峰值传输系数  $\tau_{max}$  不再等于 1, 而且将随着单程光功率的损耗的增大而迅速的减小, 从而给整个系统带来很大的插入损耗。

在计算精细度  $F$  时, 考虑了衍射损耗的影响后的等效反射率(注: 只可以在计算精细度时使用), 由于实际的 F-P 腔中的反射率  $R$  很接近于 1, 而一般情况下远小于 1, 所以以上的式子就可以化简为:

$$F \approx \frac{\pi}{1 - R + \alpha_p l} = \frac{\pi}{T + \alpha_p l}$$

由以上结果可知, 反射膜的吸收损耗只影响 F-P 腔的传输率, 而衍射损耗则对于传输率和精细度都会产生影响。这是在 F-P 设计时需要注意的一个问题。还有, 我们提到过的反射膜不平整或是倾斜, 那么光束在反射时将会偏移原来的方向, 同样也会引起损耗。这种原因所导致的性质与衍射损耗相类似, 可将其归入衍射损耗因子中。

当我们前面所说的多种损耗同时存在时, 峰值传输率给出如下:

$$\tau_{max} = \frac{(1-R-A)^2 e^{-L}}{(1-R \cdot e^{-L})^2}$$

式中,  $L$  包括了衍射损耗以及由反射膜不平整引起的损耗, 所以在有损耗情况下, 峰值传输率总是小于 1 的, 也就是对整个系统产生了传输损耗。

### 7.2 F-P 滤波器的性能参数的优化设计

上面的内容我们讨论了法布里—珀罗滤波器中影响十分严重的两种损耗, 而在这一章节中我们将会对于这两种损耗进行分析。虽然, 我们不能够完全的避免这两种损耗, 以目前的技术也无法对于器件本身加以完全的改变, 所以我们就针对 F-P 腔的性能参数给与优化设计, 争取以最低的成本, 制造出性能良好的法布里—珀罗滤波器。

光纤F-P腔是一个单膜器件,这样我们认为总的损耗是各种损耗的代数和,并且由此得出精细度和透过率的关系,我们假设反射率R很大,接近于1,可近似得到:

$$F = \frac{\pi}{L + T}$$

式中L表示各种损耗的代数和。我们还是通过仿真来看一下他们之间的关系:

接着我们可以观察以下仿真所生成的图形,如图9:可以看到当所有的损耗和为一定值时,精细度将随着透射率的变大而不断地变小。与此同时,总的损耗对于精细度也有着十分明显的影响。根据下图所示,当损耗较小(例如最上方的一条曲线)它的精细度还保持在一个较高的水平上;反之,当损耗较大时(例如最下方也的一条曲线)它的精细度也只能在一个较低的水平上了。

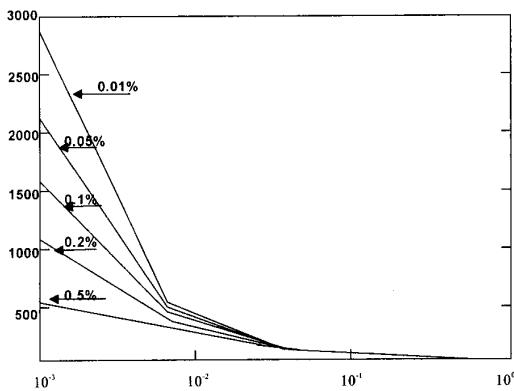


图9 精细度与透射率的关系图

接着,我们还需要看一下的是透射率与峰值传输率(也可以称为峰值透射率)的关系。为了分析的方便,我们现忽略式中的反射膜吸收损耗A,这样一来我们就可以将原来的式子加以简化,成为如下公式:

$$\tau_{max,r} = \frac{T^2}{(T + L)^2}$$

可见,峰值传输率也存在一定的关系,我们再一次通过仿真工具来看一下,如图10:

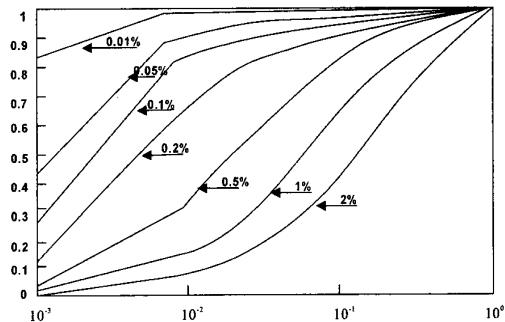


图10 峰值传输率(峰值透射率)与透射率的关系

由此图,可以看出,当T增大时,精细度F将减小,而峰值传输率 $\tau_{max}$ 将增大;反之,当T减小时,精细度F将增大,而峰值透射率 $\tau_{max}$ 将减小。但当透射率下降到可以与损耗L相比拟的时候,再下降透射率,精细度F也不会有明显的上升了。设 $L=0.5\%$ ,透射率由10%减至5%,精细度上升了25%,然而峰值透射率则已经下降了60%。

由此,我们可以得到透射率的设定方法,我们应该根据实际情况来决定反射膜的透射率。一般来说,要做到损耗系数 $L < 0.005$ 是十分困难的。因此,为了使插入损耗保持在比较低的数值上,光纤F-P腔的精细度设计在100%左右比较的合适,相应的反射膜的反射率R应当在0.97—0.985之间,即透射率T在0.015—0.03之间。

#### 参考文献:

- [1] [美]J. H. Franz VK. Jain著,《光通信器件与系统》徐宏杰等译,电子工业出版社.
- [2] 张劲松,等.编著:《光波分复用技术》,北京邮电大学出版社.
- [3] Gower. J:《Optic&communication Systems》second Edition, Prentice-Hall 1993.

## 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，致力于专注于微波、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/>