

# 高性能法布里-珀罗腔的研究

韩乃骞 吴德明 谢麟振

(区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室(北京实验区)  
北京大学电子学系, 北京 100871)

**摘 要** 可调谐法布里-珀罗腔(F-P)可用于频分复用、波分复用以及光孤子通信系统之中, 是一种重要的光学器件。本文从原理上分析了制造性能优良的法布里-珀罗腔所应考虑的各种因素, 结合两种先进的制腔方法, 即腔外匹配和腔内加光阑法, 解决了制做过程中所遇到的技术问题, 制成的腔具有较高的性能。

**关键词** 法布里-珀罗腔, 匹配, 光阑。

## 1 引 言

法布里-珀罗腔广泛应用于光通信系统中, 与光栅器件, 马克赞德干涉器件相比, 其自由谱区和通带带宽可以根据需要灵活设计, 并且具有可以调谐的特点, 所以有非常广阔的应用前景。由美国 Newport 生产的世界一流水平的可调法布里-珀罗腔(Supercavity), 其结构特点是精细地考虑了入射场模式与腔内场模式的匹配, 腔的损耗很小。但由于设计时没有考虑对高阶模的抑制, 因而受环境的影响, 会使高阶模幅度最大达到基模峰值的十分之一, 影响器件的性能。文献[1]的设计, 从理论上分析了腔内插入小孔光阑对腔内场各模式的影响, 采用腔内加光阑的结构, 制成的腔有效地抑制了高阶模, 但由于没有细致地考虑入射场与腔内模式的匹配问题, 腔的损耗较大。本文综合了两种结构的优点, 采用更易于实现的匹配方案, 使腔的制造简单且综合指标提高了一步。它不但损耗小, 为带尾纤结构, 而且很好地抑制了高阶模式, 使腔的工作稳定性大大提高。

## 2 球面镜法布里-珀罗腔的解调原理及插入光阑的影响

可以证明任何一个稳定的球面腔唯一地等价于一个共焦腔, 任何一个共焦腔与无穷多个稳定球面腔等价, 共焦腔内的场结构介绍如下。

菲涅耳数  $N(N = a^2/\lambda h, a$  为光阑大小,  $h$  为腔长) 大于 1 的条件下, 利用菲涅耳-基尔霍夫衍射积分可求得共焦腔中的场<sup>[2]</sup>:

$$E_{mn}(r, \Phi, z) = E_0 \frac{\omega_0}{\omega(z)} \left( \sqrt{2} \frac{r}{\omega(z)} \right)^m L_n^m \left( 2 \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right) \exp \left[ - \frac{r^2}{\omega^2(z)} \right]$$

$$\times \exp(-im\varphi) \exp\{-i[k(z + \frac{r^2}{2R}) + \Phi(r, \varphi, z)]\} \quad (1)$$

$$\Phi_{mn}(z) = kf - (m + 2n + 1)[\pi/2 - \arctg(f - z)/(f + z)]$$

$$\omega(z) = \omega_0 \sqrt{1 + (z/f)^2}, \quad \omega_0 = \sqrt{\lambda f/\pi}, \quad R(z) = |z + f^2/z|$$

$\omega(z)$ 、 $\omega_0$ 、 $R(z)$  分别为高斯光束在传播方向上  $Z$  处和  $Z = 0$  处的光斑大小以及  $Z$  处高斯光束等相面的曲率半径,  $f = h/2$  为共焦腔焦距,  $L_n^m$  为缔合拉盖尔多项式。

非共焦的稳定腔内的场结构也由  $E_{mn}$  给出, 其中  $\omega_0$  的大小和位置要根据两镜的曲率半径和腔长的数据计算得出。

根据场分布公式, 求得腔内 TEM<sub>mnq</sub> 模的谐振频率为<sup>[2]</sup>:

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2nh} \left[ q + \frac{m+n+1}{\pi} \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right] \quad (2)$$

其中  $g_1 g_2 = (1 - h/n_1)(1 - h/n_2)$ ,  $n_1$ 、 $n_2$  为两镜的折射率。

由(2)式可见: 对应不同的  $h$ , 有特定的谐振频率  $\nu_{mnq}$ , 即不同波长的入射光通过法布里-珀罗腔后, 只有与该腔长对应的频率为  $\nu_{mnq}$  的光可以通过。这就是法布里-珀罗腔的调谐原理。由(2)式还可以看到, 不同的  $m$ 、 $n$ 、 $q$  组合可以对应同一频率。在这些频率中, 基横模  $\nu_{00q}$  是希望存在的模式, 其频率间距定义为自由谱区。其它模式都是要抑制的高阶横模。

采用两种办法抑制高阶横模: 其一是在腔内加光阑。腔内加光阑后, 衍射损耗将改变腔的物理特性: 它一方面增加腔的透过损耗, 另一方面又因光阑对不同模式光的衍射损耗不同, 从而达到抑制高阶横模的目的; 其二是使入射场与法布里-珀罗腔内场的基模很好地匹配, 从而尽可能小地激发腔内高阶横模。下面先分析衍射损耗的特点。

共焦腔的模式理论证明<sup>[3]</sup>: 每一特定横模的单程衍射损耗, 单值地由腔的菲涅耳数  $N = a^2/h\lambda$  ( $a$  为小孔光阑的半径) 决定。对稳定球面腔和它的等价共焦腔而言, 由于它们的模式结构完全相同, 而且反射镜都构成场的等相位面, 因此它们的衍射损耗遵从同样的规律, 此时菲涅耳数由有效菲涅耳数  $N_{ef} = a^2/h'\lambda$  代替,  $h'$  为等价共焦腔腔长。

通常光阑插入位置在束腰处, 并与谐振腔的光轴共心。否则要对公式作进一步修正, 本文从略。

在旁轴近似的条件下, 球面镜谐振腔中的横模结构可用高斯光束近似分析。利用高斯光束的场分布公式, 可求得共焦型谐振腔中衍射损耗  $L_{00q}$ 、 $L_{01q}$ 、 $L_{10q}$  的解析表达式为<sup>[4]</sup>:

$$L_{00q} = \exp(-4\pi N) \quad (3)$$

$$L_{10q} = (4\pi N + 1) \exp(-4\pi N) \quad (4)$$

$$L_{01q} = (16\pi^2 N^2 + 1) \exp(-4\pi N) \quad (5)$$

对于一般的稳定球面腔, 用  $N_{ef}$  代替上面公式中的  $N$ 。理论分析<sup>[1]</sup>表明 TEM<sub>10q</sub>、TEM<sub>01q</sub> 模为主要起作用的高阶横模。

假设两镜面的透过率均为  $T$ , 则法布里-珀罗腔的峰值透过率  $PT_{mnq}$  和细度  $F$ , 由多光束干涉原理计算为:

$$PT_{mnq} = \frac{1}{\{1 + L_{mnq}/[T(1 - L_{mnq})]\}^2}, \quad T \text{ 为透过率} \quad (6)$$

$$F = \frac{\pi \sqrt{R}}{(T + L_{mnq})}, \quad R \text{ 为反射率} \quad (7)$$

据此绘出在  $T = 3\%$  时, 法布里-珀罗腔基模(高阶模式是要被抑制的) 峰值透过率与菲

涅耳系数的关系，同时也给出基模细度和菲涅耳数的关系图。图像显示出加光阑后，光阑对法布里-珀罗腔透过率和细度的影响。

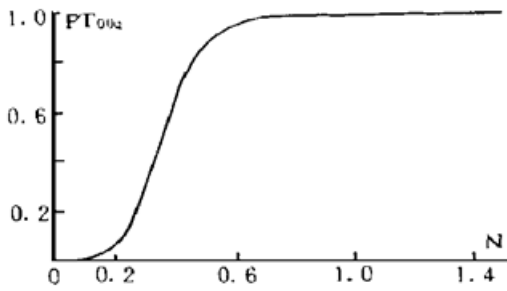


Fig. 1 Transmissivity

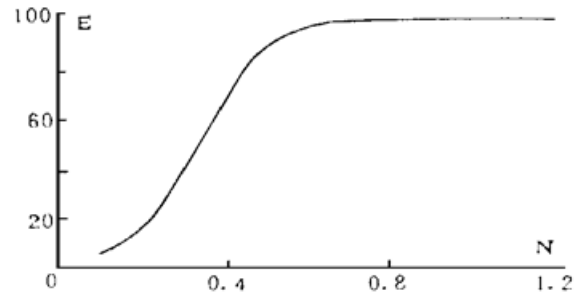


Fig. 2 Fineness

加光阑后，光阑对基模和高阶模式的衍射损耗有显著的不同，选模比  $MSR_{mnq}$  定义为：加光阑后，基模和高阶模式的峰值透过率之比。它反映了光阑对高阶横模抑制程度。其大小由以下公式给出。

$$MSR_{10q} = PT_{00q}/PT_{01q} = \frac{1/\{1 + L_{00q}/[T(1 - L_{00q})]\}^2}{1/\{1 + L_{01q}[T(1 - L_{10q})]\}^2} \tag{8}$$

$$MSR_{01q} = PT_{00q}/PT_{10q} = \frac{1/\{1 + L_{00q}/[T(1 - L_{00q})]\}^2}{1/\{1 + L_{01q}[T(1 - L_{01q})]\}^2} \tag{9}$$

$MSR_{10q}$  和  $MSR_{01q}$  与菲涅耳数的关系如图 3、图 4 所示。

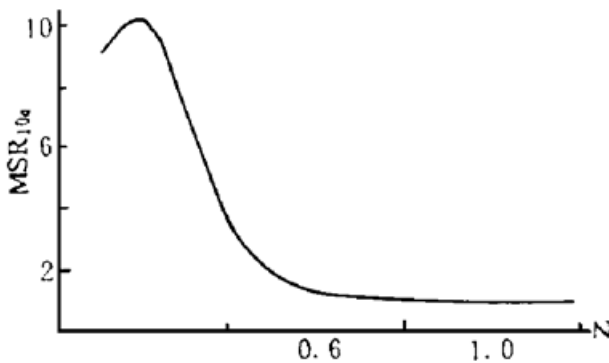


Fig. 3  $MSR_{10q}$

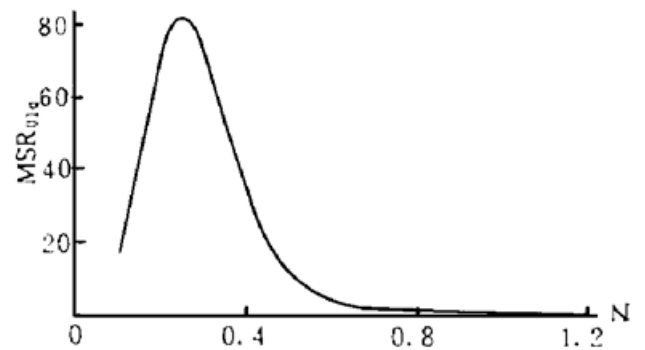


Fig. 4  $MSR_{01q}$

上面四个图用于法布里-珀罗腔的参量设计。

### 3 法布里-珀罗腔的设计

下面将结合具体实例讨论法布里-珀罗腔各参数的设计，匹配设计，小孔光阑的选择。

#### 3.1 自由光谱区、细度的选定

这两个参数的选择需根据特定系统的要求。本实验系统要求自由光谱区大于 300 GHz，细度在 90 左右。据此来选择腔长和反射率。

根据自由光谱区表达式，可计算得到：腔长约为 0.44 mm。不考虑衍射损耗，细度公式为： $F = \pi \sqrt{R}/(1 - R)$ ， $R$  为镜面反射率，可计算得镜面反射率大于 96.6%，实验中镀膜的反射率为 97%。

#### 3.2 匹配设计

设计高指标法布里-珀罗腔，必须考虑腔外场与腔内场的匹配。好的匹配设计使通过法布

里-珀罗腔的基模透过损耗小,同时大大减小了激发的高阶模的能量分配,匹配程度的好坏可用模式分配比  $MR_{mnq}$  表示,其定义为:未加光阑时,腔的基模峰值能量与高阶横模峰值能量之比。它反映了法布里-珀罗腔腔内模与入射模匹配程度。

$$MR_{mnq} = I_{00q}/I_{mnq} \quad (10)$$

其大小由实验来决定,最佳值可通过理论计算得到,参见本节后面部分。

为使从光纤出来,再进入法布里-珀罗腔的入射场模式与腔内场基模匹配,必须先知道腔基模光腰的大小和从光纤出射时的光腰大小。

已知腔长和凹面镜曲率半径值  $R$  (实验中选为 20 mm),就可以知道腔基模光腰  $\Omega_c$  的大小。但是已制成腔的腔长无法精确地用现有的测长工具量出,腔长的准确值可根据下面的方法得到。

腔内场 TEM<sub>mnq</sub> 模式的谐振频率为:

$$\nu_{mnq} = \frac{c}{2nh} \left( q + \frac{m+2n+1}{\pi} \arccos \sqrt{g_1 g_2} \right)$$

$q$  变化 1,  $m$ 、 $n$  不变,此时的频率差为纵模间距,记为  $\Delta\nu_{mnq}$ 。

$$\Delta\nu_{mnq} = \frac{c}{2nh}$$

$q$  不变,  $(m+2n+1)$  变化 1,此时的频率差为横模间距,记为  $\delta\nu_{mnq}$ 。

$$\delta\nu_{mnq} = \frac{c}{2nh} \arccos \sqrt{g_1 g_2}$$

$$\delta\nu_{mnq}/\Delta\nu_{mnq} = \frac{\arccos \sqrt{g_1 g_2}}{\pi}$$

凹凹腔的情况下:  $g_1 g_2 = \left(1 - \frac{h}{R}\right)^2$

$$\delta\nu_{mnq}/\Delta\nu_{mnq} = [\arccos(1 - \frac{h}{R})]/\pi \quad (11)$$

上式左边的值可以从示波器上读出,具体数据为 0.067,算得  $h$  为 0.44 mm,此时谐振腔内光腰大小  $\Omega_0 = 32 \mu\text{m}$ 。

$\omega$  是从单模光纤出来的等效高斯光束的光腰大小,可以通过下面介绍的方法,计算得到它的值。

单模光纤里光场分布为贝塞尔函数形式,记为 EH<sub>11</sub> 模

$$\begin{aligned} E(r) &= J_0(2.405r/a) & r \leq a \\ E(r) &= 0 & r > a, \quad a \text{ 为光纤芯径} \end{aligned} \quad (12)$$

当 EH<sub>11</sub> 模从光纤端面出射以后,在端面口把 EH<sub>11</sub> 模的激发模式场按自由空间的拉盖尔-高斯光束展开<sup>[5]</sup>

$$E(r) = \sum_{p=0}^{\infty} A_p(\omega) \Psi_p(r) \quad (13)$$

$\Psi_p$  是  $p$  阶拉盖尔-高斯光束在其束腰平面内的场分布。

$$\begin{aligned} A_p(\omega) &= \int_0^{\infty} E(r) \Psi_p(r) 2\pi r dr \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{1}{\omega} \int_0^a J_0\left(\frac{2.405r}{a}\right) L_p\left(\frac{2r^2}{\omega^2}\right) \exp\left(-\frac{r^2}{\omega^2}\right) 2\pi r dr \end{aligned} \quad (14)$$

$L_p$  是  $p$  阶拉盖尔多项式。

$\omega_0$  的选择可以是任意的，但合理的选择应该是使级数收敛最快，也就是使展开式第一项——与自由空间的基模高斯光束相对应的项——的系数  $A_0(\omega_0)$  取极大值。即由

$$\frac{\partial A_0(\omega_0)}{\partial \omega_0} = 0$$

来决定  $\omega_0$  的值。当  $\omega_0$  为  $0.6435a$  时， $A_0$  取极大值。计算得 98% 的能量集中在光腰为  $0.6435a$  的基模场内，其它 2% 分配于高阶横模中。可见，匹配最好的情况下，模式分配比为 49。这是理论极限，实验结果只能接近但不能超过这个数值。

所用单模光纤芯径  $a = 4.5 \mu\text{m}$ ，则  $w_0 = 0.6435 \times 4.5 \mu\text{m} = 2.9 \mu\text{m}$ 。

光波从光纤出来进入聚焦棒，可以证明如果高斯光束的光腰位置在 0.25 节距聚焦棒的端面，那么从聚焦棒另一端面出来后，它的光腰也就在聚焦棒的端面上，假设它是  $\omega_{b0}$ 。用  $ABCD$  律可以算出  $\omega_{b0}$  的大小。

$\omega_{b0}$  的大小也可以通过实验的方法测量出来。见

图5。

聚焦棒端面的基模场是高斯分布的，设  $E = A \exp(-\frac{r^2}{\omega^2})$ ， $A$  为比例系数。

取一半径为  $32 \mu\text{m}$  的光阑，将它置于聚焦棒端面前，测出最大光强值  $I_1$ ，再拿去光阑，测出最大光强值  $I_2$ 。

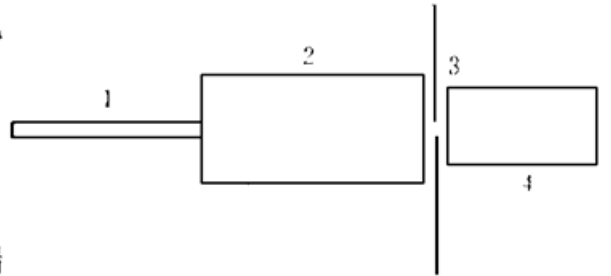


Fig. 5 Diagrammatic sketch of light spot measure. 1: fiber; 2: grin lens; 3: diaphragm; 4: PIN receiver

$$I_1 = \int_0^a A^2 2\pi r \exp(-\frac{r^2}{\omega^2}) dr, \text{ } a \text{ 是光阑大小。}$$

$$I_2 = \int_0^\infty A^2 2\pi r \exp(-\frac{r^2}{\omega^2}) dr。$$

测量得  $I_1/I_2 = 0.033$ ，由上面三个式子得出： $\omega_{b0} = 0.25 \text{ mm}$ 。

由于聚焦棒的特性参数已无法知道，所以实验测量方法与理论计算方法得到的值无法比较，但从最后的结果来看，实验测量方法的精度是满足设计要求的。

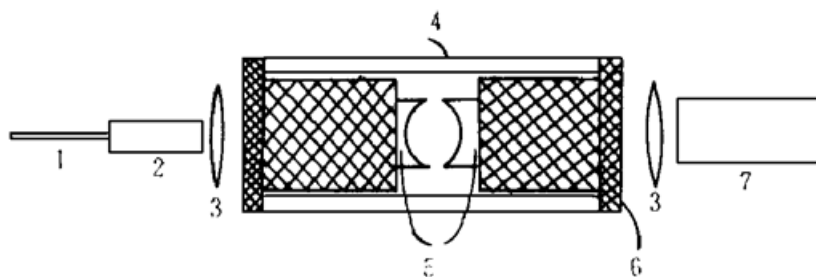


Fig. 6 Structure drawing of F-P filter. 1: fiber; 2: grin lens; 3: lens; 4: PZT; 5: mirrors; 6: shelf; 7: PIN receiver

透镜。

现在匹配条件已满足了。如果严格满足匹配条件，则模式分配比  $MR_{10q}$  和  $MR_{01q}$  均大于 49，此时无需在腔内加光阑即可满足应用要求，但是由于匹配设计在计算中所取的近似以及实验误差，不可能实现理想情况，实际值总是有误差。本实验的最好结果为 7.5 左右，再经过

现在已知道两个光腰  $\omega_{b0}$  和  $\Omega_0$  的大小，就能着手设计满足匹配条件的参数。为方便制作，采用如图6所示的腔体结构。

因为  $\omega_{b0}$  很大， $\pi\omega_{b0}^2 \gg \lambda f$  成立，利用近似公式：

$$f = \pi\omega_{b0}\Omega_0/\lambda \quad (15)$$

算得  $f = 16 \text{ mm}$  取焦距为 15 mm 的

粘接，结果会进一步恶化。可见加光阑十分必要。也可以通过严格的匹配设计和实验努力，使制成的法布里-珀罗腔不加光阑就可使用，但其制作上的麻烦以及使用中要求的苛刻条件，使得在现阶段没有多少实用价值。而采用稍粗糙的匹配设计并加上光阑的作用，即可有效地简化制作工艺，且使腔工作的稳定性提高。下面考虑光阑的选择。

### 3.3 光阑的选择

根据透过率、细度与菲涅耳数的关系图，选取菲涅耳数为0.48左右，这样可以兼顾到透过率、细度和选模比都有较高的指标。算出光阑半径约为 $56\ \mu\text{m}$ 。

## 4 实验结果及分析

### 4.1 实验结果

以下两图显示出加光阑前后的法布里-珀罗腔对高阶模的抑制作用以及腔的性能结果。

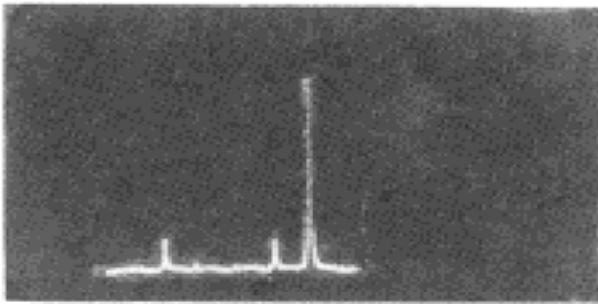


Fig. 7 Before a diaphragm put in

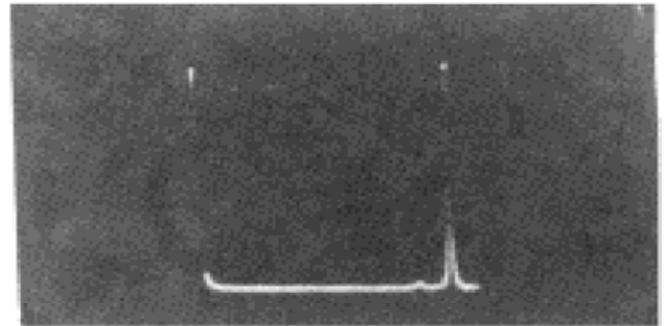


Fig. 8 After a diaphragm put in

### 4.2 透过率分析

实验根据模式分配比的情况选择光阑大小，以使得高阶横模尽可能地受到抑制。最后光阑大小选为 $56\ \mu\text{m}$ 。从透过率与菲涅耳系数关系图，得到理论透过率为0.85，但扣除光经匹配系统后分配于高阶模的能量，实际的基模透过率的理论值是0.57。测量得到的值为0.35，测量方法如图9所示。误差来源于损耗计算中，没有计及以下四种因素：

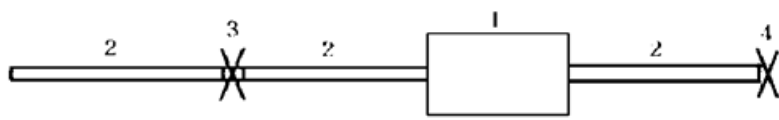


Fig. 9 Diagrammatic sketch of transmissivity measure. 1: F-P cavity; 2: fiber; 3: measure point of input power; 4: measure point of output power

测量得到的值为0.35，测量方法如图9所示。误差来源于损耗计算中，没有计及以下四种因素：

没有计及以下四种因素：

- 1) 未镀膜的匹配透镜、光纤头和聚焦棒端面有反射损耗；
- 2) 失配的损耗。粘接引起原来匹配好的光路失配，使损耗增加；
- 3) 粘接引起光阑偏离光轴线，导致实际菲涅耳数的减小，使损耗增加；
- 4) 粘接中使用的胶具有挥发性，其分子会吸附在镜面表面，增加镜面的散射、吸收损耗。

### 4.3 细度分析

细度的理论值为96，实验结果是90，理论和实验结果基本吻合，差异的原因是没有计及镜面不洁对光的吸收、散射损耗以及镜面的微小畸变带来的损耗。

### 4.4 横模抑制比

横模抑制比  $TMST_{mnq}$  是最终反映法布里-珀罗腔系统对横模抑制程度的量，它等于模式分配比与选模比的乘积。

$$TMST_{mnq} = MR_{mnq} \times MSR_{mnq}$$

不加光阑前, 测出接收到的基模与  $TEM_{01q}$  模的模式分配比  $MR_{01q}$  为 6.0, 照片上可以清楚地看到  $TEM_{01q}$  模为主要的高阶横模, 即轴对称场激发轴对称高阶模式较多。菲涅耳数为 0.48 时, 从图 3 查得, 选模比为 10。横模抑制比  $TMST_{01q}$  计算结果为 50(17 dB), 实测的结果为 66(18 dB), 理论与实际测量值有一点误差。因为光阑在粘接中, 会有一点点的偏离, 导致实际的菲涅耳数减小, 使选模比增大, 基模透过率减小。所以最后的横模抑制比要比理论值大一点。

其它的高阶横模因为光斑较大, 衍射损耗使之几乎不存在, 所以不用考虑。 $TEM_{10q}$  模虽然衍射损耗较小, 但其模式分配比很小, 即外场几乎没有在腔内激发  $TEM_{10q}$  模, 所以其横模抑制比很大。

**结束语** 本文分析了制造高性能法布里-珀罗腔所要考虑的各种因素, 解决了制造过程中的技术问题, 制成的腔具有较高的性能, 并已用于频分复用系统作为光解复用器和解调器。

### 参 考 文 献

- [1] 李爱国, 汤 烁, FDM 光纤通信系统的光学滤波器的研究. 第六届全国光通信学术会议论文集, 北京, 1993·440~ 443
- [2] 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 激光原理, 北京, 国防工业出版社, 1980·325~ 326
- [3] 方洪列, 光学谐振腔理论, 北京, 科学出版社, 1981·131~ 133
- [4] 吕百达, 激光光学, 成都, 四川大学出版社, 1992·84
- [5] 周炳琨, 高以智, 陈家骅, 激光原理, 北京, 国防工业出版社, 1980·417~ 418

## A Study on High Quality F-P Cavity

Han Naiqian      Wu Deming      Xie Linzhen

(National Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks & Advanced Optical Communication Systems  
Electronics Department, Peking University, Beijing 100871)

(Received 28 March 1996; revised 3 March 1997)

**Abstract** In WDM, FDM and soliton optical fiber communication system, the tunable F-P cavity is a key device. In this paper, the factors of designing a high quality F-P cavity are analyzed. Two advanced methods, the match method and diaphragm method of making F-P cavity are combined. A high quality cavity is obtained and has been used in our optical fiber communication system as a demodulator.

**Key words** F-P cavity, match, diaphragm.