

# 用于光 WDM 网中的高反射损耗 可调 F-P 腔的设计

韩乃騫 谢麟振 徐安士 吴德明

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

**提要** 设计了具有高反射损耗特性的光解复用器,它具有插入损耗小,反射损耗大,并且可以进行电压调谐的特点。

**关键词** 反射损耗, F-P 腔, WDM 网

## 1 引 言

当前高速光波分复用器(WDM)网的研究在大力开展,已经进行的有 IBM 的 RAINBOW 计划,斯坦福大学的 STARNET 和 CORE 计划,欧洲 RACE 计划,以及加拿大和日本的一些计划<sup>[1]</sup>。WDM 网要解决的主要问题有很多,其中与器件有关的包括半导体激光发射光源的设计、星形耦合器的设计、光信号上下路元件和接收光滤波器的设计等等。其中光滤波器的设计对网络整体结构的设计以及网络的性能都有重要影响。目前作为接收用的光器件主要有三种:其一是接收端有一可调谐的本振激光器,用相干解调<sup>[2]</sup>;其二是可调 F-P 谐振腔<sup>[3]</sup>;其三是 Mech-Zehnder 干涉仪<sup>[4]</sup>。第一种方式可以大大提高接收机的灵敏度,有利于网径的提高和节点数的增加,但是技术要求复杂,造价高,目前很少采用。第二和第三种方式造价较低,因而被广泛采纳。但 Mech-Zehnder 干涉仪一般来说可调范围小,不利于较大数目的波长复用。而具有大范围调谐能力的 F-P 谐振腔是一种在 WDM 网中最多使用的器件。但是 F-P 谐振腔有一点不足:回返光非常大,而回返光大将干扰发射激光器,在系统存在掺铒光纤放大器(EDFA)的情况下,将严重影响 EDFA 的稳定工作。这样激光器和 EDFA 前就都要加隔离器,尽管隔离器产品已很成熟,但在网上大量使用高性能的隔离器会损失有用信号功率,并且大大增加网络成本。所以提出一种具有高反射损耗特性的可调谐的 F-P 腔结构,是非常有必要的。

## 2 原 理

平行 F-P 腔早已在光纤通信技术中应用,为了制造的方便,往往将其做成正入射的形式,这样的结构会产生很大的反射光。将要设计的 F-P 腔,通过一倾斜的角度设计,大大减少了反射光返回输入光纤,图 1 是其结构原理图。

根据图 1 的结构,给出图上各点的场分布。

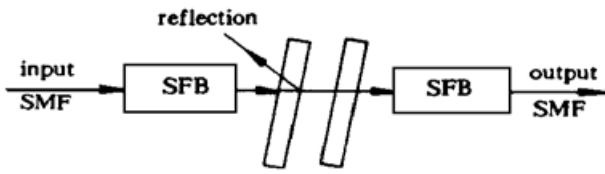


图 1 非反射 F-P 腔的设计

SMF: 单模光纤; SFB: 自聚焦棒

Fig. 1 Structure of a non-reflection F-P cavity

SMF: single mode fiber; SFB: self focus bar

从光纤出射的光场分布<sup>[5]</sup>为

$$E(r) = \begin{cases} J_0\left[\frac{U_{11}}{a}r\right] & r \leq a \\ 0 & r > a \end{cases} \quad (1)$$

光纤出射的光场将进入自聚焦棒, 拉盖尔-高斯光束可以用矩阵光学的办法进行处理。由于电场  $E$  分布是贝塞尔函数型, 具有圆柱对称性, 因此在选择展开函数簇时, 仅仅需要那些具有圆柱对

称性的拉盖尔-高斯光束。据此, 将展函数簇选为

$$\psi_m(r) = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{1}{\bar{w}_0}} L_m\left[\frac{2r^2}{\bar{w}_0^2}\right] \exp\left[-\frac{r^2}{\bar{w}_0^2}\right] \quad (2)$$

式中  $L_m\left[\frac{2r^2}{\bar{w}_0^2}\right]$  为  $m$  阶拉盖尔多项式, 即在  $L_m^n\left[\frac{2r^2}{\bar{w}_0^2}\right]$  中, 取  $n = 0$ ;  $\bar{w}_0$  定义为基模高斯光束的光腰

半径;  $\sqrt{\frac{2}{\pi} \cdot \frac{1}{\bar{w}_0}}$  为归一化系数, 它使式满足如下归一化条件

$$\int_0^{\infty} \psi_p(r) \cdot \psi_q(r) \cdot 2\pi r dr = \delta_{pq}$$

$$\sigma_{pq} = \begin{cases} 0, & p \neq q \\ 1, & p = q \end{cases} \quad (3)$$

$\psi_m(r)$  是  $m$  阶拉盖尔-高斯光束在其束腰平面内的场分布表达式。

在单模光纤端面,  $\text{EH}_{11}$  模按拉盖尔-高斯光束的展开式可表示为

$$E(r) = \sum_{p=0}^{\infty} A_p(w_0) \psi_p(r) \quad (4)$$

即将  $\text{EH}_{11}$  模的场  $E(r)$  视为无限多个拉盖尔-高斯光束的叠加, 其第  $P$  个分量  $\psi_p$  振幅为  $A_p$ 。以  $2\pi r \psi_p(r)$  乘等式两边, 并对  $r$  积分, 利用归一化条件, 可得

$$A_p(w_0) = \int_0^{\infty} E(r) \psi_p(r) 2\pi r dr = \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{1}{w_0}} \int_0^a J_0\left[\frac{U_{11}}{a}r\right] L_p\left[\frac{2r^2}{w_0^2}\right] \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2}\right] \cdot 2\pi r dr \quad (5)$$

$\text{EH}_{11}$  辐射的总能量为

$$Q = \int_0^{\infty} |E(r)|^2 \cdot 2\pi r dr = \sum_0^{\infty} |A_p(w_0)|^2 \quad (6)$$

利用  $E(r)$  表达式可以计算得<sup>[5]</sup>  $Q = 0.8466a^2$ ,  $a$  为单模光纤半径。

原则上, 对任意  $w_0$  的值, 展开式均可写成(4)形式, 其中系数都可以按(5)计算。但随着  $w_0$  的取值不同,  $A_p$  的值也将不同, 级数  $\sum_0^{\infty} A_p \psi_p$  的收敛快慢也不同。显然,  $w_0$  的合理选择是使上述级数收敛得足够快。具体这样选择  $w_0$ , 使展开式中的第一项——与自由空间的基模高斯光束相对应的项的系数  $A_p(w_0)$  取极大值。即由

$$\partial A_p(w_0) / \partial w_0 = 0$$

来决定  $w_0$  的值。由上式可算得  $w_0 = 0.6435a$ , 由  $w_0$  可进一步算出  $\text{EH}_{11}$  模总能量的 98% 将辐射到光腰为  $0.6435a$  的自由空间的基模高斯光束之中。贝塞尔光束中耦合到高阶高斯光束中的分量, 也将通过一系列的变换, 通过 F-P 腔或者被它反射, 但由于它所占的成分很小, 计算上又很复杂, 所以只讨论基模的变换情况。

通过以上的分析,可以取单模光纤端面的基模高斯光束的光腰值为  $0.6435a$ 。由自聚焦棒的  $ABCD$  矩阵,算出自聚焦棒的出射端面的光斑大小。

四分之一聚焦棒的变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{N\sqrt{A}} \\ -N_0\sqrt{A} & 0 \end{bmatrix}$$

$N_0\sqrt{A}$  为聚焦棒的特性参数。

算得光束从光纤出射通过四分之一聚焦棒后的高斯光束的光腰大小为

$$W_0 = \frac{\lambda}{\pi\bar{w}_0\sqrt{A}N_0} \quad (7)$$

将聚焦棒参数  $N_0 = 1.59$ ,  $\sqrt{A} = 0.326 \text{ mm}^{-1}$  和光纤参数  $\bar{w}_0 = 3.2 \mu\text{m}$  代入上式得

$$W_0 = 0.2976 \text{ mm}$$

基模高斯光束场分布表达式为

$$E(r, z) = \frac{A_0 W_0}{w(z)} \exp\left[\frac{-r^2}{w^2(z)}\right] \cdot \exp\left[-i\left[k\left[\frac{r^2}{2\rho(z)} + z\right] - \psi\right]\right] \quad (8)$$

$$\rho(z) = z_0 \left[ \frac{z}{z_0} + \frac{z_0}{z} \right] \quad \psi = \text{tg}^{-1} \frac{z}{z_0} \quad z_0 = \frac{\pi W_0^2}{\lambda} \quad \bar{w}(z) = W_0 \sqrt{1 + \left[ \frac{z}{z_0} \right]^2}$$

代入已知数值求出  $z_0 = 203.6 \text{ mm}$ 。

实际设计的装置如图 2 所示,  $z$  都为  $1 \text{ mm}$  以下,甚至可以是零,所以  $z \ll z_0$  成立,这时等相面可以看成平面,则高斯光束在平行平面腔中的行为,可以用光线光学的方法来描述。假设 F-P 腔单程损耗为  $L$ ,  $T$  为镜面透过率,  $R$  为镜面反射率。根据多光束干涉的方法推导 F-P 腔的峰值透过系数和 F-P 腔的细度分别为

$$T = \frac{1}{(1 + L/T)^2} \quad (9)$$

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R} \quad (10)$$

高斯光束经 F-P 腔的镜面反射后,光束返回,在光束返回到达聚焦棒端面时,由于  $z_0 \gg 0$ ,所以仍然可以将光束看成平面波。最后光束通过聚焦棒返回光纤端面。但此时光路不是轴对称的。在  $x$  方向上,还是原来的高斯光束形式;在  $y$  方向上,圆高斯光束会发生像散,但一般 F-P 腔的倾角很小,所以仍然可以用高斯光束近似,但返回的高斯光束中心点的位置与出发时的位置有一个位移。该位移就是由于 F-P 腔镜面的倾角产生的。下面用  $ABCD$  矩阵光学方法计算反射回到光纤端面的中心点的位置坐标,需要用到斜光束变换矩阵。

如图 2 所示出发时高斯光束中心点的位置坐标设为  $A(0, 0)$ 。经过如图所示一系列变换后,中心点的坐标变成  $B(y_0, \theta)$ 。 $y_0, \theta$  分别为高斯光束中心点到光轴的距离和高斯光束中心点的波振面法向与光轴的夹角。假设 F-P 腔的倾角为  $\alpha$ , 则有

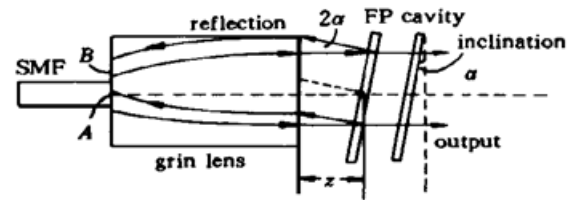


图 2 装置示意图

Fig. 2 The diagrammatic sketch

$$\begin{pmatrix} y_0 \\ \theta \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{N_0 \sqrt{A}} & 0 & 0 \\ -N_0 \sqrt{A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & z & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -2\alpha \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & z & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{N_0 \sqrt{A}} & 0 & 0 \\ -N_0 \sqrt{A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

得到的解为

$$y_0 = - \frac{2\alpha}{N_0 \sqrt{A}} \tag{11}$$

$$\theta = - 2\alpha z N_0 \sqrt{A} \tag{12}$$

可见光斑的偏移: 中心移动  $-\frac{2\alpha}{N_0 \sqrt{A}}$ , 角度变成  $-2\alpha z N_0 \sqrt{A}$ , 根据上式有两种方式进行高反射损耗的 F-P 腔的设计。第一是  $\alpha$  倾角的选取, 第二是  $z$  的选取。一般情况下,  $z$  取值较小, 比如远小于 1 mm, 代入实际的数值

$$\sqrt{N_0 A} = 0.518 \text{ mm}^{-1}, \Delta = 0.01, n_1 = 1.6$$

考虑到 F-P 腔的透过特性要高,  $\alpha$  的一般取值在  $1^\circ$  以下。最后得到  $\theta$  的数值远小于数值孔径

$$\theta \ll \arcsin 2 \sqrt{\Delta}$$

上面计算的结果表明, 反射回到光纤端面的光的偏转角不会严重影响反射损耗, 反射损耗的主要贡献是光斑的移动。经过反射回到光纤端面的光场能量分布与圆高斯光束稍有区别, 为计算简单, 将其近似为高斯光束, 但是高斯光束的中心位置从原来的原点, 沿  $y$  方向移动到  $-\frac{2\alpha}{N_0 \sqrt{A}}$ 。虽然此时高斯光束的波振面与光轴有一个很小的角度, 与正入射的情况有一点差

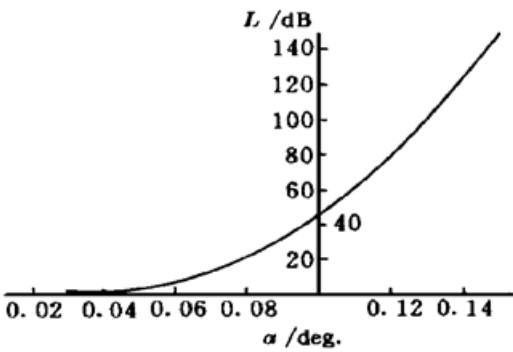


图 3 损耗与倾斜角的关系

Fig. 3 Dependence of the loss on inclination

异, 为计算简便, 我们将这一差异忽略不计, 仍然视其为正入射的情况。光场的能量分布为

$$E_0 = \iint \frac{A_0 W_0}{\bar{w}(0)} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\bar{w}^2(0)}\right] dx dy$$

可以计算进入光纤的能量是

$$E_f = \iint_{x^2 + (y - y_0)^2 \leq a^2} \frac{A_0 W_0}{\bar{w}(0)} \exp\left[-\frac{(x^2 + y^2)}{\bar{w}^2(0)}\right] dx dy$$

反射损耗为  $L = 20 \log E_r / E_0$ 。

通过极坐标变换, 可以得到损耗和倾斜角的关系, 并将计算结果作图如图 3 所示。

### 3 实验结果

本文所设计的两个 F-P 腔倾角都为  $1^\circ$  左右。对整个 F-P 腔模块的反射损耗特性所做的测量工作如图 4 所示。测量得到的结果如表 1。

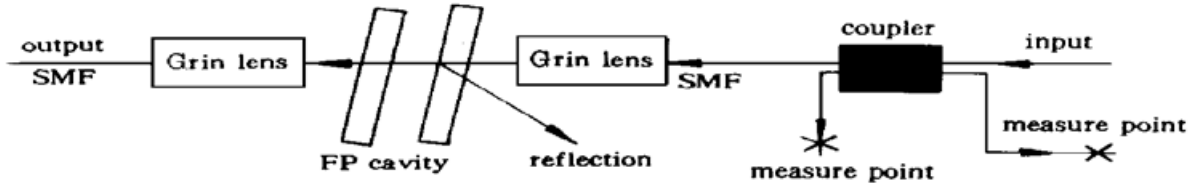


图 4 损耗测量简图

Fig. 4 Sketch of loss measurement

表 1 F-P 腔的测量参数

Table 1 Measured parameters of F-P cavities

	F-P cavity 1	F-P cavity 2
transmitting loss	7 dB	6 dB
reflection loss	40 dB	42 dB

由 F-P 腔镜面带来的反射损耗, 根据仪器最小可测量功率计算, 反射损耗是  $-60$  dB。实际上, 整个模块的总反射损耗为  $40$  dB 和  $42$  dB, 这完全是由自聚焦棒与单模光纤的接合处(图 4 中 A 处), 没有考虑提高反射损耗的设计带来的。可见反射的主要部分已不在 F-P 腔本身, 为设计无反射的 F-P 腔模块, 光路中其它光学元件连接耦合处的反射损耗问题还应该考虑。但实验得到的模块的反射损耗已经足够了, 在光 WDM 实验网络中采用这种 F-P 腔作为解调器, 发射端可以不需要隔离器。

## 4 结 论

通过一个很小的倾角设计, 可以大大提高 F-P 腔的反射损耗, 这在实际设计工作中是方便可行的。随着激光器调制码率的提高以及 EDFA 的广泛使用, 网络或传输系统中对反射损耗的性能要求也将越来越严格, 对于一个网络系统的设计, 必须考虑到每一个光学器件的反射损耗性能, 才能保证整个网络的设计质量。

## 参 考 文 献

- 1 Rajiv Ramaswami. Multiwavelength lightwave network for computer communication. *IEEE Communication Magazine*, 1993, 78~ 87
- 2 B. S. Glance, O. Scarmucci. High-performance dense FDM coherent optical network. *IEEE J. Sel. Areas Communication*, 1990, 1043~ 1047
- 3 N. R. Dond *et al.*. A wavelength division multiple access network for computer communication. *IEEE J. Sel. Areas Communication*, 1990, 983~ 994
- 4 H. Toba, K. Oda, K. Nakanishi *et al.*. 100 channel optical FDM transmission/distribution at 622 Mbit/s over 50 km utilizing a waveguide frequency selection switch. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(6) : 376~ 377
- 5 Zhou Binkun *et al.*. Principles of Lasers. Beijing : Press of Defence Industry, 1980 (in Chinese)

## Design of a Tunable F-P Cavity Used in Optical WDM Network with High Reflection Loss

Han Naiqian Xie Linzhen Xu Anshi Wu Deming

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

**Abstract** In the WDM optical network, a tunable F-P cavity is often used as a demultiplexer. But the traditional structure has the shortcoming that the reflective light is too strong and this will bring trouble to the transmitter and EDFA in the network system. To solve this problem, isolators are often used. But this will cause an extra-loss. Besides, it will costs too much. A new type of tunable F-P cavity is designed in this paper. Its insert loss is low and there is almost no reflective light from the F-P cavity. Finally, it can be tuned electronically.

**Key words** WDM, F-P cavity, reflection loss