

# 基于微球-锥形光纤耦合系统的 窄带信道下载滤波器\*

陆颖 张帆 王鹏 赵新 姚建铨

(天津大学精仪学院激光与光电子研究所教育部光电信息技术科学重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 根据耦合区的场传输方程及微球内的共振回廊模特性, 得出微球与锥形光纤耦合系统的透过信号、下载信号的输出功率及自由光谱区的表达式, 通过数值计算, 分析了系统的参数对滤波特性的影响, 进而进行优化设计, 其结果对信道下载滤波器的设计有一定的指导意义。

**关键词** 微球, 锥形光纤, 耦合系统, 滤波器

中图分类号 TN713 文献标识码 A

## Narrow-band Channel Dropping Filters Based on a Microsphere-taper Fiber Coupling System

LU Ying ZHANG Fan WANG Peng ZHAO Xin YAO Jian-quan

(College of Precision Instruments and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Laser and Optoelectronics Institute,  
Ministry of Education Key Lab of Optics and Optoelectronics Information, Tianjin 300072)

**Abstract** The expressions for transmission power, dropping power and free spectral range of a microsphere-taper fiber coupling system are derived using the coupling equations for the field transfer and characteristics of the WGM in the sphere. The optimal conditions for filtering are discussed. The results could be important for the design of channel dropping filters.

**Key words** microsphere, tapered fiber, coupling system, filter

### 1 引言

由于光波分复用(WDM)技术在一个通道内同时传送多路信号的功能以及为网络提供的比传统的电子器件高得多的处理速度, 而使其成为当前通信网扩容的一种重要技术手段。全光信道下载滤波器是这种技术中的关键器件之一, 近年来, 取得了很大进展, 其中以环、盘或球内部的行波共振模为基础的滤波器具有很大的潜在优势, 这是由于它具有非常窄的线宽以及单个共振器即可完全下载某个特定波长信号的特性<sup>[1,2]</sup>。特别地, 与环形、盘形共振器相比, 微球共振器由于即使在小尺寸下仍能保持相对更高的品质因数, 因此, 更有望用于波分复用光通信网络中的信道下载滤波。

要利用微球中最有意义的回廊模(即径向模式数很低, 角模数很高的模)进行信道下载滤波, 人们

必须采用近场耦合器将光以大于临界角的形式耦合进和耦合出微球。目前, 在已通过实验证实有效的近场耦合器中, 锥形光纤耦合器具有较多的优点<sup>[3]</sup>, 尤其微球与锥形光纤形成的耦合系统易与光纤相结合。本文即从耦合区的场传输方程出发, 结合微球内的共振回廊模特性, 系统地研究了此耦合系统的信道下载滤波特性及最佳化条件, 为实际设计光波分复用中的信道下载滤波器提供理论上的参考。

### 2 透过信号及下载信号的输出功率特性

基于微球-锥形光纤耦合系统的窄带信道下载滤波器结构如图1所示。由于耦合区域很小, 所以可以使用集总参量  $E_i$  来表示第  $i$  端口的归一化复场振幅。假设输入 WDM 复合信号的锥形光纤与微球的实振幅耦合系数为  $t_1$  ( $t_1$  依赖于微球的参数、锥形光纤的参数以及微球及光纤锥腰间的间隙距离<sup>[4]</sup>), 此耦合区的各端口的功率归一化振幅满足场

\* 激光技术国家重点实验室部分资助课题。

传输方程为(忽略耦合区的吸收和散射)

$$\left. \begin{aligned} E_3 &= \sqrt{1-t_1^2}E_1 + it_1E_2 \\ E_4 &= \sqrt{1-t_1^2}E_2 + it_1E_1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

其中,  $E_1$  表示输入的 WDM 复合信号,  $E_3$  表示未下载的透过的信号。

同样, 设输出下载信号的锥形光纤与微球的实振幅耦合系数为  $t_2$ , 则相应的场传输方程为

$$E_6 = \sqrt{1-t_2^2}E_5, \quad E_7 = it_2E_5 \quad (2)$$

其中  $E_7$  表示输出的下载信号。

显然, 微球内的功率归一化振幅  $E_4$  与  $E_5$  以及  $E_6$  与  $E_2$  分别满足下列方程

$$\left. \begin{aligned} E_5 &= E_4 \exp\left(-\frac{\alpha}{4}L\right) \exp\left(i\frac{\phi}{2}\right) \\ E_2 &= E_6 \exp\left(-\frac{\alpha}{4}L\right) \exp\left(i\frac{\phi}{2}\right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中,  $\alpha$  表示微球由于辐射、散射、材料吸收和表面污染等因素引起的平均固有损耗系数,  $L = 2\pi a$ ,  $\phi = \beta L$  是光波沿微球赤道传播一周后获得的相移。

联立上述方程, 得到未下载透过功率与入射功率之比及下载信号输出功率与入射功率之比

$$\left. \begin{aligned} \left|\frac{E_3}{E_1}\right|^2 &= 1 - \frac{\tau'}{1 + [(2F'/\pi)\sin(\phi/2)]^2} \\ \left|\frac{E_7}{E_1}\right|^2 &= 1 - \frac{c}{1 + [(2F'/\pi)\sin(\phi/2)]^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

其中  $\tau'$  为未下载信号峰值耦合率,  $F'$  是细度

$$\left. \begin{aligned} \tau' &= \frac{[1 - \exp(-\alpha L)(1 - t_2^2)]t_1^2}{[1 - \exp(-\alpha L/2)\sqrt{1-t_2^2}\sqrt{1-t_1^2}]^2}, \\ F' &= \frac{\pi[\exp(-\alpha L)(1 - t_1^2)(1 - t_2^2)]^{1/4}}{1 - \exp(-\alpha L/2)\sqrt{1-t_1^2}\sqrt{1-t_2^2}}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$c$  为下载信号峰值透射率

$$c = \frac{t_1^2 t_2^2 \exp(-\alpha L/2)}{[1 - \exp(-\alpha L/2)\sqrt{1-t_1^2}\sqrt{1-t_2^2}]^2} \quad (6)$$

### 3 信边下载滤波器的最佳化

微球与锥形光纤耦合系统用于波分复用光通信网络中的信道下载滤波时, 一个首要条件是微球共振器的共振频率间隔必须足够大, 以便能够容纳一个通信窗口(通常为 30 nm)内的波分复用信号, 这样系统才有可能下载一个信道信号而不影响其他信道的信号。根据本耦合系统的自由光谱区的近似表达式<sup>[5]</sup>, 经过数值计算, 在图 2 中画出入射波长在  $\lambda \approx 1.55 \mu\text{m}$  附近的自由光谱区与微球半径的关系曲

线, 其中曲线 1, 2, 3 分别对应  $n_s = 1.44, 2, 3$  的情况。由图可见, 当微球折射率一定时, 自由光谱区随着微球半径的减小而增大, 而当微球半径一定时, 自由光谱区随着折射率的增大而减小。特别地, 还可由此图看出: 对于微球折射率区为 1.44 的情况(与普通通信光纤的折射率近似相同), 30 nm 的自由光谱区对应于微球的半径为  $9.4 \mu\text{m}$ , 从这些结果得出本信道下载滤波器最佳化的第一个条件也是最基本的条件: 对于由折射率为 1.44 的材料制成的微球, 其半径应小于  $9.4 \mu\text{m}$ , 如果折射率更高(如半导体材料)则要求微球的半径应该更小。

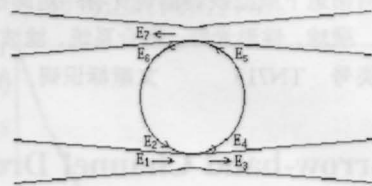


图 1 用作信道下载滤波器的耦合系统示意图  
Fig. 1 The geometry of the coupling system used as channel dropping filter

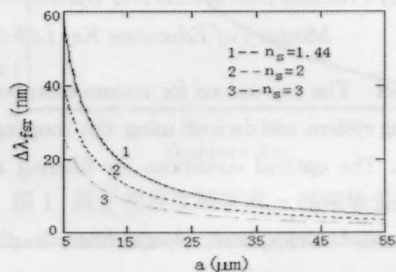


图 2 耦合系统自由光谱区与微球半径的关系曲线  
Fig. 2 The dependence of free spectral range on the radius of the microsphere

以下讨论滤波器最佳化的第二个条件: 在共振时  $[\sin(\phi/2) = 0]$ , 将输入功率全部(100%)耦合进微球共振器, 也就是共振时使未下载透过信号的输出功率为 0(即  $\tau = 1$ ), 并且使下载信号的输出功率达到最大。为得到此条件下描述系统各参数间匹配关系的简单表达式, 我们采用近似,

$$\begin{aligned} \sqrt{1-t_1^2} &= 1 - t_1^2/2, & \sqrt{1-t_2^2} &= 1 - t_2^2/2, \\ \exp(-\alpha L) &= 1 - \alpha L, \end{aligned}$$

于是有

$$\left. \begin{aligned} \tau' &= \frac{4t_1^2(t_2^2 + \alpha L)}{(t_1^2 + t_2^2 + \alpha L)^2}, \\ c &= \frac{4t_1^2 t_2^2 (1 - \alpha L/2)}{(t_1^2 + t_2^2 + \alpha L)^2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

从(7)式可以看出,  $\tau' = 1$  是可能的, 这需要参数间满足关系:  $t_1^2 = t_2^2 + \alpha L$ , 也就是说, 要使某信道信号

功率被全部滤掉,入射锥形光纤与微球的耦合和下载信号输出锥形光纤与微球的耦合应该是不对称的,前者的功率耦合系数比后者的大。

从(7)式还可看出,下载信号峰值透过率  $c$  随着衰减系数  $\alpha$  的减小单调地增加,而对一定的  $aL$ ,  $c$  在  $t_1^2 = t_2^2 + aL$  或  $t_2^2 = t_1^2 + aL$  的情况下达到最大值,并且最大值随  $t_1^2/aL$  或  $t_2^2/aL$  的增大而增大。另外,只有在  $\alpha = 0$  时,  $c$  才有可能达到 1, 否则  $c < 1$ 。

显然,最佳化的信道下载滤波器还需要尽可能窄的线宽(半高宽),从(4)式可得到线宽  $\Delta\lambda$  的表达式为

$$\Delta\lambda = \pi\lambda_l/2lF'^2 \quad (8)$$

由于对于一定的入射波长,共振回廊模的  $l$  随着微球半径的增加而增加,而  $F'$  随着  $aL, t_1^2, t_2^2$  的减小而增大[见(5)式],同时考虑到在波长不变的情况下,微球半径越小其品质因数越小(即  $\alpha$  越大),因此,要获得窄的线宽,应使微球与锥形光纤的功率耦合系数  $t_1^2, t_2^2$  较小,而微球的品质因数较高。至于微球的半径由于其与  $\Delta\lambda$  的关系不能明显由(8)看出,需要根据具体情况通过数值计算决定。

图 3(a)~(c)分别给出半径为  $10 \mu\text{m}$  的微球构成的耦合系统的未下载透过信号的输出功率与输入功率之比随入射波长变化的特性曲线,其中微球和光纤包层折射率均为 1.44,  $\alpha$  取实验已证实能达到的较小值,其他各参数分别如下(为简化计算,取  $t_1^2 = t_2^2 = t^2$ )

图 3(a):  $\alpha = 10^{-5}, t_2^2 = 0.09$

$$(d=0, b_0=0.64 \mu\text{m}, \delta=0.04);$$

图 3(b):  $\alpha = 10^{-5}, t_2^2 = 0.01$

$$(d=0.3 \mu\text{m}, b_0=0.545 \mu\text{m}, \delta=0.04);$$

图 3(c):

曲线 1:  $\alpha = 5 \times 10^{-4}, t_2^2 = 0.09$

$$(d=0, b_0=0.64 \mu\text{m}, \delta=0.04);$$

曲线 2:  $\alpha = 10^{-5}, t_2^2 = 0.01$

$$(d=0.3 \mu\text{m}, b_0=0.64 \mu\text{m}, \delta=0.04);$$

曲线 3:  $\alpha = 10^{-7}, t_2^2 = 0.01$

$$(d=0.3 \mu\text{m}, b_0=0.64 \mu\text{m}, \delta=0.04)。$$

由图可以看出,本耦合系统具有明显的滤波特性,并且共振波长处,  $\tau' = 1$ , 即输入功率完全耦合进微球很容易达到,这是由于微球的高品质因数致使  $aL$  很小,因此使  $\tau' = 1$  的条件容易实现。另外,比较各图还可以发现:  $t_2$  对线宽的影响比较大,  $t_2$  越

小共振线宽越窄[见图 3(a)和图 3(b)];在  $aL$  较小的情况下( $aL \ll t^2$ ),  $aL$  对线宽影响不大,而  $aL$  较大时,为实现  $\tau' = 1$ , 线宽变宽[见图 3(c)]。

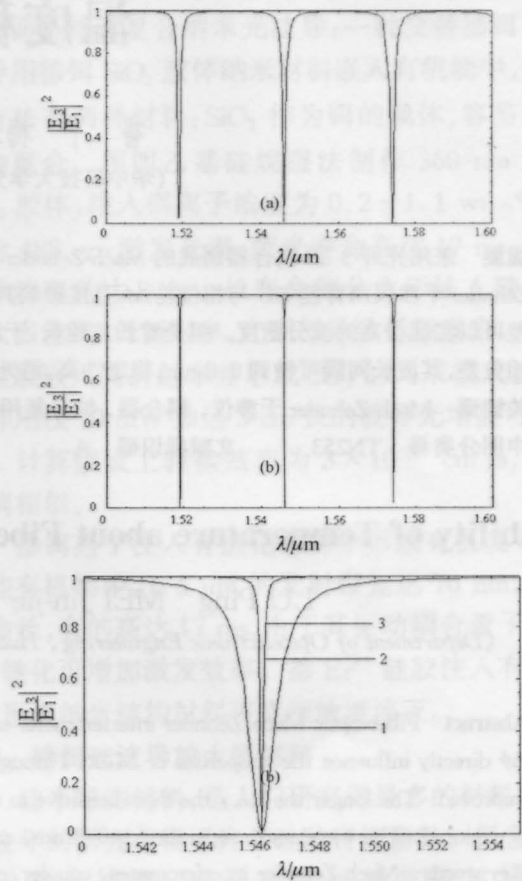


图 3 未下载透过信号的输出功率与输入功率之比随入射波长变化的特性曲线

Fig. 3 The relationship between  $|E_3/E_1|^2$  and  $\lambda$

### 参 考 文 献

- 1 D. Rafizadeh, J. P. Zhang, S. C. Hagness *et al.*. Waveguide-coupled AlGaAs/GaAs microcavity ring and disk resonators with high finesse and 21.6-nm free spectral range. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(16):1244~1246
- 2 M. Cai, G. Hunziker, K. Vahala. Fiber-optic add-drop device based on a silica microsphere-whispering gallery mode system. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6):686~687
- 3 J. C. Knight, J. C. Cheung, F. Jacques *et al.*. Phase-matched excitation of whispering-gallery-mode resonances by a fiber taper. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(15):1129~1131
- 4 Lu Ying, Wang Jiyou, Xu Xiaoxuan *et al.*. Optimal conditions of coupling between the propagating mode in a tapered fiber and the given WG mode in a high-Q microsphere. *Optik*, 2001, **112**(3):109~113
- 5 陆颖. 微球与光纤耦合系统光学特性的理论计算和设计优化. 南开大学博士论文, 2000