

# 熔锥光纤与球微腔耦合系统的理论模拟

刘丽飒, 蔡志平, 温国斌, 林 凌

( 厦门大学物理系, 福建 厦门 361005 )

摘要: 利用 H. J. Shaw 提出的单模光纤定向耦合器的分析方法并结合微球腔的特性, 对熔锥光纤与球微腔系统的耦合特性进行了理论分析和数值模拟。研究表明, 由于原本简并的球腔模式受腔体偏心率的影响而解除, 系统吸收峰间距减小,  $Q$  值( $10^6 \sim 10^7$ )比将腔体视为理想球时提高了三个数量级。这与已报道的实验结果相吻合。

关键词: 球微腔; 熔锥光纤; 临界耦合

中图分类号: TN 248

文献标识码: A

## Theoretical simulation for a coupling system with taper fiber and silicon-microsphere resonator

LIU Li-sa, CAI Zhi-ping, WEN Guo-bin, LIN Ling

( Department of Physics, Xiamen University, Xiamen 361005, China )

**Abstract:** With single mode optical fiber orientation coupler proposed by H.J. Shaw and combining the properties of microsphere, theoretical analysis and numerical simulation for coupling properties of taper fiber and silicon-microsphere resonator are carried out. The research shows that since the elimination of the originally degenerated modes in the resonator under the influence of eccentricity of microsphere, the absorption peak gap of system lowered down, with value  $Q$  (1 million~10 million) higher than the ideal microsphere for 3 magnitudes. These are consistent with the reported experimental results.

**Key words:** Microsphere resonator; Taper fiber; Critical coupling

## 引言

近年来, 由于介质球微腔具有特别高的品质因数(对于石英微球,  $Q > 10^9$ )、极小的模体积和很低的非线性效应阈值条件, 使它在非线性光学、腔体量子电动力学、窄带光学滤波、高灵敏度传感器和低阈值激光器的制备等领域中都得以广泛应用<sup>[1, 2]</sup>。目前, 球微腔回廊模(WGMs)的耦合有多种方法, 主要利用的耦合器有棱镜、半导体光波导、以一定倾角磨平的光纤和熔锥光纤等。其中, 利用熔锥光纤作为近场耦合器有着良好的效果, 耦合效率大于95%<sup>[3]</sup>, 已被成功应用于超低阈值的喇曼激光器<sup>[4]</sup>的制备中。本文利用由 H. J. Shaw 等人在1982年提出的单模光纤定向耦合器的分析方法<sup>[5]</sup>, 结合球微腔回廊模的共振特性, 研究了由石英光学球微腔与用标准通信光纤拉制的熔锥光纤所构成系统的耦合特性。数值模拟结果表明: 利用该系统可以得到等间距分布的吸收峰输出; 当球微腔具有一定偏心率时将会使相邻频率间隔变窄, 品质因数相应提高; 对于给定结构参数的熔锥光纤和球微腔, 可以通过对耦合间距的调节得到所期望的耦合效率。

## 1 耦合的理论分析

熔锥光纤与球微腔耦合系统的结构如图1。这个系统在结构上与单模光纤定向耦合器类似: 光路为两条输入, 两条输出; 一条输入光路与一条输出光路构成一个回路。由于结构上的可比性, 熔锥光纤与球微腔耦合系统可利用 H. J. Shaw 等人在1982年提出的方法结合微球谐振腔回廊模式的特点来进行理论分析<sup>[5]</sup>。

收稿日期: 2003-07-30; 收到修改稿日期: 2003-12-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60277026, 69878023)

作者简介: 刘丽飒(1978-), 女(汉族), 河北秦皇岛人, 博士生, 主要从事激光光电子器件的研究。E-mail: lislai@sina.com

$$E_3 = t E_1 + i\sqrt{1-t^2} E_2 \quad (1)$$

$$E_4 = t E_2 + i\sqrt{1-t^2} E_1 \quad (2)$$

$$E_2 = E_4 \mathbf{a} \exp(i\mathbf{f}) \quad (3)$$

图 1 中,  $K = i\sqrt{1-t^2}$  为系统振幅的耦合参数,  $t$  为熔锥光纤输出端光振幅的耦合系数;  $K$  又可表达为  $K = K_0 \exp(-d\mathbf{g}_0)$ , 其中  $d$  表示球微腔与熔锥光纤之间的间距,  $K_0$  为  $d=0$  时的耦合参数,  $\mathbf{g}_0 = \sqrt{\ell(\ell+1)/a^2 - k^2 N^2}$  为球腔外电场衰减系数<sup>[6]</sup>. 由式(1)~(3), 可得熔锥光纤输出端功率透射率  $T$  为

$$T = |E_3/E_1|^2 = 1 - C/[1 + F \sin^2(\mathbf{f}/2)] \quad (4)$$

其中  $C = 1 - [(t - \mathbf{a})/(1 - \mathbf{a}t)]^2 \quad (5);$

式中  $\mathbf{a}, \mathbf{f}$  分别为光在球微腔内环绕一周的振幅衰减因子和相移量.

对于相移量  $\mathbf{f}$  有  $\mathbf{f} = \mathbf{b}L \quad (7)$

式中  $L = 2\delta a$  ( $a$  为球微腔半径);  $\hat{a}$  为球微腔内光传播常数<sup>[7]</sup>:

$$\mathbf{b} = k\ell/x_{nlm} = k [N - (N/2)^{1/3} x_{nlm}^{-2/3} \mathbf{z}_n + P(N^2 - 1)^{-1/2} x_{nlm}^{-1} + O(x_{nlm}^{-4/3})] \quad (8)$$

式中  $k$  为真空中波矢量;  $N$  为球微腔介质折射率;  $n, l, m$  为球微腔中场解在径向、角向和角向投影上的模式数, 且  $m = -l, -(l-1), \dots, (l-1), l$ ;  $x = 2\delta a/L$  为尺寸参量; 对于 TE 模  $P=N$ , 对于 TM 模  $P=1/N$ ;  $\alpha_n$  为  $n$  阶 Airy 函数的根,  $\alpha_1 = -2.338, \alpha_2 = -4.088$ . 当球微腔的直径在  $50 \sim 150 \mu\text{m}$ ,  $\bar{\epsilon} = 1.55$  时,  $x \gg 100$ .

若只考虑  $n=1$  的情况 (实验中通过选择泵浦光的中心波长而实现), 则(7)式可以近似表达为

$$\mathbf{b} = kN = 2\delta N/L \quad (9)$$

相移量简化为  $\mathbf{f} = 2\delta NL/L = 2\delta n/\Delta n_{\text{FSR}} \quad (10)$

式中  $\Delta n_{\text{FSR}}$  为自由波谱范围. 通常  $\Delta n_{\text{FSR}} = c/NL$ , 但球微腔在实际制备中由于重力影响存在一定的偏心率  $e$ , 并非严格的球体. 这种球对称性的破坏, 使得原本同  $n$  和  $l$  但不同  $m$ ,  $(2l+1)$  度简并的共振模式发生了分裂, 导致简并解除, 频率变化为  $n_{nl} - n_{nm} \approx en(l - |m|)/l$ . 这种情况下的自由波谱范围和相移量应写为

$$\Delta n'_{\text{FSR}} = c/NL(2l+1) \quad (11)$$

$$\mathbf{f}' = 2\delta NL(2l+1)/L = 2\delta n/\Delta n'_{\text{FSR}} \quad (12)$$

球微腔品质因数  $Q$  包括四部分<sup>[8]</sup>: 与回廊模的本征损耗相关的  $Q_{\text{in}}$ , 与球腔表面不均匀而引起的 Raleigh 散射损耗相关的  $Q_{\text{rs}}$ , 与球腔表面污染物相关的  $Q_{\text{cont}}$  以及与腔内吸收损耗相关的  $Q_{\text{abs}}$ . 当损耗以分贝计算时

$$Q^{-1} = Q_{\text{in}}^{-1} + Q_{\text{rs}}^{-1} + Q_{\text{cont}}^{-1} + Q_{\text{abs}}^{-1} \quad (13)$$

系统的总的品质因数  $Q_t$  还应包括与耦合的插入损耗相关的  $Q_{\text{cou}}$

由  $Q = \mathbf{f}'/(1 - \mathbf{a}^2)$ ,  $Q_{\text{cou}} = \mathbf{f}'/(-K^*)^2 = \mathbf{f}'/(1 - t^2)$  可得

$$Q_t = n/n_l = \mathbf{f}'/d \quad (14)$$

其中  $n_l = d \Delta n'_{\text{FSR}}/2\delta \quad (15); \quad d = 1 - \mathbf{a}^2 t^2 \quad (16)$

式中  $\bar{a}$  为系统总光能损耗系数,  $n_l$  为谐振腔谱线宽度.

## 2 计算与模拟

选取系统结构参数  $a=45 \mu\text{m}$ ,  $\bar{\epsilon}=1.55$ ,  $N=1.44$ , 对系统的耦合特性进行分析.

先研究球微腔内的模式情况. 将可调谐窄带激光由熔锥光纤的光注入端注入进行模拟<sup>[3]</sup>, 设其线宽为  $\Delta \nu = 0.05 \text{GHz}$  来研究光输出端的功率透射谱. 对于半径在  $15 \mu\text{m}$  以上的球微腔, 腔体损耗中的回廊模本征损耗可以忽略<sup>[6]</sup>. 考虑球表面均匀、无杂质的理想情况, 球腔光振幅衰减可简化为

$$\mathbf{a} = (1 - gL/2)(1 - d') \quad (17)$$

式中  $g$  为球腔物质的光吸收系数;  $\bar{a}$  为泵浦线宽引起的色散损耗, 可由(13)~(14)式求得. 当球微腔是由通讯光纤的纤芯材料熔融而成时,  $g=10^{-7} \text{m}^{-1}$ , 计算得  $\mathbf{a} = 0.78$ , 取  $t=0.95$ , 分别分析球微腔模式简并和非简

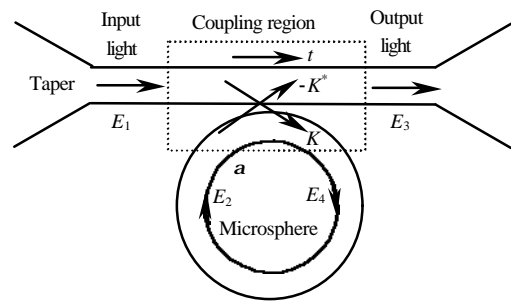


图 1 熔锥光纤与球微腔耦合系统示意图

Fig.1 Sketch of the coupling system with a taper fiber and a microsphere resonator

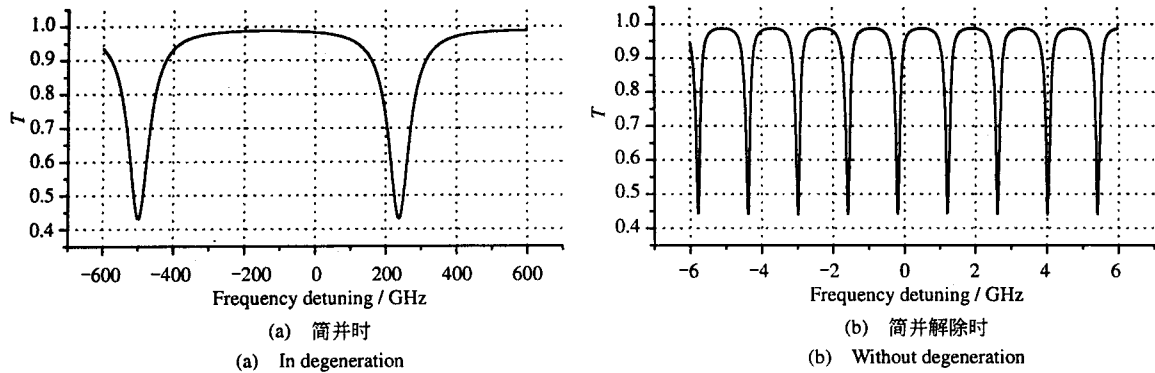


图 2 熔锥光纤输出端功率透射率  $T$  与泵浦光频率调谐量的关系

Fig.2 Power transmissivity of the taper fiber's output port as a function of frequency detuning of the pumped light

并条件下熔锥光纤输出端功率透射率  $T$  与频率调谐量的关系,如图 2。模拟过程中设泵浦光频率调谐量的精度为 0.01GHz。结果表明,利用熔锥光纤与球微腔耦合系统可以得到等间距分布的吸收峰输出;当球微腔具有一定偏心率时,相邻频率间隔将进一步变窄。

接下来分析临界耦合条件和临界耦合影响因素。首先固定  $\hat{a}$ , 改变  $t$ 。在球微腔模式非简并条件下得到峰值透射率  $T$  与  $(t-\hat{a})$  之间的关系如图 3。由式(16)可知  $t$  值对谐振腔线宽和系统品质因数的影响与  $\hat{a}$  等效。实验中  $\hat{a}$  与球微腔的形状、大小和泵浦光的带宽有关,不易改变,而  $t$  可以通过调节球微腔与熔锥光纤之间的距离来改变。取  $t_0=K_0$  分析透射率  $T$  与耦合间距  $d$  之间的关系,如图 3 所示。结果表明,当要求一定的光输出时,可调节  $d$ , 使得  $t$  偏离  $\hat{a}$  来实现。

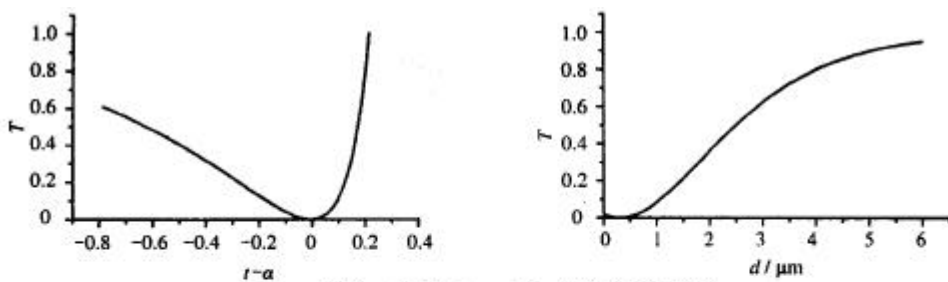


图 3  $T$  与  $t-\hat{a}$  和  $d$  的函数关系

Fig.3 Power transmissivity as functions of the parameters of  $t-\hat{a}$  and the separation  $d$ , respectively

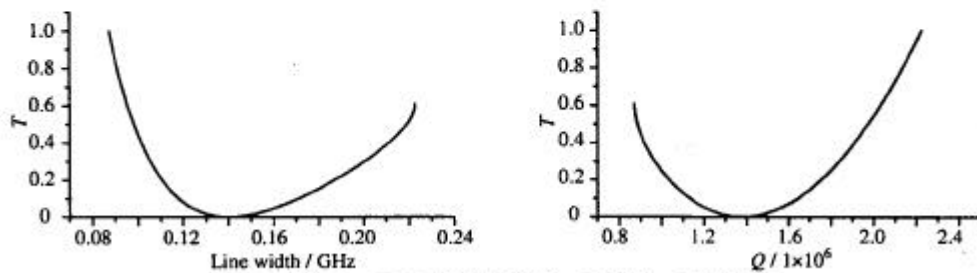


图 4  $T$  与球腔线宽和  $Q$  值的函数关系

Fig.4 Power transmissivity as functions of the microsphere's line width and  $Q$ , respectively

峰值透射率  $T$  与球微腔出射的线宽和  $Q$  之间的关系如图 4。结果表明,  $t=\hat{a}$  是临界耦合的条件,此时  $C=1$ , 达到理论上 100% 的最好光注入效果,  $Q$  值在  $10^6$  量级。而如果在球微腔模式非简并条件下,通过计算可知,  $Q$  值仅为  $10^3$  量级。根据式(14)~(16),  $\hat{a}$  越大球微腔的  $Q$  越高, 线宽越窄。因此, 要得到窄线宽的输出应注意: 采用频带窄的光源泵浦; 使用半径大于 15 $\mu$ m 的球微腔以减少腔体的本征损耗<sup>[8]</sup>; 提高球微腔表面质量, 尽可能降低吸收与散射。

应当注意, 由于  $K_0$  与波长有一定关系<sup>[9]</sup>, 所以在实际调节过程中并不像图 2 中各个峰值透射率严格相等, 而是略有差别; 且实验中泵浦光的频率调谐精度受设备精度的限制, 各吸收峰值的实际测量值会出现

类似参考文献[3]中的明显差异<sup>[3]</sup>。模拟时取泵浦光频率调谐量精度为0.11GHz(比图2的调谐间隔0.01GHz约大一个数量级)得到的功率透射率 $T$ 与泵浦光频率调谐量的关系曲线如图5,与参考文献[3]中图2所示的实验结果非常相似,说明泵浦光频率调谐量精度对各吸收峰值大小的实验测量结果有较大影响。

### 3 结论

通过对熔锥光纤与球微腔耦合系统临界耦合的理论模拟,得到了与参考文献[3]中基本一致的实验结果,并且对单熔锥与球微腔耦合系统提出了简明近似的理论分析方法。通过对熔锥光纤与球微腔耦合系统特性的模拟,可以看出其在窄带光学滤波和密集波分复用(DWDM)等光通讯器件中有很大的应用前景。 $K_0$ 与系统结构和入射波长的依赖关系还需进一步研究,实验中泵浦光频率调谐量精度等客观因素也会对各吸收峰值大小的实际测量有很大的影响。文中的理论结果对这种系统的实际制备及其在具体器件中的应用有一定的指导作用。

#### 参考文献：

- [1] CAI Ming, BHSARDWAJ A, VAHALA K. 5-Gbit/s BER Performance on an All Fiber-Optic Add/Drop Device Based on a Taper-Resonator-Taper [J]. **IEEE Photonics Technology Letters**, 2000, 12(9): 1177-1179.
- [2] LIN H B, CAMPILLO A J. Nonlinear Optics in Droplet Microcavities Displaying Enhanced Gain [J]. **Phys. Rev. Lett**, 1994, 73(18): 2440-2443.
- [3] CAI Ming, OSKAR P, VAHALA J K. Observation of critical coupling in a fiber to a silica-microsphere whispering-gallery mode system [J]. **Physical Review Letters**, 2002, 85(1): 74-77.
- [4] SPILLAMS S M, KIPPIENBERG T J, VAHALA K J. Ultralow-threshold Raman laser using a spherical dielectric microcavity [J]. **Nature**, 2002, 415(7): 621-623.
- [5] STOKES L F, CHODOROW M, SHAW H J. All-single-mode fiber resonator [J]. **Optics Letters**, 1982, 7(6): 288-290.
- [6] BRENT L E, LAINE J P, HERAMANN A H. Analytic theory of coupling from tapered fibers and half-blocks into microsphere resonators [J]. **Journal of Lightwave Technology**, 1999, 14(4): 704-715.
- [7] LU Ying, WANG Ji-you, XU Xiao-xuan, et al. Optical bistability and differential amplification in a taper fiber coupler-microsphere resonator with nonlinear medium [J]. **Optics & Laser Technology**, 2000, 32(4): 245-249.
- [8] GRORODETSKY M L, SAVECHENKOV A A, ILCHCHENKO V S. Ultimate Q of optical microsphere resonators [J]. **Optics Letters**, 1996, 21(7): 453-455.
- [9] 陆颖, 王吉有, 徐晓轩, 等. 微球与锥形光纤耦合系统的光学特性 [J]. **南开大学学报(自然科学版)**, 2000, 33(4): 6-10.

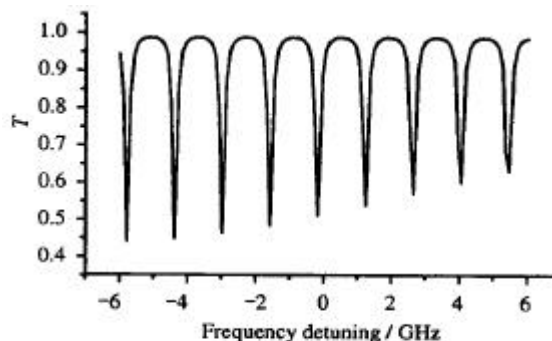


图5 泵浦光频率调谐量精度为0.11GHz时, $T$ 与泵浦光频率调谐量的关系

Fig.5 Power transmissivity as a function of frequency detuning when the precision of frequency detuning is 0.11GHz.

本期组稿：徐荣昆  
责任编辑：杨淇名, 徐荣昆  
英文编辑：白德开, 温尚明  
标 引：王志伟