

文章编号: 0253-2239(2005)06-743-3

单模与多模光纤耦合器的光束合波*

柳春郁^{1,2,3} 余有龙^{2,4} 高应俊^{1,4}

1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710068
2 黑龙江大学光纤技术研究所, 哈尔滨 150080
3 中国科学院研究生院, 北京 100039
4 暨南大学物理系, 广州 510632

摘要: 现有的光纤耦合器在作为分波器使用时具有较低的插入损耗, 在作为合波器时插入损耗较大, 为实现低损耗合波目的, 提出一种由单模与多模光纤共同构成的混合型光纤耦合器。利用耦合波方程理论分析其工作原理, 计算机模拟其耦合过程。采用熔锥法制作工艺, 完成单模与多模光纤耦合器的制作, 实验结果与理论模拟相吻合; 该器件单模到多模光纤的耦合效率、多模到多模光纤的耦合效率均在 90% 以上, 实现了两路光束的功率合波。作为低插入损耗合波器件可广泛应用于光通信以及双包层光纤激光器抽运光的注入。

关键词: 导波与光纤光学; 合波器; 熔锥型; 光纤耦合器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

The Combination of Beams between Single-Mode and Multimode Fibers in Fused Coupler

Liu Chunyu^{1,2,3} Yu Youlong^{2,4} Gao Yingjun^{1,4}

1 Xian Institute of Optics and Precision Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Xian 710068
2 Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin 150080
3 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039
4 Department of Physics, Jinan University, Guangzhou 510632

Abstract: As a splitter, the common fiber coupler has a low insert loss, while as a combiner it exhibits high loss. In order to obtain the combining beams with low insert loss, a new configuration coupler is presented, which is constituted with a single-mode fiber and a multimode fiber. The working principle is theoretically analyzed by the coupling wave equation and the coupling procedure is simulated by the computer. The coupler was made with a single-mode fiber and a multimode fiber by fused-taper technology. The result agreed well with the simulating drawing. The combining of two beams is realized. The coupling ratio of each arm is more than 90%. As a combiner, with low insert loss, this component could be used in optical communication and double cladding fiber laser to improve coupling efficiency of pumping light.

Key words: guided wave and fiber optics; combiner; fused taper; fiber coupler

1 引 言

普通对称结构的熔锥型光纤耦合器在分波方面效果很好, 能够将一路光信号以极低的功率损耗(插入损耗 $L_{in} < 0.1$ dB)为代价分配到两个或多个支路中去; 但是在作为合波器、上下载复用器时都会产生较大的插入损耗, 如 3 dB、6 dB^[1]。现有的波分复用器

是非对称结构, 可以实现特定波长 980 nm/1550 nm、1480 nm/1550 nm 的功率合波, 由单模光纤制成。结合宽带耦合器、波分复用器的非对称结构, 本文提出了利用熔锥法制作单模与多模光纤的混合型耦合器实现光束合波。该器件能够以较低的插入损耗, 将两路光束注入到一根光纤中, 实现功率上的合波, 弥补

* 黑龙江省教育厅科技项目(10531Z010, 10531132)和广东省自然科学基金重点项目(04105843)资助课题。

柳春郁(1975~), 女, 黑龙江大学教师, 中国科学院西安光学精密机械研究所博士研究生, 主要从事光纤无源、有源器件方面的研究。E-mail: liuchunyu@hlju.edu.cn

收稿日期: 2004-06-07; 收到修改稿日期: 2004-11-08

普通波器的功率高损耗缺陷。也可以用于大功率双包层光纤激光器抽运光注入。文献[2~9]中大功率光纤激光器的抽运都是利用非球面镜组将激光二极管抽运光耦合到双包层光纤中,激光二极管抽运光经过耦合透镜组后又经过一个由双色镜构成的端镜,造成激光二极管抽运光的耦合效率较低,只有50~55%左右,而且利用透镜实现强光耦合导致激光器体积庞大,稳定性差,易受环境条件干扰。利用本文提出的混合型光纤耦合器可以克服以上缺点,实现低成本全光纤双包层激光器。

2 实验原理

忽略光纤的传输损耗,在弱导近似下,耦合器两输出端的功率可由下式描述:

$$\begin{cases} P_1(z) = 1 - F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \\ P_2(z) = F^2 \sin^2\left(\frac{C}{F}z\right), \end{cases} \quad (1)$$

z 为耦合器制作过程中光纤的拉伸长度,其中

$$F = \left[1 + \frac{(\beta_1 - \beta_2)^2}{4C^2}\right]^{1/2} = \left[1 + \frac{(\Delta\beta)^2}{4C^2}\right]^{1/2}, \quad (2)$$

$$C = \frac{(2\Delta)^{1/2}U^2 K_0(Wd/\rho)}{\rho V^2 K_1^2(W)}, \quad (3)$$

β_1, β_2 是两根光纤在孤立状态的纵向传播常量, $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$, ρ 是光纤半径, d 是两光纤中心距离, U 是纤芯横向传播常量, W 是包层横向衰减常量, V 是孤立光纤的归一化频率, K_0 和 K_1 是零阶和一阶修正第二类贝塞尔函数。单模光纤与多模光纤间的耦合现象在文献[10]也有理论论述,本文主要从传播常量差对耦合程度影响方面进行讨论。

$\Delta\beta$ 不为零时根据(1)式可以看出功率耦合比不可能达到100%,根据(1)式分别做出 $\Delta\beta=0, 0.01, 0.03$ 时耦合比随耦合长度的振荡曲线,如图1所示。可以看出, $\Delta\beta$ 为零,即传播常量匹配时,才能实现功率的100%耦合;当传播常量稍有差异 $\Delta\beta=0.01$ 时,耦合比最大值下降到60%左右;当 $\Delta\beta=0.03$ 时,耦合比最大值已不足20%。可见,传播常量不匹配的程度越大耦合比的振荡周期越小。

本单模与多模光纤的混合型光纤耦合器,光纤的芯径、材质均不同,传播常量在拉锥初期显然不匹配,理论计算单模光纤基模 LP_{01} 与多模光纤一阶模 LP_{11} 的传播常量随光纤锥区半径的变化。如图2所示,当两根光纤芯径变化到原有尺寸的30%时单模光纤 LP_{01} 与多模光纤 LP_{11} 的传播常量相等,这时满

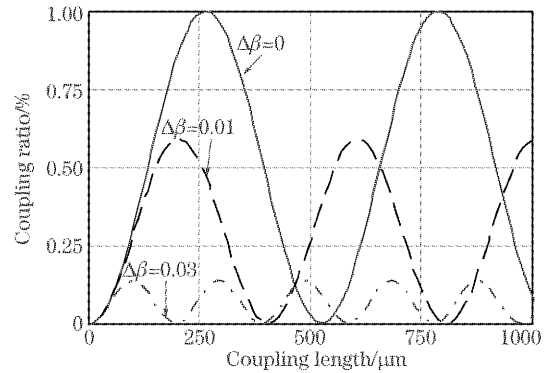


图1 不同情况下耦合比与耦合长度的关系

Fig. 1 Relationship between coupling ratio and coupling length at different situations

足传播常量匹配条件,也就是说能够实现百分之百的光束耦合,但这是在不同模式之间实现的光功率耦合—— LP_{01} 模到 LP_{11} 的耦合。

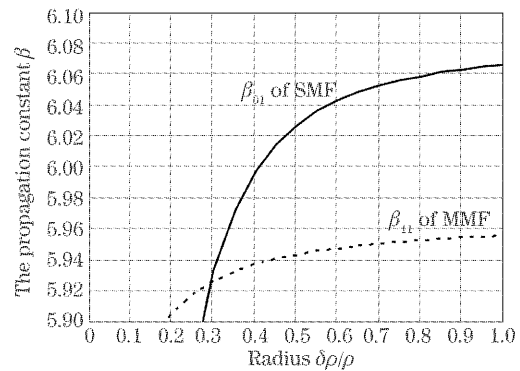


图2 传播常量随光纤半径变化图

Fig. 2 Relationship between the fiber radius change and the propagation constant

在光纤被熔融拉锥过程中,随着耦合长度的增加,光纤芯径随之变小,两根光纤中的 LP_{01} 和 LP_{11} 的传播常量差逐渐减小,利用计算机模拟耦合比随耦合长度增加时发生的变化,如图3所示。从图中

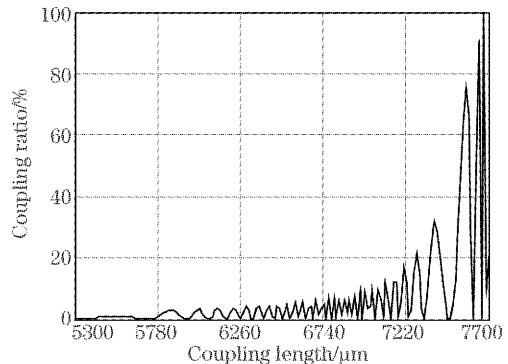


图3 耦合比与耦合长度关系模拟曲线

Fig. 3 Simulating curve between coupling ratio and coupling length

可以看出耦合比最大值随着耦合长度增大逐渐升高,直至 100%。

3 实验结果

实验中利用熔融拉锥机,将康宁 SMF28 光纤与烽火 62.5 μm 多模光纤制作成混合型光纤耦合器,熔锥监视如图 4 所示。在拉锥初期耦合比振荡周期较小,耦合较弱;随着拉锥时间增加,耦合长度变长,耦合有所加强,耦合比振荡幅度增大;第三阶段,耦合进一步加强,耦合比接近 100%。与计算机模拟曲线图 3 吻合。用电子显微镜对拉锥后的光纤锥区进行测量,测得锥区光纤最小直径为 40 μm ,所用光纤包层直径均为 125 μm ,可知光纤芯径变化到原来的 32%,与图 2 中 $\Delta\beta=0$ 时纤芯变化到 30% 时接近,由此推断这时耦合仍为传播常量不匹配耦合,耦合比不会达到 100%。对所制作的合波器进行测试,分别在单模光纤、多模光纤注入 LP₀₁ 模式光束,多模光纤利用滤模器实现 LP₀₁ 模注入。在耦合器对称端口处,只有多模光纤有较大光功率输出,每路耦合效率均在 90% 以上;当在单模光纤与多模光纤中同时注入 LP₀₁ 模式光束时,多模光纤处有较大光功率输出,单模光纤只有少部分光能量。测试结果均验证了器件的不匹配耦合。分析未实现 100% 耦合的原因:这是由于制作工艺造成的。实验中计算机控制火头退出、光纤夹具停止,这两个动作是计算机比较探测器测量值与耦合比设定值相等时发出指令来完成的,探测器响应到火头退出、光纤夹具停止存在时延;若耦合比设定值为 100%,那么实际上会发生耦合过量,耦合比下降;因此只能根据经验将设定值设为略小于 100%,利用时延补充,才能得到接近 100% 的耦合比,因此单模光纤不可避免有少部分能量输出,耦合比的提高需要进一步的工艺完善。

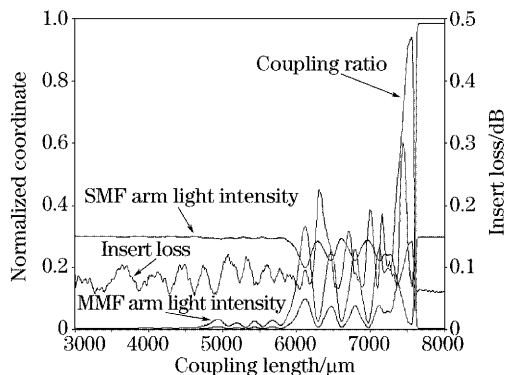


图 4 熔锥监视图

Fig. 4 Monitoring drawing of fused taper

4 结 论

提出了一种单模与多模光纤的混合型光纤耦合器。单路耦合效率均在 90% 以上。这类耦合器适用于光通信,作为合波器能够大大降低插入损耗;同时也可用于大功率双包层光纤激光器中(采用单模光纤输出的抽运光源),只需将多个此种器件串连就能够方便地增加抽运光的注入路数。我们引入的混合型结构,其多模光纤数值孔径较大,能够有效接收注入光能;多模光纤芯径增大,可以降低光能量密度,不会导致光纤的损伤。下阶段实验将进一步提高耦合比,尝试不同种类多模光纤间的混合耦合器,实验大孔径光纤间的功率合波,计划应用于强光的光束耦合,拓宽光纤耦合器的应用范围。

参 考 文 献

- 1 R. Kashyap, J. R. Armitage, R. Wyatt *et al.*. All-fibre narrowband reflection gratings at 1500 nm[J]. *Electron. Lett.*, 1990, **26**(11): 730~732
- 2 A. Asseh, H. Storoy, J. T. Kringlebotn *et al.*. 10cm Yb³⁺ DFB fiber laser with permanent phase shifted grating [J]. *Electron. Lett.*, 1995, **31**(12): 969~970
- 3 H. M. Pask, J. L. Archambault, D. C. Hanna *et al.*. Operation of cladding-pumped Yb³⁺-doped silica fiber lasers in 1 μm region[J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(11): 863~865
- 4 Chen Bai, Chen Lanrong, Lin Zunqi *et al.*. LD pumped Yb³⁺-doped double-cladding fiber laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(2): 101~104 (in Chinese)
陈 柏,陈兰荣,林尊琪等. LD 抽运的掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(2): 101~104
- 5 Ning Ding, Huang Bangcai, Xiang Yang *et al.*. Effect of back-cavity mirror on Yb³⁺-doped double-clad fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3): 313~316 (in Chinese)
宁 鼎,黄榜才,项 阳等. 后腔镜对掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器性能影响的研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3): 313~316
- 6 Zhou Jun, Lou Qihong, Li Tiejun *et al.*. 4.9 W CW ytterbium-doped double-cladding fiber laser and its output characteristics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4): 476~479 (in Chinese)
周 军,楼祺洪,李铁军等. 4.9 W 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器及其输出特性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4): 476~479
- 7 Lou Qihong, Zhou Jun, Zhu Jianqiang *et al.*. 10 W double-cladding fiber laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(9): 1080~1081 (in Chinese)
楼祺洪,周 军,朱健强等. 10 瓦级双包层光纤激光器[J]. *光学学报*, 2003, **23**(9): 1080~1081
- 8 Xiang Yang, Xu Zhaowen, Ning Ding *et al.*. Yb³⁺-doped multi-wavelength double clad fiber laser[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 403~406 (in Chinese)
项 阳,许兆文,宁 鼎等. 掺 Yb³⁺ 双包层光纤激光器的多波长输出[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 403~406
- 9 Jun Li, Yubin Guo, Tianshu Wang *et al.*. An all-fiber type Er³⁺/Yb³⁺ co-doped fiber laser[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(9): 503~505
- 10 Hungchun Chang, Horngshou Huang, Jingshoun Wu. Wave coupling between parallel single-mode and multimode optical fibers[J]. *IEEE MTT.*, 1986, **34**(12): 1337~1343