

激光熔融拉锥型微型光纤耦合器设计

倪 玮 吴兴坤

(浙江大学现代光学仪器国家重点实验室, 光及电磁波研究中心, 杭州 310027)

摘 要 采用聚焦红外激光光束进行熔融加热, 针对激光熔融拉锥型光纤耦合器设计了一种熔融区域长度为 $200\ \mu\text{m}$ 的微型光纤耦合器. 使用光束传输法对拉锥长度和耦合区域的宽度进行了模拟并与实验结果比较, 在 $1320\ \mu\text{m}$ 的拉锥长度和 $14\ \mu\text{m}$ 的耦合宽度处找到了最优化且低损耗的耦合器尺寸配置.

关键词 微型光纤耦合器; 激光熔融; 光束传输法

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

熔融拉锥型光纤耦合器或分束器是光器件中最具代表性的一种基础器件, 在光纤通信中得到了广泛的应用. 与平面波导器件(PLC)^[1]相比, 不足之处是尺寸稍大, 复用波长数少, 耦合或分束端口数低, 阻碍了小型化的发展.

针对熔融拉锥型光纤耦合、分路器的缺陷, G. Kakarantzas 等提出了一种利用 CO_2 激光器制作成的微型熔融拉锥型光纤耦合器^[2]. 基于计算机控制的光纤拉锥装置^[3], 使用功率为 $20\ \text{W}$ 的连续二氧化碳激光器作为热源, 而不是传统的乙炔—丁烷火焰, 将两根预先拉锥至数十微米的光纤平行放置, 聚焦激光束至一个微米区域将光纤制作成微型熔融耦合器. 用此方法得到的耦合器, 其附加损耗是 $0.1\ \text{dB}$ 或更小, 其总长度仅为 $8\sim 10\ \text{mm}$, 而传统的光纤耦合器仅熔融区域长度就有 $5\ \text{mm}$, 总长度通常超过 $50\ \text{mm}$. 因而微型激光拉锥耦合器在日益缩小的器件中有极好的市场前景和应用价值.

本文分析了微型耦合器尺寸之间的相互关系, 在拉锥长度从 1000 至 $6000\ \mu\text{m}$ 的尺度范围内以及不同耦合直径上, 研究了微型耦合器的光学特性, 提出了一种作图法来获得优化结构; 以 $3\ \text{dB}$ 分路比为例, 优化的参量值为: 拉锥长度约为 $1320\ \mu\text{m}$, 耦合宽度为 $14\ \mu\text{m}$, 依此设计的微型耦合器具有极好的耦合效率.

1 模拟和比较分析

耦合器中的光传输可用不同波导的基模耦合来描述, 也可以用复合波导的低阶对称模(偶数模)和非对称模(奇数模)的差频来描述. Elio Pone^[4]等给出了一种折射率分布模型, 是拉锥型耦合器的一个

理想化模型, 可用来决定在拉锥过程中的纤芯配置和熔融耦合器的束腰区域. 光束传输法(BPM, Beam Propagation Method)^[5~10]目前广泛应用于模拟集成和光纤光学器件, 大多数模拟软件都基于此种方法. 通过使用商用软件 BeamProp, 将 BPM 方法应用于激光熔融型光纤微型耦合器的结构配置, 在各长度范围详尽地研究微型耦合器结构参量.

目前制作激光熔融型光纤微型耦合器的方法是在熔融耦合前先制备拉锥光纤, 而不是传统的拉锥和熔融耦合同时进行. 首先使用一种移动火焰作为热源, 将两根单模光纤(直径 $125\ \mu\text{m}$, 截止波长 $1250\ \text{nm}$)在几毫米的长度单位上拉锥至大约 $15\ \mu\text{m}$ 的直径, 然后平行放置退火. 第二步进行熔融耦合: 在一束聚焦的 CO_2 激光束的作用下, 两根光纤被熔融在一起. 得到的熔融连接区域大约为 $200\ \mu\text{m}$.

微型耦合器参量的优化设计尺寸取决于熔融光纤耦合器束腰区域的折射率分布函数, 该分布通过参考 Pone 等的最新工作获得^[11]; 其束腰区域有三项控制参量, 如图 1. 耦合宽度(cplwidth), 拉锥长度(taper length), 熔融长度(fused length)均为微型耦合器的最重要的决定参量. 在此类微型耦合器中, 这三个参量相互作用, 对耦合效率产生一个互相关联的影响. 因而, 如何有效快速地找到耦合效率最高的设计成为一个迫切需要解决的问题.

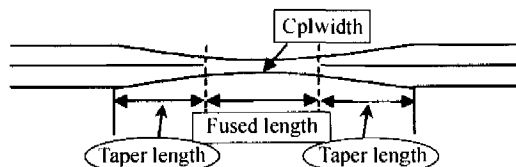


图 1 激光熔融微型耦合器的结构和参量标注
Fig. 1 Geometry of a laser-fused micro-coupler

不失一般性, 本文考虑 $3\ \text{dB}$ 的微型耦合器, 其他分路比的耦合器可通过完全相同的步骤得到. 由于光纤在熔融拉锥时, 纤芯和包层是成比例地被拉锥至大约为 $1\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$ 的直径^[2], 根据熔融型

光纤耦合器的一般模型^[1],考虑熔融连接时的损耗,可得出耦合宽度的估算值大约为 15 μm ,为了得到最佳值,耦合宽度的模拟范围为 10~20 μm . 耦合宽度对功率分布的影响是通过改变耦合宽度后,对输出功率的观察而得到的. 这里假定输入的总功率为一个标准单位,图2描述的是在拉锥长度为 3000 μm ,熔融长度为 200 μm 时,耦合宽度对输出功率比的影响.

从图 2 可以看到,随着耦合宽度的增加,监测到的两个臂的输出功率都显示出接近相似的正弦变化规律,因此耦合宽度是功率比的一个敏感的决定因素. 图 2 表示在耦合宽度大约为 15 μm 时可以得到 3 dB 的微型耦合器. 另一方面,拉锥长度也能影响功率比,只是影响的幅度比较小,结果如图 3,此时耦合宽度为 15 μm ,熔融长度为 200 μm .

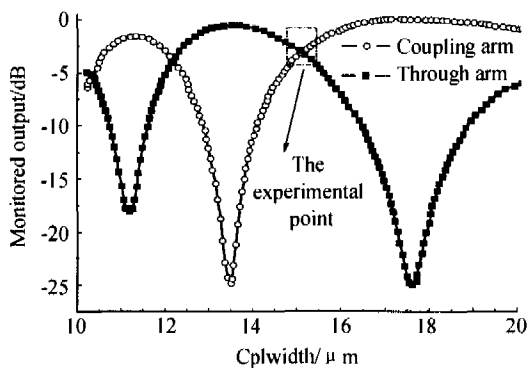


图 2 耦合宽度对输出光功率的影响
Fig. 2 Output power ratio vs cplwidth

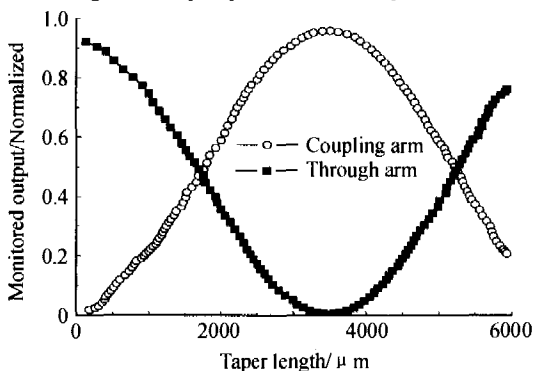


图 3 拉锥长度对输出光功率的影响
Fig. 3 Monitored output power vs taper length

3 dB 耦合器的拉锥长度在两个尺寸区域,一个为 1600~1700 μm ,另一个为 5300~5400 μm . 为了减小耦合器的尺寸,选择在第一个区域进行拉锥长度对功率比影响的深入的模拟分析. 第一个区间在 3 dB 处的交叉点大约为 1640 μm . 在图 4 给出两种情况下,即耦合宽度和拉锥长度分别取图 3 给出的两个 3 dB 点的情况下的模拟结果. 图中 a, b 的耦合宽度分别为 14 μm , 15 μm ;拉锥长度分别为 1640 μm , 4330 μm . 在图 4a 中当熔融长度大约为 200 μm 处,两个功率臂输出功率接近,而图 4b 情况却不是,而是一个较高的插入损耗所引起的. 观察图 2 到图 4,拉锥长度和熔融长度,以及耦合宽度均在一定程度上影响着输出功率比,也即三个尺寸参量是相互作用地来决定功率比和插入损耗的. 因此单独地考虑其中任何一个参量都是不完整的,至少两个参量的联合考虑才是正确的.

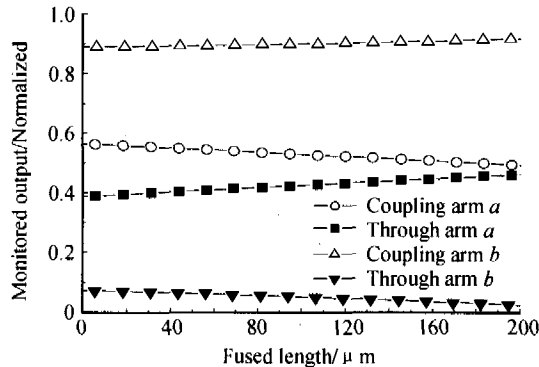


图 4 熔融长度对输出光功率的影响
Fig. 4 Monitored output power vs fused length

将拉锥长度设置在 1640 μm 处,通过监视分路功率并对耦合宽度和熔融长度两个参量进行扫描,结果如图 5,图中 a, b, c, d, e 的耦合宽度分别为 13 μm , 13.5 μm , 14 μm , 14.5 μm 和 15 μm . 可以看出,对于一个拉锥长度已经确定的耦合器,耦合比主要由耦合宽度来决定,熔融长度的变化造成的影响相对比较小. 从图 5 中也可以得到,熔融长度为 200 μm ,耦合宽度为 14 μm 时,这样配置的耦合器是一种具有低插入损耗的 3 dB 耦合器.

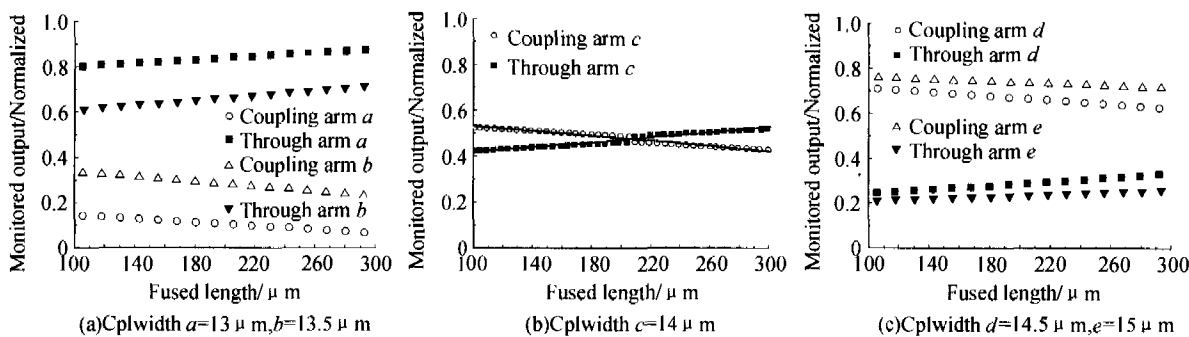


图 5 熔融长度对输出光功率的影响
Fig. 5 Monitored output power vs fused length

在图 4 中,当两个功率臂互相靠近,但没有交叉,这就表明当熔融长度保持在 $200\ \mu\text{m}$ 时,还需要另一个迭代过程来寻找最佳的拉锥长度. 图 6 记录的是耦合比对拉锥长度和耦合宽度的依赖,而熔融长度则保持不变,这是第二次迭代的结果. 图中 a, b, c, d, e 的耦合宽度分别为 $13\ \mu\text{m}, 13.5\ \mu\text{m}, 14\ \mu\text{m}, 14.5\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$. 同样,功率分布随这两个参数的

变化而变化. 图 6 中,耦合宽度随着拉锥长度的增加也增加,因此,要得到一个高效率的 3 dB 微型耦合器,同时减小耦合宽度和拉锥长度是一个有效的方法. 并且图 5 说明耦合宽度小于 $14\ \mu\text{m}$ 是不合适的,因此耦合宽度的最佳取值范围应该在 $14\sim 14.5\ \mu\text{m}$ 之间;据此,对应于图 6c 和 d,可以得到,对于一个 3 dB 的微型耦合器,拉锥长度的最佳值约为 $1320\ \mu\text{m}$.

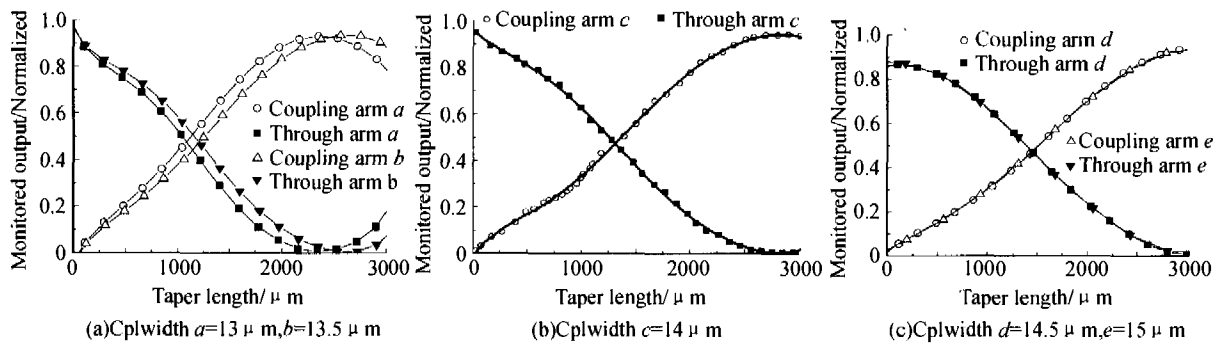


图 6 拉锥长度对输出光功率的影响
Fig. 6 Monitored output power vs taper length

但图 5 是在拉锥长度为 $1640\ \mu\text{m}$ 时的计算结果,因而需要返回去验证在拉锥长度为 $1320\ \mu\text{m}$ 时的最佳值. 图 7 给出的是验证的结果,证明在熔融

长度取 $200\ \mu\text{m}$,耦合宽度取 $14\ \mu\text{m}$ 时,耦合器仍保持优越的性能参量. 图中 a, b, c, d, e 的耦合宽度分别为 $13\ \mu\text{m}, 13.5\ \mu\text{m}, 14\ \mu\text{m}, 14.5\ \mu\text{m}$ 和 $15\ \mu\text{m}$.

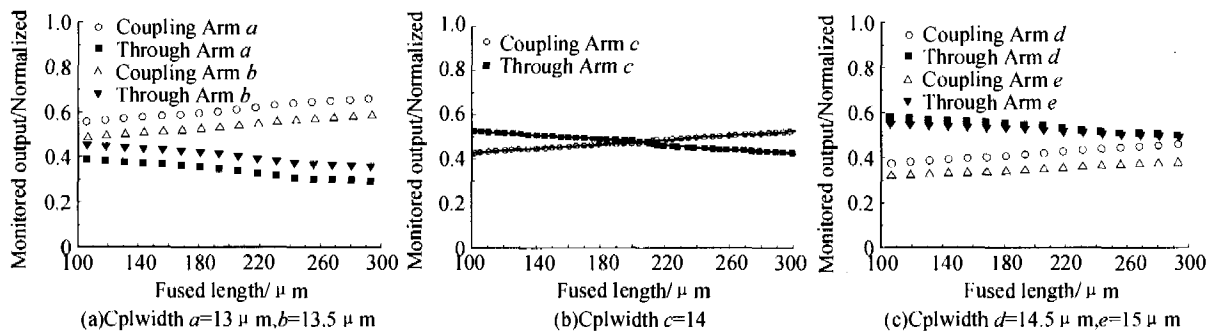


图 7 熔融长度对输出光功率的影响
Fig. 7 Monitored output power vs fused length

根据以上的分析和模拟的结果,可以总结如下: 尽管单次叠代很难获得三个控制参量的精确值,但通过三个参量之间的权衡,可通过作图法获得优化的耦合区结构配置;其过程为:①耦合宽度的估算,②察看熔融长度与功率的关系选择拉锥长度,③选定拉锥长度后,监视分路功率并对耦合宽度和熔融长度两个参量进行扫描,由分路比确定耦合宽度,④返回叠代确认熔融长度.

对于一个 3 dB 的微型耦合器,一组优化后的配方为:耦合宽度 (cplwidth) 为 $14\ \mu\text{m}$,拉锥长度 (taper length) 为 $1320\ \mu\text{m}$,熔融长度 (fused length) 为 $200\ \mu\text{m}$.

图 8 给出此设置时的耦合器输出功率分布. 由图可见,这个优化后的耦合器具有低的附加损耗 $0.02\ \text{dB}$ 和插入损耗 $3.04\ \text{dB}$. 这对全光纤微型耦

合器是一个倍受鼓励的结果,因为原先的预想是,在尺寸上的急剧减小将会引起高的插入损耗,而结果表明通过优化的设计,微型耦合器可以得到与传

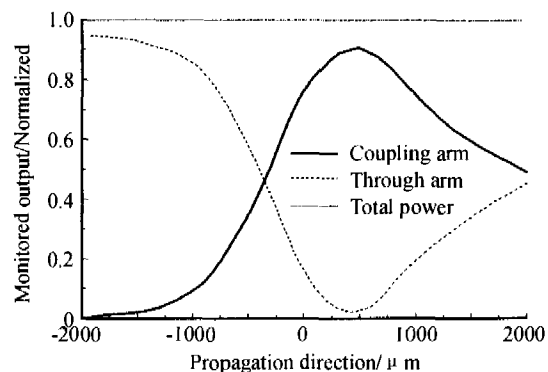


图 8 一个优化的 3 dB 微型耦合器的输出功率
Fig. 8 Monitored output power of an optimized 3 dB microcoupler

统熔融拉锥耦合器相仿的性能。模拟结果与文献[3]中的实验测量也是相符合的。

3 结论

具有优越光学性能的微型光纤拉锥耦合器可借助小尺度激光束熔融法制造,其外尺寸仅为传统火焰熔融拉锥型耦合器的四分之一左右。通过研究微型耦合器的控制参量,包括耦合宽度,拉锥长度,熔融长度,发现,尽管单次叠代很难获得三个控制参量的精确值,但通过三个参量之间的权衡,可通过作图法获得优化的耦合区结构配置。以 3 dB 微型耦合器为例,在拉锥长度取 1320 μm ,耦合宽度取 14 μm ,熔融长度为 200 μm 时可获得一组优化设计参量,此时的耦合器具有极低的附加损耗 0.02 dB 和插入损耗 3.04 dB,与文献[3]中的实验结构相符合。文中提出的设计算法与熔融型光纤耦合器的工艺相结合,可以很好地去理解微型耦合器的尺寸范围。

参考文献

- 1 孔繁敏,李康,郭毅峰,等. 平面光波导结构的 FDTD 分析. 光子学报,2004,33(3):281~283
Kong F M, Li K, Guo Y F, et al. *Acta Photonic Sinica*, 2004,33(3):281~283
- 2 Kakarantzas G, Dimmick T E, Birks T A, et al. Fused taper fibre microcoupler. *Proceedings of Optical Fiber Communications Conference (OFC)*, March 5-10, 2000, Baltimore, 1:35~37
- 3 Dimmick T E, Kakarantzas G, Birks T A, et al. Carbon dioxide laser fabrication of fused-fiber couplers and tapers. *Applied Optics*, 1999,38(33):6845~6848
- 4 Pone E, Daxhelet X, Lacroix S. Refractive index profile of fused-tapered fiber couplers. *Opt Express*, 2004,12(13):2909~2918
- 5 倪晓昌,王清月,胡明列. 飞秒激光微细加工中光耦合器参量的数值模拟. 光子学报,2005,34(2):161~164
Ni X C, Wang Q Y, Hu M L. *Acta Photonic Sinica*, 2005,34(2):161~164
- 6 Hadley G R. Transparent boundary condition for beam propagation. *IEEE J Quantum Electron*, 1992,28(1):363~370
- 7 鲍俊峰,吴兴坤. 一种定向耦合器型高聚物光开关设计. 光子学报,2005,34(3):361~364
Bao J F, Wu X K. *Acta Photonic Sinica*, 2005,34(3):361~364
- 8 Hadley G R. Multistep method for wide-angle beam propagation. *Opt Lett*, 1992,17(24):1743~1745
- 9 Huang W P, Xu C L. Simulation of three dimensional optical waveguides by a full-vector beam propagation method. *J Quantum Electron*, 1993,29(10):2639~2649
- 10 Chung Y, Dagli N. An assessment of finite difference beam propagation method. *J Quantum Electron*, 1990,26(8):1335~1339
- 11 Pone E, Daxhelet X, Lacroix S. Refractive index profile of fused-fiber couplers cross-section. *Opt Express*, 2004,12(6):1036~1044

An Algorithm for the Design of Laser-fused Biconical Microcoupler

Ni Wei, Wu Xingkun

State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentations, Department of Optical Engineering,
Zhejiang University, Hangzhou 310027

Received date:2005-07-14

Abstract Laser-fused fiber taper optical coupler features a significantly smaller package in comparison with conventional flame fused coupler and was ready to fit in modern compact devices. An algorithm was proposed for the design of the microcoupler and a 3 dB microcoupler with a fused length 200 μm was presented. As an effort to search for optimal low loss coupling, optical properties of the micro-coupler were studied for various taper lengths from 1000 to 6000 μm as well as for different diameters in coupling region. Beam Propagation Method (BPM) was used to simulate the operation of microcoupler and the theoretical result was compared with measured property. An optimum design was found at a taper length of about 1320 μm and coupling diameter of 14 μm with an excellent coupling efficiency.

Keywords Fiber microcoupler; Laser-fused; BPM



Ni Wei was born in 1981 in Jiangsu, China. She received her bachelor degree from Zhejiang University in 2004 and is currently a doctoral student at Zhejiang University. Her researches focus on micro-optics and its applications in optical devices.