

doi:10.3788/gzxb20154409.0923003

熔锥型光纤耦合器拉制过程的仿真和实验研究

苗培培¹, 朱益清¹, 王俊¹, 陶星晨¹, 姚晓天^{2,3}

(1 江南大学 理学院, 江苏 无锡 214000)

(2 天津大学 精密仪器与光电工程学院, 天津 300129)

(3 苏州光环科技有限公司, 江苏 苏州 215000)

摘 要: 基于熔锥型光纤耦合器在拉锥过程中光纤锥形的渐变特性和光纤之间熔融度的变化特点, 构建了光纤耦合器在拉制过程中波导结构的变化模型. 利用光束传播法对耦合器的拉制过程进行数值模拟, 得到耦合器输出光功率随拉伸长度的变化规律以及耦合器的能量分布图. 理论模拟和实验结果表明, 光纤间熔融度与制作耦合器时的氢气流量及拉伸速度有关, 氢气流量大, 拉伸速度小, 熔融度就大; 光纤之间的耦合作用与拉伸长度及熔融度有关, 拉伸长度增加或熔融度增大, 都会使光纤间的耦合更加显著; 拉伸长度不大时, 锥形区的耦合可以忽略; 随着拉伸长度的增加, 光纤变细, 耦合作用逐渐增强, 锥形区的耦合现象越明显, 同时光场也逐渐由纤芯向外发散, 产生附加损耗.

关键词: 波导器件; 波导结构; 光束传播法; 数值模拟; 耦合器; 拉伸过程; 熔融度; 光纤耦合; 分光比; 光场分布

中图分类号: TN253

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)09-0923003-5

The Simulation and Experimental Study of Drawing Process of Fused Fiber Coupler

MIAO Pei-pe¹, ZHU Yi-qing¹, WANG Jun¹, TAO Xing-chen¹, YAO Xiao-tian^{2,3}

(1 College of Science, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China)

(2 College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

(3 Suzhou Optoring Ltd. Co., Suzhou, Jiangsu 215123, China)

Abstract: Based on the gradient characteristic of taper of optical fiber and the change of degree of fusion between two fibers of fused fiber coupler in the drawing process, the changing model of waveguide structure of optical fiber coupler was constructed. The relationship between optical power and stretching length was obtained, and optical field distribution during drawing process was gotten by numerical simulation with beam propagation method. The simulation and experimental results show that hydrogen flow and drawing speed have an influence on degree of fusion. Large hydrogen flow and low speed make degree of fusion large. The coupling effect between fibers is related to the stretching length and the degree of fusion. Long stretching length and large degree of fusion make coupling effect strong. When the stretched length is short, the coupling of taper region can be ignored. On the one hand, it's revealed fibers become thinner and coupling effect becomes stronger in taper region with the increasing of stretched length. On the other hand it is also showed that the energy leaks out of the fiber and it leads to excess loss.

Key words: Guide wave device; Waveguide structure; Beam propagation method; Numerical simulation; Couplers; Tapering process; Degree of fusion; Optical fiber coupling; Coupling ratio; Optical field distribution

OCIS Codes: 230.7370; 230.3120; 230.2285; 060.2340; 060.2430

基金项目: 国际科技合作专项(No. 2014DFA12930)和江西省基础 Research 计划(No. BK20130373)资助

第一作者: 苗培培(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤器件. Email: mpp1007@163.com

导师(通讯作者): 朱益清(1962-), 男, 副教授, 主要研究方向为光器件和光纤通信. Email: zhuyq11@126.com

收稿日期: 2015-03-17; 录用日期: 2015-06-05

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

光纤耦合器是被广泛应用的光无源器件之一,在光纤通信或光纤传感等系统中起关键作用,可以实现光信号分路、合路及用于构建光纤网络^[1-4].熔融拉锥法因其附加损耗低、方向性好、分光比易于控制、成本低廉等特点在制作光纤耦合器中使用较多.熔锥型光纤耦合器是将两根光纤并在一起熔融拉锥而成,光纤的融合程度可以用熔融度来描述,熔融度决定了光纤纤芯之间的相对间距.国内外对于熔锥型耦合器的模型^[5-9]、特性^[5,10]以及耦合机制^[11]等方面的研究较多,以往的研究均针对一定拉锥长度的光纤耦合器,并考虑熔融度对纤芯之间距离的影响^[7-9],构建相应的耦合器模型.在此基础上采用不同近似条件,用耦合模理论从各个方面讨论耦合器的性能特点和耦合机理,对于光纤之间的熔融度则未见进一步的探讨和研究.

本文根据熔锥型光纤耦合器的复合波导特点,考虑控制过程中耦合器波导结构的变化规律,建立了拉伸过程中熔锥型光纤耦合器的变化模型.利用光束传播法对光纤耦合器在熔融拉伸过程进行仿真模拟,计算得到输出光功率随拉伸长度变化的关系曲线.并与不同控制条件下耦合器实际监测到输出光功率变化曲线进行对比,可以得出熔融度与拉制条件有关.从光束传播法仿真计算得到的不同拉伸长度时耦合器的光场分布图,可以了解熔锥型光纤耦合器的耦合特点以及产生附加损耗的原因.

1 建立模型

熔锥型耦合器的制作过程是将两根除去涂覆层的光纤以一定的方式靠拢,在高温下加热熔融,同时向两侧拉伸,最终二根光纤产生一段双向圆锥结构,并融合在一起.单根光纤熔融拉锥的几何模型如图1,熔融拉锥的光纤可分为熔融区、锥形区和未拉伸区.

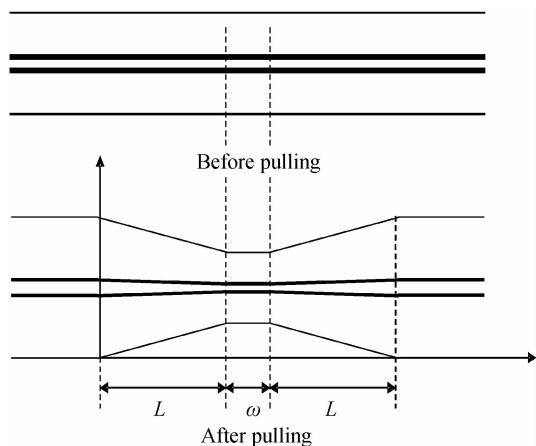


图1 单根熔锥光纤模型
Fig.1 Model of fusion fiber

由拉伸过程中光纤体积守恒得出拉伸长度与纤芯直径之间的关系为^[4-5]

$$b(z) = \begin{cases} b_0 \exp(-z/\omega), & z < L \\ b_0 \exp(-L/\omega), & L \leq z \leq L + \omega \\ b_0 \exp[-(2L + \omega - z)], & L + \omega \leq z \leq 2L + \omega \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω 表示耦合区长度, $2L$ 表示拉伸长度, b_0 表示未拉伸时纤芯的直径.

在光纤拉伸过程中,光纤包层直径在熔融拉锥过程中包层和纤芯直径的比值保持不变,由此可得出

$$a(z) = b(z) \frac{a_0}{b_0} \quad (2)$$

式中 a_0 表示未拉伸时包层直径.

熔锥型光纤耦合器是由二根相同的光纤紧贴在一起熔融拉锥而成的复合波导,其几何结构可视作两根双向锥形光纤在熔融区和锥形区不同程度地相互融合在一起,因此两纤芯之间的距离不仅与锥形区光纤包层的直径有关,还与二锥形光纤的熔合程度有关.熔锥型耦合器模型可分为非耦合区、锥形区和熔融区,如图2.

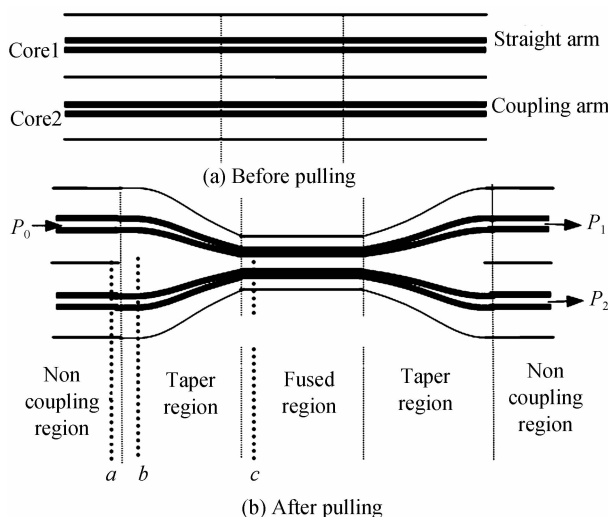


图2 熔锥型光纤耦合器模型

Fig.2 Model of fused fiber couplers

图中不同位置点 a, b, c 的横截面如图3.

熔融度 α 表示两根光纤间的融合程度,定义为^[6]

$$\alpha = \frac{a(z) - d}{(2 - \sqrt{2})a(z)} \quad (3)$$

式中 d 表示两纤芯间的距离, $\alpha = 0$ 时, $d = a_0$, 二光纤相切,即二根光纤没有融合; $\alpha = 1$ 时, $d = (\sqrt{2} - 1)a(z)$, 为全熔状态.熔融度 α 与光纤熔融温度和熔融时间有关,熔融温度越高,熔融时间越长,二根光纤的熔融度越大.制作耦合器时二根光纤一起熔融并向两侧拉伸,锥形区光纤由外向里逐渐离开加热区,所以由外向里光纤的熔融时间逐渐增加,进而熔融度也是逐渐增大,位于耦合器中间部分的熔融区加热熔融时间最长,因此熔融度最大.实际上,耦合器在拉制过程中,熔融区

的两侧部分不断地向外移出加热区,成为锥形区的一部分.因此熔融区的横截面在控制过程中的变化情况也可由图3表示,未加热时熔融区两光纤相切如图3(a),加热熔融拉伸阶段会有部分融合如图3(b),加热拉伸最终融合程度达到最大如图3(c).

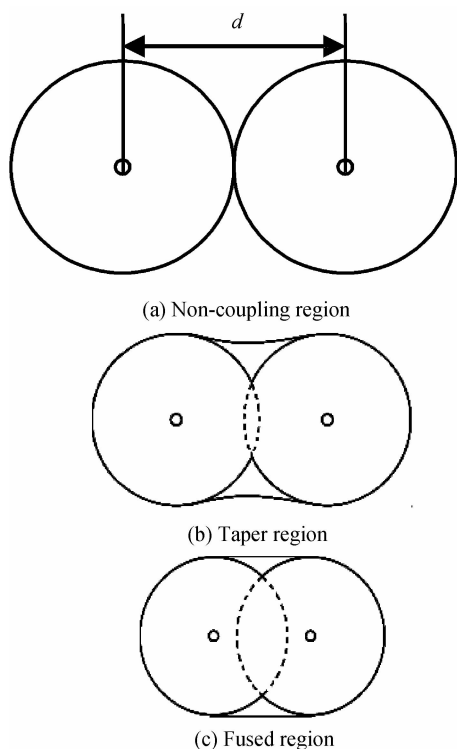


图3 不同区域的截面图
Fig.3 Geometry of different regions

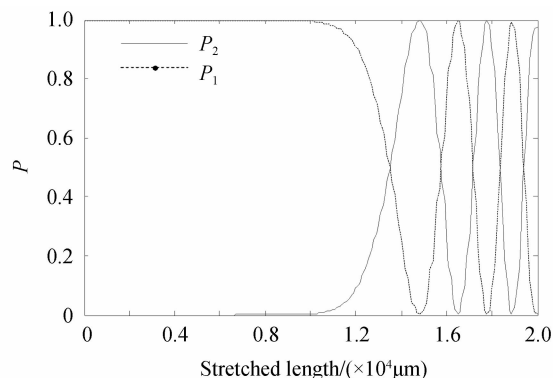
2 数值模拟和分析

光束传播法(Beam Propagation method, BPM)可用于计算光振幅在光纤或光波导中的分布及不同拉伸长度的耦合器输出端口光功率变化,是光波导器件研究和设计计算领域中最常用的方法之一^[12-14].它将波导截面分成很多方格,每个方格中的场分别用差分方程来表示,然后加入边界条件,通过求解这些差分方程得到整个截面的场分布.根据耦合器控制过程中波导结构的连续变化函数,编写相应的程序表示连续变化的波导模型,用BPM对熔锥型耦合器的拉伸过程进行仿真数值计算,得到耦合器的输出功率特性和耦合器内能量分布特性.

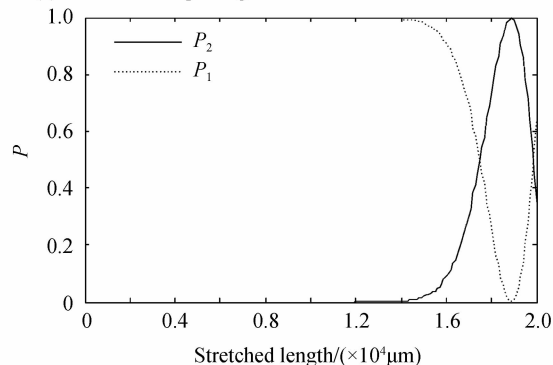
根据实际使用光纤各部分的折射率及加工制作熔锥型耦合器过程中的各项参量要求,仿真模拟中取纤芯折射率 $n_{co}=1.4677$,包层折射率 $n_{cl}=1.4633$,纤芯直径 $d=8.3\mu\text{m}$,包层直径 $D=125\mu\text{m}$,入射波长 $\lambda=1.55\mu\text{m}$,熔融区长度 $\omega=6000\mu\text{m}$.

图4为不同熔融度的耦合器直通臂输出功率 P_1 (虚线)和耦合臂输出功率 P_2 (实线)随拉伸长度的变化曲线,数值模拟曲线图中图4(a)设置拉伸长度

20mm时最大熔融度达到0.925,图4(b)设置拉伸长度20mm时最大熔融度是0.456.从中可以看出输出功率的转换周期随拉伸而缩短,纤芯越靠近,光纤之间的耦合效应越显著.比较图4(a)、(b),熔融度越大,输出功率转换的拉伸长度周期越短.这表明两纤芯的间距取决于光纤拉伸长度和熔融度,拉伸会使光纤变细,变细的光纤融合在一起,纤芯之间的距离自然会变小;熔融度增大则进一步缩小纤芯间距.



(a) The curve of splitting ratio of $2L=20\text{mm}$ and the final $\alpha=0.925$



(b) The curve of splitting ratio of $2L=20\text{mm}$ and the final $\alpha=0.456$

图4 模拟分光比曲线

Fig.4 Simulation curve of splitting ratio

图5为以上两种情况下附加损耗随拉伸长度的变化曲线,可以看出如果拉伸长度不大,附加损耗很小,但拉伸长度增加则会加大附加损耗,因此制作耦合器,一般选择拉伸长度在第一个转换周期内.

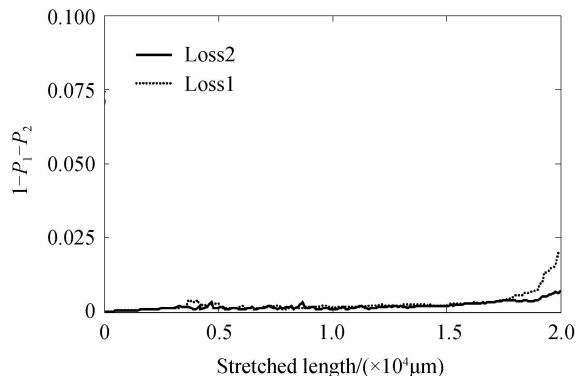


图5 附加损耗随拉伸长度的变化曲线

Fig.5 The Excess loss curves with the stretched length

通过对模型计算可以得到耦合器在任何拉伸长度时的光场分布. 以熔融区拉伸最终的熔融度 $\alpha=0.925$ 耦合器拉制过程为例, 选取其拉伸长度分别是 14 mm 和 20 mm 时耦合器的能量密度分布, 如图 6(a)、(b) 所示. 当拉伸长度较小时, 能量分布在纤芯及其附近; 当拉伸长度变大时, 能量由熔融区开始向离纤芯远处扩散, 引起附加损耗. 图 5 计算得出的附加损耗可以由此说明, 另外图 6(a)、(b) 还显示熔锥型耦合器的锥形区靠近熔融区一端存在一定的模场耦合, 并且随着光纤的拉伸, 锥形区的这一耦合作用越来越明显.

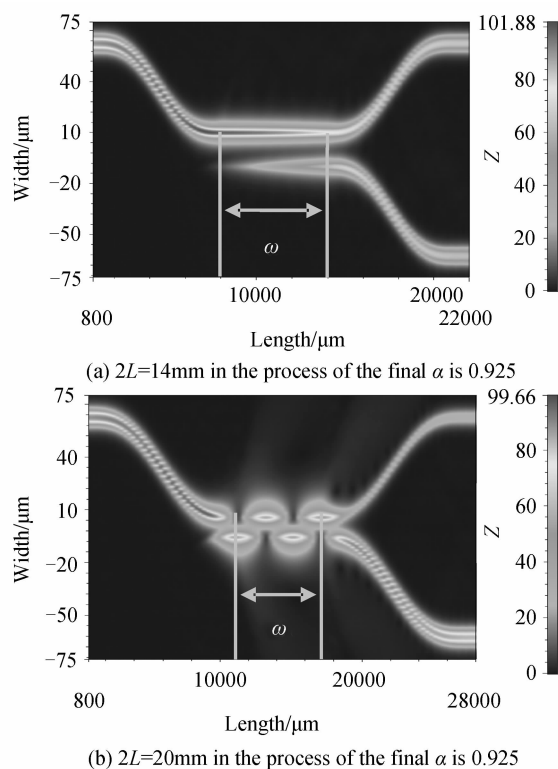


图 6 不同拉伸长度的耦合器的能量分布

Fig. 6 Optical power distribution of couplers with different stretched length

3 实验对比

用 SCS-4000 熔融拉锥系统制作熔锥型光纤耦合器, 实验中采用 SMF-28 单模光纤, 入射波长 $\lambda=1550\text{ nm}$, 火焰熔融光纤的范围设置在约 6 mm, 利用氢氧火焰加热熔融光纤. 实验中入射光从一根光纤端口通过, 在制作熔锥型光纤耦合器的过程中分别设置不同的氢气流量和拉伸速度, 检测两根光纤输出端口的光功率随拉伸长度的变化过程.

图 7 是不同的熔融拉伸条件下控制耦合器时, 实时监测的两输出端功率变化曲线, 最终拉伸长度都为 20 mm.

图 7 所示的实验测量的输出功率随拉伸长度的变化规律与计算机模拟计算的结果十分符合, 并且实验

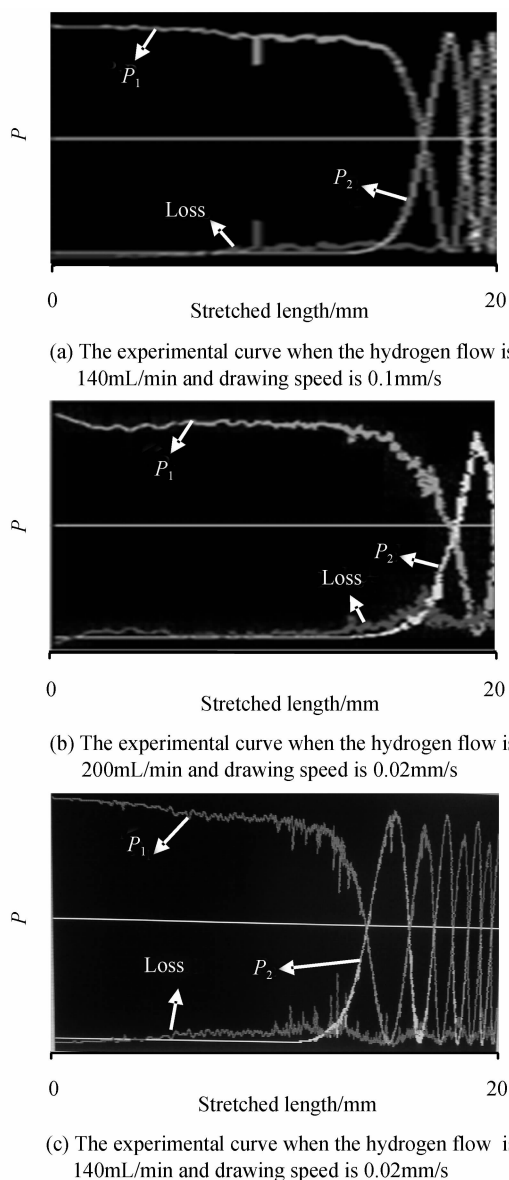


图 7 实验监测曲线

Fig. 7 Results of the experimental monitoring

曲线显示: 在不同的控制条件下, 输出功率的转换周期有所不同, 根据前面理论分析的结果, 这是由于光纤之间的熔融度大小的影响, 其大小取决于制作耦合器时的火焰温度和拉伸速度. 拉伸速度慢, 光纤拉伸同样的长度需要的时间长, 加温时间就长, 也会使熔融度增大; 氢气流量大时, 实际上火焰的温度相对较高^[15], 会使得两光纤间的熔融度增大. 所以实验中氢气流量相同, 拉伸速度慢时, 两光纤间的耦合作用更强, 如图 7(a)、(b) 所示; 当拉伸速度相同, 氢气流量大时, 两光纤间的耦合作用更强, 如图 7(b)、(c) 所示.

另外熔融度是决定光纤耦合情况的关键参量, 但要对其直接测量比较困难, 通过实验和理论曲线的对比, 可以在一定程度上间接得到不同控制条件下耦合器在熔融区的熔融度. 对比仿真曲线图 4 和实验监测曲线图 7, 发现图 7(a) 与图 4(b) 十分吻合, 因此实验曲

线图 7(a)的拉制条件和仿真曲线图 4(b)的熔融度有对应关系,即在氢气流量 140 mL/min,拉伸速度 0.1 mm/s 的条件下,光纤拉伸到 20 mm 时中间熔融区的熔融度为 0.456;由于图 7(c)与图 4(a)相一致,因此这两张图的拉制条件和熔融度相对应,即氢气流量 200 mL/min,拉伸速度 0.02 mm/s 的条件下,拉伸到 20 mm 时其熔融区的熔融度达到 0.925.

4 结论

根据熔锥型光纤耦合器在拉制过程中光纤的变化特点,结合熔融度对两根光纤间相对位置的影响,建立了光纤耦合器拉制过程中复合波导结构的模型.利用 BPM 对耦合器的拉制过程进行仿真计算,得到输出端光功率随拉伸长度的变化曲线,分析可得拉伸长度的增加和熔融度增大,都会使光纤之间的耦合效应越显著.实验结果验证了理论仿真的正确性,并且还表明不同的拉制条件会影响光纤间熔融度的大小,氢气流量大,拉伸速度小,光纤熔融度就大.通过对不同拉伸长度的耦合器模拟计算得到的光场分布,可看出拉伸长度不大时,锥形区的耦合可以忽略;随着拉伸长度的增加,光纤变细,锥形区的耦合效应变得越来越明显;同时光场也逐渐由纤芯向外发散,由此会产生附件损耗.本文方法可为制作各种类型和规格的耦合器提供实际的指导作用.

参考文献

- [1] LIN Jin-hai, ZHANG Wei-gang. Recent progress in theory, design and development of fiber coupler[J]. *Progress in Physics*, 2010, **30**(1): 37-80.
林锦海,张伟刚. 光纤耦合器的理论、设计及进展[J]. *物理学进展*, 2010, **30**(1): 37-80.
- [2] CHEN R, FERNANDO G F, BUTLER T, *et al.* A novel ultrasound fibre optic sensor based on a fused-tapered optical fibre coupler[J]. *Measurement Science and Technology*, 2004, **15**(8): 1490.
- [3] TENG J, YANG J, LV C, *et al.* Guidelines for design and fabrication of fused fiber coupler based wavelength division multiplexings[J]. *Optical Fiber Technology*, 2014, **20**(3): 239-244.
- [4] SHUAI Ci-jun, GAO Cheng-de. Microstructure analysis in the coupling region of fiber coupler with a novel electrical micro-heater[J]. *Optical Fiber Technology*, 2011, **17**: 541-545.
- [5] SHUAI C, DUAN J, ZHONG J. Experimental measurement and numerical analysis of fused taper shape for optical fiber coupler[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2007, **14**: 251-254.
- [6] YU Qing-hua, ZHAI Yu-feng, ZHOU Nan, *et al.* Improved model of fused single-mode-fiber coupler[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2007, **24**(5): 652-656.
于清华,翟玉峰,周楠,等. 熔锥型单模光纤耦合器模型的优化研究[J]. *量子电子学报*, 2007, **24**(5): 652-656.
- [7] HSIEH C S, WU T L, CHENG W H. An optimum approach for Fabrication of low loss fused fiber couplers[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2001, **69**(1): 199-203.
- [8] LACROIX S, GONTHIER F, BURES J. Modeling of symmetric 2 × 2 fused-fiber couplers[J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(36): 8361-8369.
- [9] FENG Da, LI Zheng, TANG Dan. Model of 2 × 2 fused single-mode-fiber couplers[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(11): 1316-1320.
酆达,李铮,唐丹. 2 × 2 熔锥型单模光纤耦合器的模型[J]. *光子学报*, 2003, **32**(11): 1316-1320.
- [10] REN Jian-guo, HU Yong-ming, ZHANG Xue-liang. A united model of fused single-mode fiber coupler[J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2011, **32**(1): 18-23.
任建国,胡永明,张学亮,等. 熔锥型单模光纤耦合器的一致性模型[J]. *半导体光电*, 2011, **32**(1): 18-23.
- [11] PAL B. Fabrication and modeling of fused biconical tapered fiber couplers[J]. *Fiber and Integrated Optics*, 2003, **22**(2): 97-117.
- [12] PELEGRINA-BONILLA G, HAUSMANN K, TUNNERMANN H, *et al.* Analysis of the coupling mechanism in asymmetric fused fiber couplers[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, **32**(13): 2382-2391.
- [13] LI An-ying, YANG Ya-pei. Review of the new development of beam propagation method for analysis of optical waveguide[J]. *Laser Technology*, 2000, **24**(4): 236-240.
李安英,杨亚培. 光波导光束传输法数值分析新进展[J]. *激光技术*, 2000, **24**(4): 236-240.
- [14] LIN Bin, LIAN Hua, JIN Meng-bi. Optical waveguide calculation and discussion with finite-difference beam propagation method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, **31**(s1): 503.
林斌,连华,金梦笔. 光波导的有限差分光束传播法设计及分析[J]. *中国激光*, 2004, **31**(s1): 503.
- [15] CAO Zou-yan. Experimental study on hydrogen heating source in FBT system[D]. Dalian University of Technology. 2013.
曹邹艳. 关于熔融拉锥系统中氢气加热源的实验研究[D]. 大连理工大学,2013.