

文章编号: 0253-2239(2006)04-0501-5

利用改进的熔融拉锥法制备单模光纤波分复用器*

施 雷 陈险峰** 廖尉钧 卜胜利 陈玉萍 夏宇兴

(上海交通大学物理系光学与光子学研究所区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200240)

摘要: 研究了熔融拉锥光纤型波分复用器制备过程中各相关参量对其最小信道间隔的影响。并根据理论模拟的结论设计了新型的熔融拉锥装置, 其中加热装置为有较长均匀加热区域的条形加热炉, 使熔融拉锥光纤型波分复用器的耦合长度显著加长, 改善了传统拉锥方法对这一类型波分复用器可达到的最小信道间隔的限制, 得到了初步实验结果, 最小信道间隔达到 3.01 nm。

关键词: 光纤光学; 波分复用器; 熔融拉锥; 条形加热炉

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Fabrication of Single-Mode Fiber Wavelength Division Multiplexer by Using Improved Fused Biconical Taper Method

Shi Lei Chen Xianfeng Liao Weijun Pu Shengli Chen Yuping Xia Yuxing

(Institute of Optics and Photonics, Department of Physics, National Laboratory on Local Fiber-Optic Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The influences of correlative parameters in the process of fabricating fused biconical taper fiber wavelength division multiplexer on the minimum channel spacing are studied, and an improved device for fused biconical taper is designed according to the conclusion obtained by numerical simulation, which has an electric strip heater with long uniform heating area as the heating unit. The coupling length is lengthened obviously by using the improved device, and the limitation of conventional drawing method to the reachable minimum channel spacing of fused biconical taper fiber wavelength division multiplexer is broken. A preliminary experiment result shows that the minimum channel spacing reaches 3.01 nm.

Key words: fiber optics; wavelength division multiplexer; fused biconical taper; electric strip heater

1 引 言

光波分复用(WDM)技术^[1]是在一根光纤中同时传输多种波长光信号的一项技术。按复用信道间隔不同可分为^[1]:宽波分复用(WWDM, 信道间隔大于 50 nm)、粗波分复用(CWDM, 信道间隔小于 50 nm, 典型间隔为 20 nm)、密集波分复用(DWDM, 信道间隔小于 2 nm, 典型间隔为 0.8 nm)。现在介于密集波分复用和粗波分复用应用之间(即信道间隔介于 2~20 nm)的波分复用技术还没有得到充分开发与利用。

波分复用器-解复用器(即合波器与分波器)是波分复用系统中的关键器件, 其主要功能是完成各

种波长的复用和解复用。波分复用器根据制作技术不同可以分为三大类:角色散型、滤波器型以及耦合器型^[2], 具体主要有熔融拉锥光纤型波分复用器、介质膜滤光型波分复用器、光纤光栅型波分复用器、阵列波导光栅型波分复用器等^[3~6]。

目前工业上制作熔锥光纤型波分复用器的方法多是用火焰对光纤单点加热熔融然后拉伸, 缺陷是加热区域太短, 导致可拉伸长度(对应于耦合长度)较短, 光纤直径也不够小, 所以限制了此类波分复用器可以达到的最小信道间隔。

本文设计了新型的熔融拉锥装置, 利用有较长均匀加热区域的加热装置使光纤可拉伸长度显著加

* 上海市重大基础研究项目(04DZ14001)和教育部新世纪优秀人才计划合作资助课题。

作者简介: 施 雷(1982~), 男, 湖北鄂州人, 上海交通大学硕士研究生, 主要从事亚微米光纤和波导的制备与应用研究。

** 通信联系人。E-mail: xfchen@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2005-08-09; 收到修改稿日期: 2005-10-13

长,改善了传统拉锥方法对熔锥光纤型波分复用器最小信道间隔的限制,使其最小信道间隔达到数个纳米接近密集波分复用的量级。

2 理论模拟

熔融拉锥后两光纤纤芯变细靠近,使光场向外扩展,以便出现有效的功率耦合。在拉锥区域光纤内的模式基本是包层模,光场脱离纤芯,是在包层和外部介质(一般为空气)所形成新的光波导中传播,而光纤纤芯的尺寸减小到可以忽略的程度,所以可做无芯近似处理^[7]。熔锥区光纤成为新光波导的纤芯,空气为新光波导的包层,取包层折射率为1。

对于单模光纤波分复用器,若耦合区长度为 L ,只有一个输入端有光功率 $P_1(0)$ 输入时,则两输出端光功率 $P_1(L)$ 、 $P_2(L)$ 分别为^[7]

$$P_1(L) = P_1(0)\cos^2(KL), \quad (1a)$$

$$P_2(L) = P_1(0)\sin^2(KL), \quad (1b)$$

其中耦合系数 K 为

$$K = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \cdot \frac{U^2}{a^2 V^2} \cdot \frac{K_0(Wd/a)}{K_1^2(W)}, \quad (2)$$

式中 λ 为光波真空中波长, a 为纤芯(即熔锥区光纤,成为新光波导的纤芯)半径, d 为纤芯(即熔锥区光纤)间距, n_1 为纤芯折射率(即初始包层折射率), V 为归一化频率, U 和 W 为基模的横向特征常数, K_0 、 K_1 为0阶和1阶变型第二类贝塞尔函数,且有 $V^2 = U^2 + W^2$, $U^2 = a^2(n_1^2 k_0^2 - \beta^2)$, $W^2 = a^2(\beta^2 - n_2^2 k_0^2)$, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 。取 $a = 5 \mu\text{m}$, $d = 2a$, $L = 4 \text{ cm}$,两输出端光功率与波长的关系如图1所示,纵轴为归一化功率。

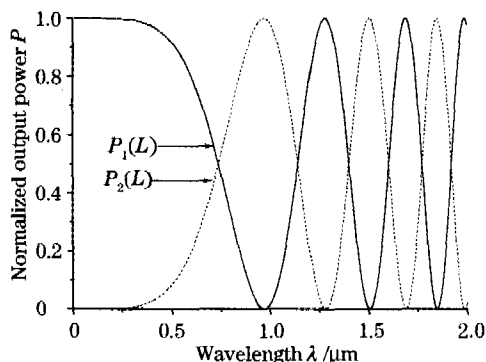


图1 输出端光功率随波长的变化

Fig. 1 Normalized optical power output versus wavelength
从(1a)式、(1b)式、(2)式可知,熔锥光纤型波分复用器对于特定波长的输出功率与 a 、 d 和 L (可认为等于拉伸长度)有关,就是说对于在特定波段范围内波分复用器可以达到的最小信道间隔 $\Delta\lambda$ 是受 a 、

d 、 L 影响的。下面通过数值模拟得到这些参量对最小信道间隔的影响,所计最小信道间隔对应于C波段(1530~1565 nm)范围内。

2.1 a 与 $\Delta\lambda$ 的关系曲线

当 d 与 L 一定时,光纤半径 a 对可达到的最小信道间隔 $\Delta\lambda$ 的影响,如图2所示,取 $d = 3 \mu\text{m}$, $L = 10 \text{ cm}$ 。

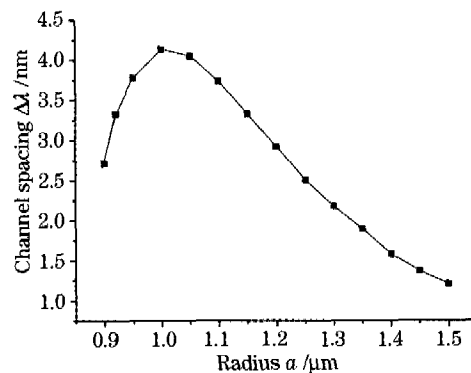


图2 光纤半径对最小信道间隔的影响

Fig. 2 Influence of the optical fiber radius on the minimum channel spacing

当间距一定时,光纤半径减小,相对距离变大,耦合减弱,耦合系数减小,能量转换长度(即光功率在两光纤中完成一次交换所需的长度) $L_0 = \pi/2K$ 变长,可复用波长数减少,波长间隔(即信道间隔)增大。但当光纤半径减小到一定大小时,消逝场携带的能量迅速增大,耦合反而增强,耦合系数增大,转换长度 L_0 变短,可复用波长数增多,波长间隔减小。

2.2 d 与 $\Delta\lambda$ 的关系曲线

当 a 与 L 一定时,光纤间距 d 对可达到的最小信道间隔 $\Delta\lambda$ 的影响,如图3所示,取 $a = 1 \mu\text{m}$, $L = 10 \text{ cm}$ 。

当光纤半径一定时,间距减小,耦合增强,耦合

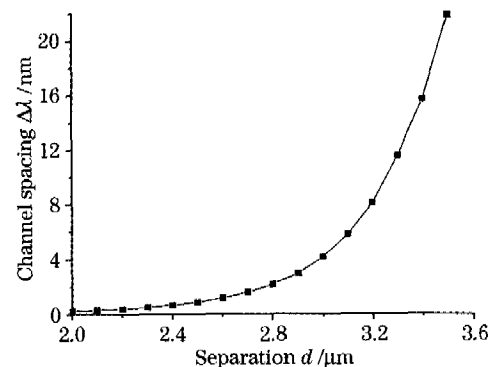


图3 光纤间距对最小信道间隔的影响

Fig. 3 Influence of separation between two optical fibers on the minimum channel spacing

系数增大,转换长度 L_0 变短,可复用波长数增多,波长间隔减小。

2.3 d/a 一定时 a 与 $\Delta\lambda$ 的关系曲线

因为熔融拉锥后两光纤已经熔合在一起, d 与 a 必然同时减小,且可以认为保持一定比例,并作 $d=2a$ 处理^[7]。

当 L 与 d/a 一定时,光纤半径对可达到的最小信道间隔 $\Delta\lambda$ 的影响,如图 4 所示,取 $d=2a$, $L=10$ cm。

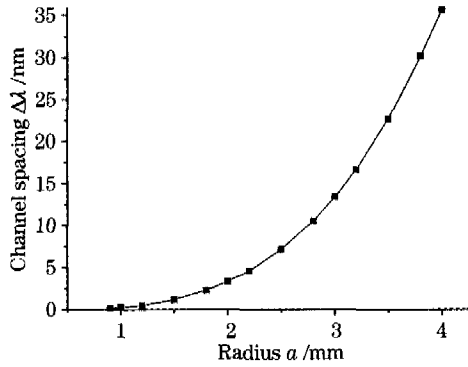


图 4 当光纤间距与光纤半径成比例时光纤半径对最小信道间隔的影响

Fig. 4 Influence of the optical fiber radius on minimum channel spacing when the separation between two optical fibers is proportional to the optical fiber radius

当光纤半径减小时,瞬逝场携带的能量增强,但相对距离却保持不变,所以耦合增强,耦合系数增大,转换长度 L_0 变短,可复用波长数增多,波长间隔减小。

2.4 L 与 $\Delta\lambda$ 的关系曲线

当 a 与 d 一定时,耦合长度对可达到的最小信道间隔 $\Delta\lambda$ 的影响,如图 5 所示,取 $a=1 \mu\text{m}$, $d=2a$ 。

当耦合长度变长时,转换长度虽然一定,但等同耦合周期变多,可复用波长数增多,波长间隔减小。

从以上数值模拟的结果分析可知两光纤耦合长度越长,光纤半径与间距越小(如 2.3 节中分析成比例同时减小),熔锥光纤型波分复用器可达到的最小信道间隔就越小。所以只要改进熔锥装置可以使其

耦合长度加长,光纤半径更小,其最小信道间隔是可以显著减小的。

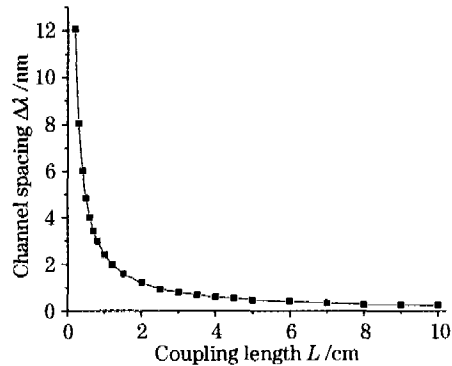


图 5 耦合长度对最小信道间隔的影响

Fig. 5 Influence of the coupling length on the minimum channel spacing

3 实验装置及制作工艺

所使用的熔融拉锥装置改善了传统拉锥方式的缺陷,使用有较长均匀加热区域的条形加热装置,这样光纤可以拉伸的长度明显加长,而且拉锥区域光纤锥度更小。本文实验使用的熔融拉锥装置如图 6 所示。

其中加热装置如图 7 所示。由新型 Al_2O_3 纤维隔热材料制成的两块隔热砖形成一个腔体,高温热源由 MoSi_2 材料制成的电加热丝提供,加热丝长 15 cm,置于下盖的槽中,通过调节其所连电极两端电压来调节加热温度,光纤则从加热丝上方通过,拉锥速度通过可编程控制的步进电机驱动器改变转台转速来调节。实验中将两根常规单模光纤剥掉一定长度的涂覆层后扭绞在一起,一端连接在静止转台上,另一端通过加热装置后连接在转动转台上,加热装置开始加热后,待光纤软化通过计算机程序控制步进电机驱动器使转台转动即可进行拉锥。

因为 SiO_2 的软化温度约 1660°C ,所以要使两根光纤充分熔合在一起,熔锥区拉伸长度足够长,熔锥区光纤直径足够小,那么热源产生的温度越接近软化温度各项指标越好。而电加热丝要产生恒定高

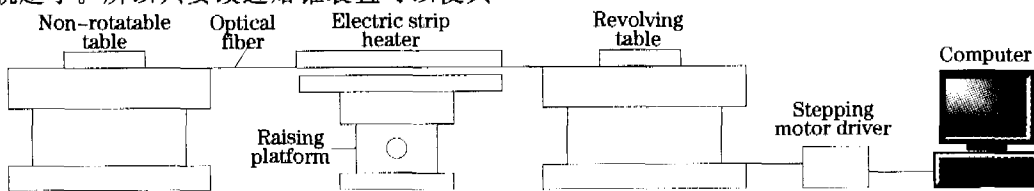


图 6 新型制备熔融拉锥光纤型波分复用器的实验装置

Fig. 6 A novel experiment setup for fabricating fused biconical taper fiber wavelength division multiplexer

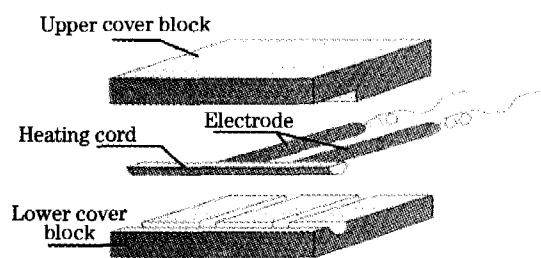


图 7 加热装置的构造

Fig. 7 Configuration of the heating unit

温,必须采用能提供小电压大电流的变压器作为电源,实验所采用的电热丝额定功率为 400 W(额定电压 5 V,额定电流 80 A),可提供 1700 °C 的高温,实际测得腔内工作温度约 1650 °C。如果电热丝工作电压过低,热源温度远低于软化温度,那么熔锥区光纤不能充分熔合,而且熔锥区直径过大,会导致复用信道间隔太大甚至光信号难以形成耦合。实验中光纤距离电热丝约 0.5 cm,拉锥速度为 0.18 mm/s。拉锥速度要与光纤熔融速度尽可能匹配,拉锥速度过快

易将光纤拉断,速度过慢光纤易坠落在电热丝上。

4 初步实验结果和讨论

实验中拉伸长度达到 12 cm 时停止拉锥,然后进行测试。测试装置如图 8 所示,由放大自发辐射(ASE)光源提供通信波段多波长光源(1528 ~ 1560 nm),选择其中一端作为光信号输入端,将两输出端分别接入光谱仪,即可得到输出端光功率按波长的分布。初步实验结果如图 9 所示,纵轴均为归一化光功率。

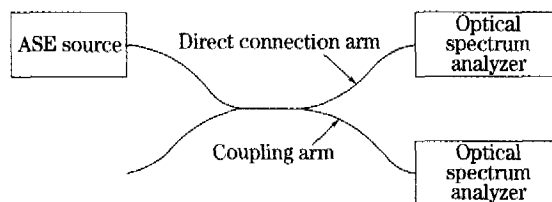


图 8 测试装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of experiment for testing

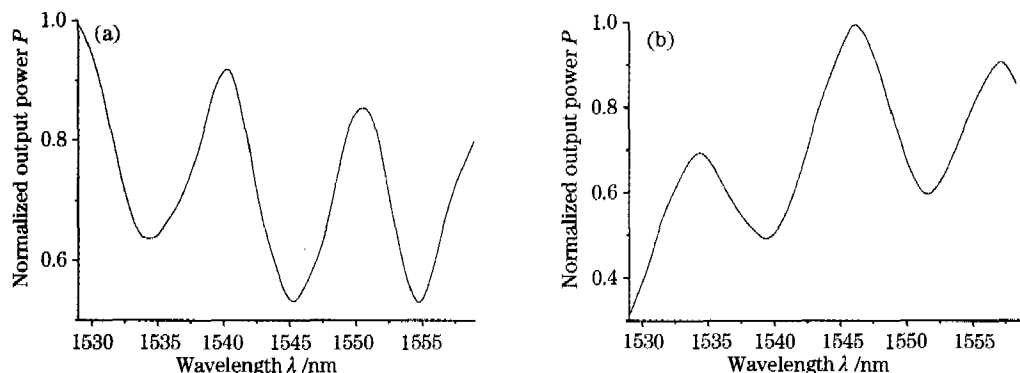


图 9 直通臂(a)和耦合臂(b)输出光功率随波长的变化

Fig. 9 Output optical power in direct connection arm (a) and coupling arm (b) versus wavelength

由图 9 得到最小信道间隔约 3.01 nm,对应波长为 1551.67 nm 和 1554.68 nm,与宽波分复用系统的信道间隔相比至少小一个数量级,同时接近密集波分复用系统信道间隔的量级。说明改进拉锥装置使拉伸长度加长后最小信道间隔显著减小,与理论模拟的结论相符。但同时看到两臂中的光信号没有充分耦合,功率损耗较大,信道间隔不严格均匀。未能充分耦合可能是由于两根光纤拉锥后不满足完全相同的条件,导致相应光场的传播常量相差较大造成的。损耗较大可能由于拉锥区域的部分光纤加热时间不够(较早从加热装置中被拉出)导致光纤性质改变吸收损耗增大、拉锥过程中调节拉锥速度与热源温度致使拉锥区域光纤直径不均匀性较大从而导致散射损耗增大等原因造成的。而信道间隔不严格均匀可能同

样是由于拉锥区域光纤直径的不均匀性造成的。本文所报道的工作只是原理性阐述,许多技术指数还没有达到实用指标,目前正在改进拉锥装置与工艺,以使其更具有实用价值。

5 结 论

通过数值模拟得到熔锥光纤型波分复用器制备过程中相关参量光纤半径 a (熔锥区光纤)、光纤间距 d (熔锥区光纤)、耦合长度 L (可认为等于拉伸长度)分别对其可达到的最小复用信道间隔的影响,分析可知拉伸长度越长,光纤半径越小(与光纤间距成比例同时减小),可达到的最小信道间隔越小。根据此结论设计出新型的熔融拉锥装置制备熔锥型光纤波分复用器,实验中拉伸长度为 12 cm,比传统拉锥方法可

得到的拉伸长度明显加长,而且最小信道间隔达到 3.01 nm 接近密集波分复用的量级。

参 考 文 献

- 1 Hu Xianzhi, Zhang Shihai, Lu Yuxi *et al.*. *Engineering Applications of Optical Fiber Communications Systems* [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003. 25~27 (in Chinese)
胡先志,张世海,陆玉喜等. 光纤通信系统工程应用[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2003. 25~27
- 2 Miao Xin. *Optical Fiber Communications Technology* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002. 107~112 (in Chinese)
苗 新. 光纤通信技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002. 107~112
- 3 Huang Zhangyong. *Novel Optical Passive Devices in Fiber-Optic Communication* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2003. 155~172 (in Chinese)
黄章勇. 光纤通信用新型光无源器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2003. 155~172
- 4 Bu Qinlian, Luo Yong, Fu Yong'an *et al.*. Study on improving the performance of thin film filter based DWDM components [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(5): 651~654 (in Chinese)
卜勤练,罗 勇,付永安等. 一种有效提高薄膜滤光片型密集波分复用器器件性能的方法及其实验研究[J]. 光学学报, 2004, 24(5): 651~654
- 5 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg gratings technology fundamentals and overview [J]. *J. Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263~1276
- 6 Liu Qing, Ma Weidong, Wang Wenmin *et al.*. The Research of coarse wavelength division multiplexer based on array waveguide grating with broadened pass-band and low crosstalk [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(9): 1265~1268 (in Chinese)
刘 青,马卫东,王文敏等. 一种通带平坦的粗波分复用/解复用器件的研制[J]. 光学学报, 2004, 24(9): 1265~1268
- 7 Liao Yanbiao. *Fiber Optics* [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 112~116 (in Chinese)
廖延彪. 光纤光学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000. 112~116

首届中国国际应用激光、光电技术贸易博览会 暨研讨会在上海举行

首届中国国际应用激光、光电技术贸易博览会暨研讨会于 2006 年 3 月 21~23 日在上海新国际博览中心拉开帷幕。这场由德国“制造”,德国 LASER. World of Photonics 在中国衍生的世界著名光电技术贸易博览盛会首次引入上海。全场汇



聚来自中、德、美、加、瑞以及中国台湾等 18 个国家和地区的 163 家展商参展,其中,国际展商占 65%。展区分为激光元件和激光设备两大主题区域,涵盖了激光、光电子的整个产业链。展会期间还举办了国际应用激光技术中国研讨会等多场高质量的激光技术交流会议,触及激光产业最前沿。光学期刊联合编辑部承办的《光学学报》、《中国激光》、《激光与光电子学进展》和 *Chinese Optics Letters* 作为专业媒体,积极参与了这一盛会。

联合编辑部的年轻编辑们现场向观众和参展商们赠阅了近期期刊并对参展的部分专家学者进行了用户调查。大约有 1000 多名专家和企业界人士参观了本编辑部的展台,其中包括周立伟院士、刘颂豪院士、中国光学学会激光加工委员会主任邓树森等。