

文章编号 1004-924X(2009)07-1535-07

锥形塑料光纤过渡器的制作及测试

曾永西¹, 庄其仁²

(1. 泉州师范学院 理工学院, 福建 泉州 362000;

2. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要:研究了可作为塑料光纤与石英光纤连接器件的锥形塑料光纤过渡器的制作方法及性能测试。采用重力垂直熔融拉锥法制作锥形塑料光纤过渡器,并研究其在实验室条件下的最佳工艺参数。重复实验发现,当加热电压为6.0 V,加热区中心温度在214 ℃附近,拉伸力为1.40 g左右时,塑料光纤的拉伸过程容易控制,拉伸后的塑料光纤表面具有良好的光学质量。测试显示锥形塑料光纤的透射率随着锥度的增大而减小,表面显微形貌良好,出射模式数明显减少,出射模场强度集中在低阶模部分,可见光透射谱在400~500 nm的损耗加大。对测试结果的分析表明,采用重力垂直熔融拉锥法可以制备性能优良的锥形塑料光纤过渡器,实验得到的最佳工艺参数可为POF连接器、耦合器的实际生产提供参考。

关键词:锥形过渡器;塑料光纤;熔融拉锥;显微形貌

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A

Fabrication and performance analysis of tapered POF connector

ZENG Yong-xi¹, ZHUANG Qi-ren²

(1. School of Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;

2. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Plastic Optical Fiber (POF) tapered connectors can be used as the connection devices of POFs and quartz optical fibers, so this paper introduces the fabrication and performance of tapered POF connectors. A gravity vertical fused elongated taper method is used to fabricate the tapered POF connectors, and the optimal technical parameters are also obtained under the laboratory conditions. It is found that the process of POF stretching is easy to be controlled and the tapered POF connectors show its good optical quality when the control voltage is 6.0 V, the heating zone center temperature is about 214 ℃ and the stretch strength is about 1.40 g. Experiments prove that the transmission rate of the POF with a fine surface morphology decreases with increasing taper angles, its out light modes decreases, the out light mode intensity is on the low rank modes, and the losses from the visible light transmission spectrum increases in the ranges of 400 to 500 nm. These results show that the gravity vertical fused elongated taper is a effective way to fabricate the tapered POF connectors, and the obtained technical parameters from the experiments can provide the references for the actual productions

收稿日期:2008-11-28; **修订日期:**2009-01-09.

基金项目:泉州师范学院校自选课题(No. 2008KJ19);福建省自然科学基金资助项目(No. A0710012);福建省科技计划重点项目(No. 2007H0026)

of POF connectors or POF couplers.

Key words: tapered connector; Plastic Optical Fiber(POF); fused elongated taper; micro-morphology

1 引言

塑料光纤(POF)与石英光纤相比具有芯径粗、连接容易、柔软性好、可挠性好(可承受6%~13%的可恢复应变)等优点,作为短距离通信用传输媒质具备巨大的优势,是光接入网的重要媒质之一^[1-5]。利用POF构成桌面系统或以太网时,各类POF器件是十分关键的器件之一,比如连接器、耦合器、收发器、波分复用器等。由于石英光纤和塑料光纤的材料及尺寸不同,连接这两种波导时可采用锥形光纤过渡器^[6-8]。

熔融拉锥法是制备光纤耦合器的主要方法,采用此方法制备塑料光纤耦合器存在纤芯模与包层模的转换效率比较低的问题^[9-11]。虽然增加扭转长度可以增加模式转换效率,但同时又增加了损耗,改进的方法是先把每根光纤需要扭转的部位预先加热拉锥,然后把光纤束在拉锥的部位扭转,再给扭转部位加热再拉锥。增加了这道预拉锥工序后,耦合器中纤芯模与包层模的转换效率可得到明显提高^[12]。塑料光纤耦合器的熔融拉锥制备中的预拉锥工序可以应用于锥形塑料光纤过渡器的制作。

本文采用重力垂直熔融拉锥法制作锥形塑料光纤过渡器,通过测试锥形塑料光纤的透过率、透射谱和模场分布,观察表面显微形貌,研究在实验室条件下影响制作锥形塑料光纤过渡器质量的因素,并进行分析以获得最佳工艺参数和有意义的测试数据,为实际生产塑料光纤过渡器提供参考。

2 锥形 POF 过渡器的制作

2.1 实验材料及装置

实验所用塑料光纤纤芯材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), $n=1.491$, $\Phi=0.25$ mm,包层为氟树脂, $n=1.380$,厚度为5 μm ,白光透射率 $\geq 95\%$ /m(570 nm),损耗 ≤ 200 dB/km(570 nm),数值孔径为0.5。采用电阻加热器进行加热、重力垂直拉伸的方法对POF进行拉锥,得到锥形POF过渡器。实验装置如图1所示。

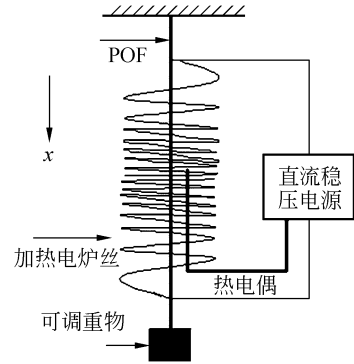


图 1 制作锥形塑料光纤实验图

Fig. 1 Manufacture of tapered POF connector

电阻加热器用功率为3 000 W的电炉丝绕成中间密度大,两端密度小,内径为5 mm,长度为15 cm的螺线管,电炉丝内的温度由直流稳压电源进行控制调节。电炉丝用耐高温绝缘套管束缚,内嵌于封闭的管道中,减少了气流影响,所以加热器内部温度场较为稳定,且温度场有一定的梯度分布。

电炉丝之所以要绕成中间密度比两端密度大的分布,是为了让内部的温度场有一定的梯度分布。当塑料光纤在接近熔融状态时会由于重力拉伸下坠,若温度梯度太大,将使塑料光纤产生脆化浑浊现象,导致不能透光。

2.2 加热器温度系数的测定

加热区的温度由直流稳压电源进行控制和调节,由于加热器具有固定的散热面积并处于较稳定的环境温度(实验室条件)下,在塑料光纤软化温度附近的较小温度范围内可认为加热区中心温度 t 与加热功率 P 成正比,即:

$$t = \alpha P, \quad (1)$$

其中, α 为 t 与 P 的比例因子,加热功率 P 与电压 U 的关系为:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (2)$$

式(1)和式(2)联立可得:

$$t = \alpha P = \alpha \frac{U^2}{R} = \beta U^2, \quad (3)$$

其中 β 为加热器的温度系数,用来衡量 t 与 U^2 的关系。由式(3)可以看出,对 t 和 U 的关系进行定

点标定,可测出 β 值。当 β 值已知,通过测量 U ,可以得到加热区中心温度 t 。在环境温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下,当直流稳压电源电压为 6.0 V 时,测得加热区中心温度 t 为 $214.0\text{ }^\circ\text{C}$,可求得 $\beta=5.944\text{ }^\circ\text{C}/\text{V}^2$ 。

2.3 加热器温度场分布

采用K系热电偶(测量范围 $0\sim 700\text{ }^\circ\text{C}$,精度 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$)对加热区的温度分布进行测量。热电偶沿着竖直方向每隔 2 mm 测量一次温度,得到加热区的温度分布如图2,可见加热区的温度分布在竖直方向近似中心对称。

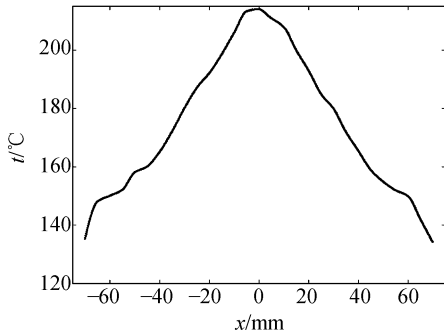


图2 加热区温度场分布

Fig. 2 Temperature distribution of heating zone

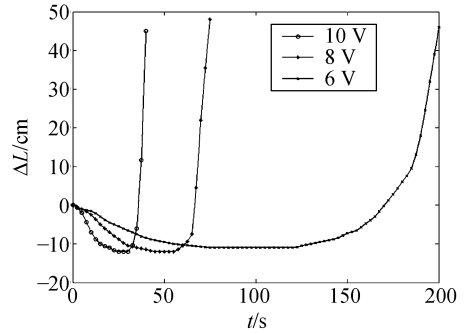
由图2可知,加热区中心位置($x=0\text{ mm}$)的温度最高,并随着位置远离中心位置, $|x|$ 增大,加热区的温度逐渐降低,在离中心位置 $|x|=70.0\text{ mm}$ 时,加热区的温度只有 $135.0\text{ }^\circ\text{C}$,已低于PMMA光纤的软化温度。

2.4 最佳工艺参数选择

用低压电阻加热器对POF进行加热,当温度达到软化温度时,如果拉伸力不够,由于表面张力的作用,光纤首先产生收缩,若温度继续升高,接近熔融温度时,表面张力迅速减小,光纤在拉伸力作用下开始伸长。

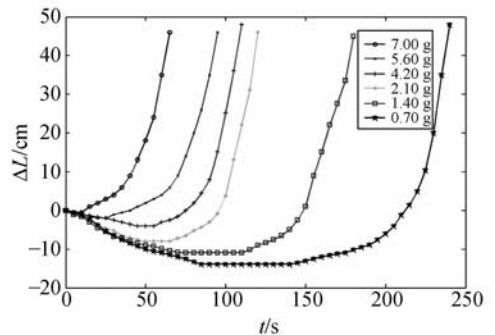
图3(a)为相同拉伸力(重物 1.4 g)条件下,不同加热电压时,塑料光纤长度随时间的变化过程曲线。可以看出加热电压为 $6, 8$ 和 10 V 时光纤收缩幅度相差不大,但对拉伸速度有较大的影响^[13]。拉伸速度太快将使锥形塑料光纤的制作难以控制。由于光纤被拉细后单位面积所受拉力变大,所以塑料光纤长度的变化呈现指数增加趋势,在加热电压为 8 V 和 10 V 时光纤长度变化几乎成竖直线上升,不可采用。加热电压为 6 V (此

时加热区中心温度 $214\text{ }^\circ\text{C}$)时,光纤长度变化均匀,容易控制。加热电压低于 6 V 时,实验发现光纤基本不被拉长,原因是中心区温度没有达到塑料光纤的软化温度。由此可见,加热电压的最佳值为 6 V ,对应加热区中心温度为 $214\text{ }^\circ\text{C}$ 。



(a) 重物 1.4 g 拉力下的光纤长度变化

(a) POF length change curves with a weight of 1.4 g



(b) 6 V 电压加热时的光纤长度变化

(b) POF length change curves with a voltage of 6 V

图3 POF长度拉伸变化曲线

Fig. 3 POF length change curves

在最佳加热电压下,改变重物(拉伸力)得到的塑料光纤长度变化实验曲线如图3(b),图中显示了如下变化规律:1)拉伸力小,光纤收缩幅度大;拉伸力大,光纤收缩幅度小;2)拉伸力小,光纤收缩过程时间长;拉伸力大,光纤收缩过程时间短;3)当收缩过程完成后,不同拉伸力具有基本相同的长度拉伸速度(图中的曲线斜率);4)当拉伸力为 7.00 g 时,收缩力与拉伸力达到平衡,光纤几乎没有收缩过程,直接下坠拉长。根据以上规律,拉伸力(重物)应选择较大值为好,但测试拉锥后的POF发现,当重物质量 $\geq 2.10\text{ g}$ (初始拉伸力 $\geq 42.8\text{ g}/\text{mm}^2$)时,光纤的透光性开始变差,光纤表面有不均匀颗粒出现^[13],这是因为光纤没有

达到完全均匀熔融状态就被拉伸,产生内部不均匀现象,引起较大的散射损耗。因此,拉伸重物的质量参数最佳值为 $1.40 \sim 2.10 \text{ g}$ 。

多次重复实验发现:当加热电压为 6.0 V ,加热区中心温度维持在 $214 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近,温度介于 PM-MA 软化温度和熔融温度之间,采用拉伸力 1.40 g 时,POF 拉伸速度适中,比较容易控制,拉伸后的光纤光学质量好。

3 锥形 POF 的测试分析

拉锥后的 POF 可分成两部分,长为 W 的耦合区域和两个长为 L 的锥形区域^[14],如图 4 所示。

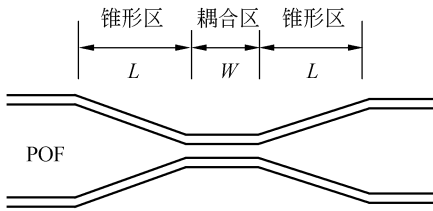


图 4 POF 拉锥后示意图

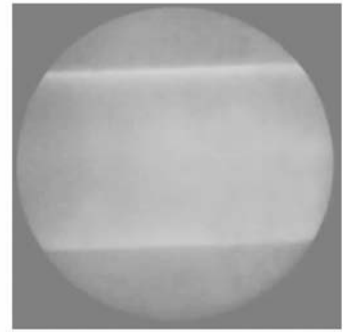
Fig. 4 Tapered POF graphics

在耦合区域,复合波导由两平行熔锥光纤相互重叠组成,其横截面尺寸只有微小的锥度。在锥形区域,纤芯沿纵向呈梯度缓慢变化,锥度在 $0.1 \sim 0.3^\circ$ 内。耦合区中心直径越小,锥度越大,光纤的透射率越低^[13]。透射率变化主要是由于多模 POF 的模式耦合产生模式泄漏引起的。锥度越大,模式泄漏越严重,其值可影响光纤耦合器的耦合比。

在控制电压为 6.0 V ,加热器中心温度为 $214 \text{ }^\circ\text{C}$,拉伸重力为 1.40 g 的条件下制作的锥形 POF 的耦合区显微形貌如图 5。

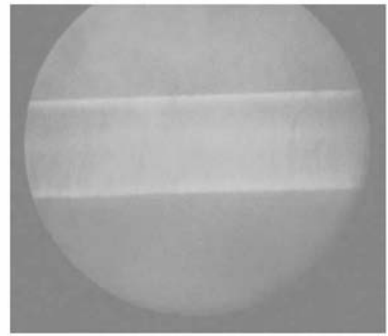
从图 5 中可以发现,拉锥后的光纤表面光滑,且拉锥后耦合区中心直径较大的光纤表面形貌比耦合区中心直径较小的光纤表面形貌光滑。

用 CCD 观察锥形 POF 出射模场如图 6,入射光源为 650 nm 的半导体激光器,CCD 距离光纤出射端面 2 mm 。图 6(a)是 POF 拉锥前的模场照片和强度分布曲线,图 6(b)是耦合区中心直径为 0.060 mm 时的模场照片和强度分布曲线,图 6(c)是耦合区中心直径为 0.044 mm 时的模场



(a)耦合区中心直径为 0.088 mm 时的显微形貌

(a) Mic-morphology when coupling center diameter is 0.088 mm



(b)耦合区中心直径为 0.044 mm 时的显微形貌

(b) Mic-morphology when coupling center diameter is 0.044 mm

图 5 不同耦合区中心直径下的显微形貌

Fig. 5 Micro-morphologies with different coupling center diameters

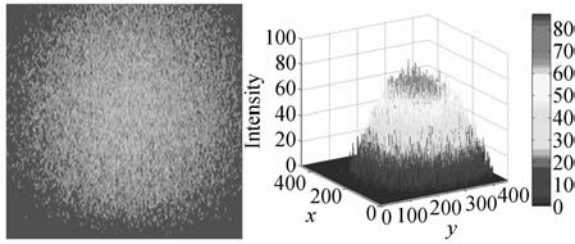
照片和强度分布曲线。其中强度分布图为采用 Matlab 工具对光斑图进行数值分析得到的。

从图 6 可以看出拉锥后 POF 的出射模式数(横模)明显减少,并且出射模场强度集中到低阶模(光斑中心)。

为比较 POF 拉锥前后对不同波长光的透射情况,测试了 POF 拉锥前后的透射光谱,如图 7。

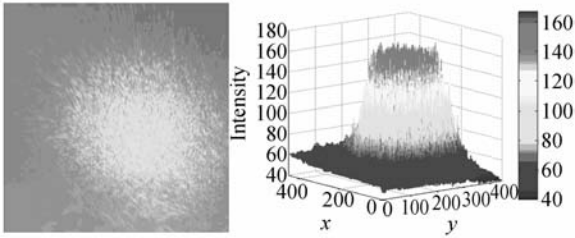
图 7(a)是 POF 拉锥前的透射谱;图 7(b)是 POF 拉锥后(耦合区中心直径为 0.044 mm)的透射谱。可见锥形 POF 的透射谱较拉锥前有明显的变化,透射率降低了,透射率降低最明显的波段在可见光波长 $400 \sim 500 \text{ nm}$,在 450 nm 波长损耗增加 33% 。

透射率降低是由于在锥形光纤中出射的模式数已大大减少,可以从几何光学的角度来理解,图



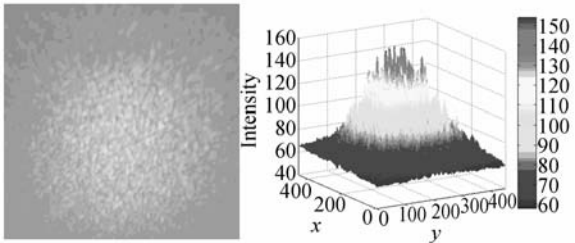
(a) 拉锥前的模场照片和强度分布

(a) Mode field photo and intensity distribution curve before tapering



(b) 耦合区中心直径为 0.060 mm 的模场照片和强度分布

(b) Mode field photo and intensity distribution curve when coupling center diameter is 0.060 mm



(c) 耦合区中心直径为 0.044 mm 的模场照片和强度分布

(c) Mode field photo and intensity distribution curve when coupling center diameter is 0.044 mm

图 6 塑料光纤的模场照片和强度分布曲线

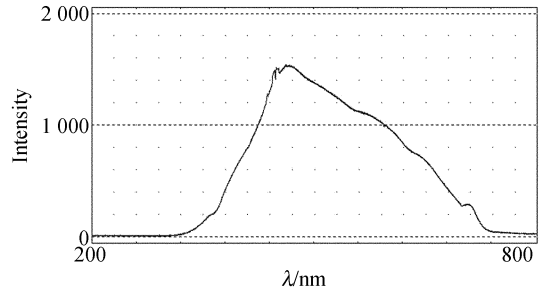
Fig. 6 Mode field photos and intensity distribution curves of POF

8 为子午光线通过锥形光纤的光路图。

由图 8 中几何关系以及折射定律可得:

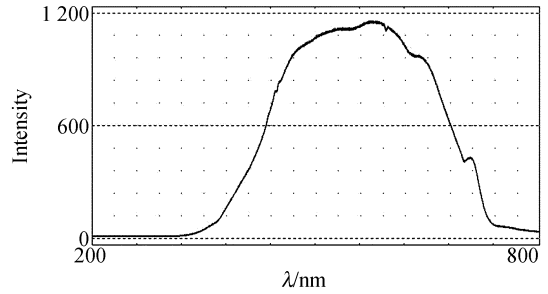
$$\varphi_n = 90^\circ - \arcsin\left(\frac{n_0}{n_1} \sin \varphi\right) - (2n-1) \frac{\delta}{2}, \quad (4)$$

式中, δ 为锥形光纤的锥度, φ 为光线入射到光纤端面的入射角, n_0 和 n_1 为空气和纤芯的折射率, n 为反射次数, φ_n 为入射光线在内表面第 n 次反



(a) 拉锥前的透射谱

(a) Transmission spectrum before tapering



(b) 拉锥后的透射谱

(b) Transmission spectrum after tapering

图 7 拉锥前后透射谱的比较(耦合区中心直径为 0.044 mm)

Fig. 7 Transmission spectra before and after tapering, when coupling center diameter is 0.044 mm

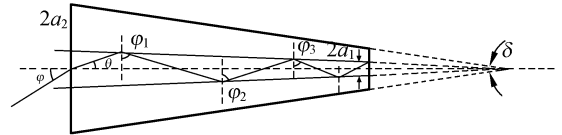


图 8 锥形光纤中的子午光线

Fig. 8 Meridian light of tapered fiber

射的反射角。由式(4)可知,当光线从锥形光纤的大端入射时,由于反射角 φ_n 将随反射次 n 数的增加而不断减小,因而全反射条件容易被破坏,出现全反射条件不满足的情况,所以拉锥后的 POF 透射率减小了。

损耗增加主要在短波段的原因可以从光纤归一化频率 V 的表达式得到解释^[15]

$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \quad (5)$$

式中, a 为光纤的半径, n_1 、 n_2 分别为纤芯和包层

的折射率,式(5)中的 V 可用于表示光纤中传导的模式数。拉锥后的 POF 纤芯变细了, a 减小, 所以 V 减小, 光纤中传导的模式数也减少了。从式(5)还可看出, V 与波长 λ 成反比, 短波段 V 值大, 在光纤中的传输模式多。当塑料光纤拉锥后, 由于短波段的高阶模变为辐射模, 所以损耗大, 于是从透射谱中发现可见光中波长 400~500 nm 内的光损耗加大了。

4 结 论

研究了不同加热电压、不同拉伸力工艺条件

对锥形塑料光纤过渡器制作过程的影响。实验确定了最佳工艺参数, 当加热电压为 6.0 V(对应加热区中心温度 214 °C), 拉伸力为 1.40 g 左右时, POF 拉伸过程容易控制, 且光学质量好。测试结果表明, 锥形 POF 表面显微形貌良好, 出射模式数明显减少, 出射模场强度集中到低阶模, 可见光透射谱在 400~500 nm 区间的损耗加大。实验研究锥形 POF 过渡器的制作工艺参数及测试分析, 可为 POF 连接器、耦合器的实际生产提供参考。

参考文献:

- [1] 曾永西, 庄其仁, 张淑贤. 新一代塑料光纤接入网[J]. 光通信技术, 2005, 29(7): 59-61.
ZENG Y X, ZHUANG Q R, ZHANG SH X, *et al.*. A new generation of POFs optical access network [J]. *Optical Communication Technology*, 2005, 29(7): 59-61. (in Chinese)
- [2] MING H X, XING SH, WANG P, *et al.*. Polymer optical fiber and its application [C]. *Ninth National Opto-electronics Technology and System Conference, Invited Report*, 2001, 12(2): 55-64.
- [3] KOIKE Y. Giga-island concept realized with high-speed GI plastic optical fiber [C]. *Second Asia-Pacific Polymer Fibre Optics Workshop*, 2003: 4-7.
- [4] 刘荣华, 张宁. 用于塑料光纤接入网的三优先级控制协议设计[J]. 光子学报, 2008, 37(7): 1356-1360.
LIU R H, ZHANG N. Design of three priority control protocol applied to plastic optic fiber access network[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(7): 1356-1360. (in Chinese)
- [5] 桂玉屏, 徐震, 胡先志. 塑料光纤连接的家庭光纤通信系统[J]. 光通信研究, 2006(4): 44-46.
GUI Y P, XU ZH, HU X ZH. Plastic-fiber-connected intelligent home fiber-optic communication systems[J]. *Study on Optical Communications*, 2006 (4): 44-46. (in Chinese)
- [6] 王云明, 孙小蕊, 张明德, 等. 塑料光纤锥形过渡器光波传输特性的研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2002, 32(3): 351-353.
WANG Y M, SUN X H, ZHANG M D, *et al.*. Study on performance of light wave propagation in tapered polymer optical fiber connector[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2002, 32(3): 351-353. (in Chinese)
- [7] 薛春荣, 祝生祥, 肖志刚. 锥形光纤间的耦合特性[J]. 光子学报, 2004, 33(7): 803-805.
XUE CH R, ZHU SH X, XIAO ZH G. Coupling properties between two tapered fiber[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(7): 803-805. (in Chinese)
- [8] 连重炎, 杜旭日, 庄其仁, 等. 锥形塑料光纤光束准直特性的研究[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2008(2): 33-36.
LIAN CH Y, DU X R, ZHUANG Q R, *et al.*. Study on the characterization of beam collimation in tapered plastic optical fiber[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2008(2): 33-36. (in Chinese)
- [9] 许强, 黄肇明, 黄勇. 2×6 熔融拉锥型单模光纤耦合器的特性分析[J]. 光学学报, 2005, 25(6): 751-754.
XU Q, HUANG ZH M, HUANG Y. Analysis of coupling power for fused-biconical 2×6 single-mode optical fiber coupler[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(6): 751-754. (in Chinese)
- [10] 林小莉, 李平, 王强, 等. 熔锥型光纤耦合器的扭转响应[J]. 光子学报, 2004, 33(5): 540-543.
LIN X L, LI P, WANG Q, *et al.*. Twist response of fused-tapered fiber coupler[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(5): 540-543. (in Chinese)
- [11] 刘丽飒, 张磊, 蔡志平. CO₂ 激光熔拉锥过程光功率控制研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 368-373.
LIU L S, ZHANG L, CAI ZH P. CO₂ laser fabrication of biconical-tapered fiber and its laser power controlling[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14 (3): 368-373. (in Chinese)

- [12] 陈新桥,林如俭,代康. 塑料光纤耦合器制备方法探讨[J]. 光纤与电缆及其应用技术,2005(2):5-9.
CHEN X Q, LIN R J, DAI K. Fabrication of POF couplers[J]. *Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications*, 2005(2):5-9. (in Chinese)
- [13] 曾永西,庄其仁,张淑贤,等. 聚合物光纤热预拉锥工艺实验研究[J]. 激光与红外,2006,36(8):691-693.
ZENG Y X, ZHUANG Q R, ZHANG SH X, et al.. Technical experiment of POF thermal pre-elongated taper[J]. *Laser & Infrared*, 2006, 36(8): 691-693. (in Chinese)
- [14] 帅词俊,段吉安,钟振. 熔锥型光纤耦合器流变成形的工艺敏感性研究[J]. 光学精密工程,2005,13(1):40-46.
SHUAI C J, DUAN J A, ZHONG J. Technical sensitiveness in the rheological manufacture progress of fused taper coupler[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 40-46. (in Chinese)
- [15] 孙圣和,王廷云,徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:3-4.
SUN SH H, WANG Y Y, XU Y. *Optical Measurement and Sensing Technology* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2002: 3-4. (in Chinese)

作者简介:



曾永西(1980—),男,福建人,讲师,2006年于华侨大学获得硕士学位,主要从事EDA技术、天线与电波的教学和光纤通信和光纤传感技术的研究。
E-mail: cImzyx@163.com



庄其仁(1960—),男,福建人,研究员,1983年于中国科技大学获学士学位,主要研究方向为光电检测技术和光纤传感技术。E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn

●下期预告

光栅光调制器阵列交叉效应的理论分析与实验

金 珠,温志渝,张智海,王 宁,韦 玮,张 洁,黄尚廉

- (1. 重庆大学 新型纳米器件与系统技术国家重点学科实验室,重庆 400044;
2. 重庆大学 光电技术及系统教育部重点实验室,重庆 400044)

为了讨论交叉效应对无源矩阵驱动的光栅光调制器的影响,建立了无源矩阵驱动光栅光调制器的电学模型。首先,介绍了光栅光调制器的工作原理和驱动电压。接着,利用基尔霍夫的电流定理和电压定理,对该无源矩阵驱动阵列的电学模型进行化简分析,得到交叉效应中半选点像素、非选点像素与全选点像素之间的电压关系。然后,设计实验测得器件的驱动电压,并对加工的阵列器件进行交叉效应验证,得到这3种像素的±1级衍射光强与全选点像素驱动电压的关系。最后,提出两种抑制交叉效应的方法。实验结果表明:光栅光调制器的工作电压为8V,吸合电压约8.5V;对于加工的16×16阵列,半选点像素电压约为全选点像素电压的1/2,且远大于非选点像素电压,与交叉效应理论分析相一致。结果表明:交叉效应会降低阵列的光学对比度和光利用率,而器件较低的驱动电压有利于与有源矩阵电路实现单片集成,消除器件的交叉效应。