

文章编号: 0253-2239(2006)08-1182-5

锥形透镜光纤聚焦特性研究*

刘 旭 陈 麟 蔡 纯 肖金标 张明德 孙小菡

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

摘要: 锥形透镜光纤(TLF)是实现光纤与平面光波光路(PLC)芯片高效耦合的核心元件。了解和掌握其聚焦特性是指导平面光波光路尾纤封装技术的关键。给出了表征锥形透镜光纤聚焦特性的两个参量-出射光斑直径和远场发散角的理论分析模型,其误差小于1.14%;采用光束传播法数值模拟了锥形透镜光纤中的光波传输和模场的演化,确定了锥形透镜光纤端面出射光斑的大小;优化锥形透镜光纤结构参量为:拉锥长度300 μm , 锥角 0.733° , 透镜曲率半径13.485 μm ;建立了基于数字摄像机的锥形透镜光纤出射光场测试系统,提出了物理光学反向推演法,计算出锥形透镜光纤聚焦光斑尺寸和远场发散角。理论与实验结果有着良好的一致;对于相同结构参量的锥形透镜光纤,实验反推法得到的出射光斑尺寸与理论值相比误差为3.15%,远场发散角误差为3.67%。

关键词: 集成光学; 平面光波光路; 耦合封装; 锥形透镜光纤; 聚焦; 反向推演法

中图分类号: TN256 文献标识码: A

Investigation on Focusing Performance of Tapered and Lensed Fiber

Liu Xu Chen Lin Cai Chun Xiao Jinbiao Zhang Mingde Sun Xiaohan

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096)

Abstract: Tapered and lensed fiber(TLF) is the key device to couple optical energy from optical fiber into planar lightwave circuits(PLC) high-efficiently. To understand and grasp TLF's focusing performance is pivotal for PLC pigtail packaging technology. The theoretical analysis model of output beam spot diameter and far-field divergence angle, which are principal parameters to represent TLF's focusing characteristics, is put forward. The error of the model falls within 1.14%. Lightwave propagation and mode field evolution are simulated by finite-difference beam propagation method so that the spot diameter is ascertained. TLF's taper length, half core taper angle, and lens curvature radius are optimized to be 300 μm , 0.733° , 13.485 μm respectively. The focusing beam spot is observed by digital video camera experimental setup and calculated using an inverse deducing method from physical optics. The theoretical and measurement results are consistent. For a specific TLF sample, the spot diameter value by inverse deducing method is differed from the theoretical one with error of 3.15%, and the error for far-field divergence angle is 3.67%.

Key words: integrated optics; planar lightwave circuits; coupling and packaging; tapered and lensed fiber; focusing; inverse deducing method

1 引 言

平面光波光路(PLC)及其集成芯片从实验室走向实用化的关键在于耦合封装技术^[1,2]。耦合、封装、测试占整个平面光波光路芯片开发计划费用的

90%。平面光波光路芯片与单模光纤(SMF)的对接耦合可分为直接耦合和间接耦合两种。

目前平面光波光路的芯片测试一般采用微调架调整光纤和芯片直接耦合对准^[3],利用片上光纤定位

* 国家“十五”计划 863 子项目(2002AA31230)和江苏省高技术项目(7706008020)资助课题。

作者简介: 刘 旭(1972~),男,河南郑州人,东南大学电子科学与工程学院讲师,在职博士研究生,主要从事光子学和光通信技术的研究。E-mail: liuare@seu.edu.cn

导师简介: 孙小菡(1955~),女,安徽黄山人,东南大学电子科学与工程学院教授,博士生导师,主要从事光子学和光通信技术的研究。E-mail: xhsun@seu.edu.cn

收稿日期: 2005-08-09; 收到修改稿日期: 2005-12-21

槽^[4],可以减少调整的自由度,降低封装难度。大量的光纤定位槽使用体硅材料,硅微机械加工的精度非常高,可以达到光纤和平面光波光路芯片亚微米的对准要求^[5]。在光纤和平面光波光路芯片之间加入透镜、棱镜、光栅等分立的光元器件属于间接耦合技术,效率低、结构复杂,只有在某些特定场合使用。

在直接耦合技术中,必须尽可能使光纤与脊波导端面尺寸匹配。增加脊波导脊宽和脊高,制作出片上三维模斑转换器(3D-SSC)可大大提高芯片与标准单模光纤的耦合效率^[6]。但脊高渐变需要半导体选择性生长工艺,此类工艺技术要求高,国内尚无相关报道。二维模斑转换器(增加脊宽)采用目前的刻蚀工艺易于实现^[7],但是在脊波导高度方向上存在很大的失配。在光纤端面制作微透镜或将光纤末端研磨出圆锥面,可以改善耦合状态,但在单模光纤透镜处仍存在较大的损耗;直接采用锥形光纤,由于其尾部小孔衍射效应也会降低耦合效率。锥形透镜光纤(TLF)通过其尾部的透镜可汇聚出射光束,消除衍射效应^[4],直接实现与平面光波光路芯片的高

效耦合。

了解和掌握锥形透镜光纤聚焦特性,优化设计锥形透镜光纤及它与平面光波光路芯片的耦合结构,是实现高效耦合的关键。本文建立了锥形透镜光纤聚焦特性分析模型,优化设计出适合与平面光波光路芯片耦合的锥形透镜光纤,从理论、数值模拟和实验三个方面深入研究了锥形透镜光纤的聚焦特性,为平面光波光路芯片耦合封装技术的研究提供了依据。

2 锥形透镜光纤聚焦特性分析及优化设计

2.1 聚焦特性分析^[8~10]

对一段拉制成轴对称的锥形透镜光纤[如图 1(a)],而不是如图 1(b)那样将标准单模光纤一端磨成锥形,满足一个基本的前提:在整个锥部沿轴向任一处包层半径 ρ_{cl} 与芯层半径 ρ 之比为一常数,即 $\rho_{cl}/\rho = S$ 。

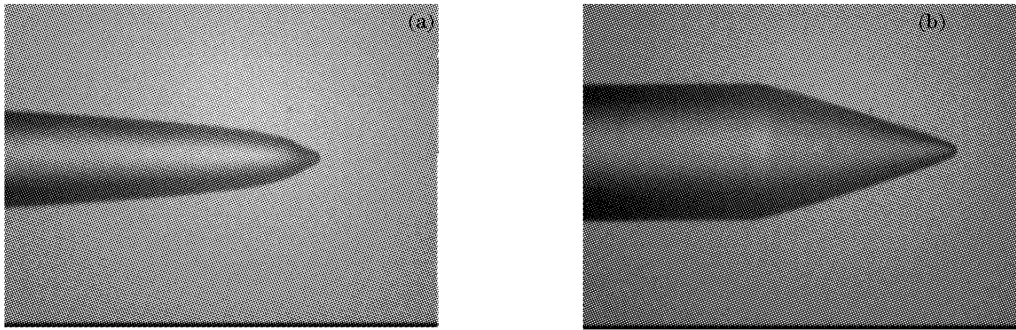


图 1 拉锥(a)和磨锥(b)锥形透镜光纤的照片

Fig. 1 Photographs of drawn (a) and polished (b) tapered and lensed fiber (TLF)

图 2 为图 1(a)所示锥形透镜光纤的简化分析模型。图中 ρ_{cl} 为包层半径, ρ 为芯层半径, z_t 为锥形区域的长度, $y\alpha$ 为芯层半锥角, 包层半锥角为 $S\alpha$ 。芯包折射率差别很小,可作弱导近似;再者,包层和空气层折射率差大,只要锥角不大,它们界面上的场近似为 0。它满足长度(或锥度)标准和弱能量耦合

标准^[8,9]。锥形光纤的锥部前端透镜化,便形成了锥形透镜光纤。这样作可以会聚光束更好地与平面光波光路芯片耦合。锥形区模场光斑半径 ω_t 和经透镜聚焦出射的模场光斑半径为 ω_L 以及光束远场发散角 $\theta(1/e^2, \text{全角})$ 由一组经验公式(归一化工作频率 V 满足条件 $0.75 \leq V \leq 1$)给出^[10]。

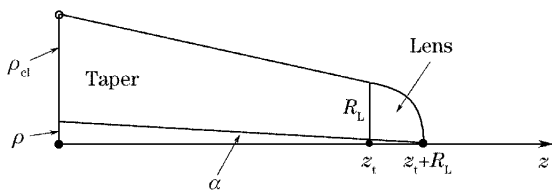


图 2 锥形透镜光纤的锥形区和透镜区上半部结构模型
Fig. 2 Taper section and lens section of the upper half of tapered and lensed fiber

2.2 光波传输分析^[11]

采用 R-Soft 公司的基于光束传播法的 BeamPROP 软件,数值模拟了光波传输和模斑的演化。锥形透镜光纤的透镜区近似为一段小锥。

取 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ 代入经验公式得 $V(z=0) = 4.67, \omega_t(z=0) = 4.3 \mu\text{m}$ 。这样初始激励条件为: $0.6328 \mu\text{m}$ 光入射,光斑直径 $8.6 \mu\text{m}$ 。图 3 是数值模拟的锥形透镜光纤 XZ 光场传输等高线图,右方

标尺显示了光强对比。从图 3 看出,在 $z = z_t + R_L = 314 \mu\text{m}$ 处出射光斑直径约 $4.5 \mu\text{m}$,对普通单模光纤的光斑实现了会聚,压缩了其模场直径(MFD)。但仔细分析发现,沿着轴向随着锥形透镜光纤的锥形区逐渐变细,光纤横截面变小,小孔衍射效应加剧,有一部分光场辐射到外部空间。

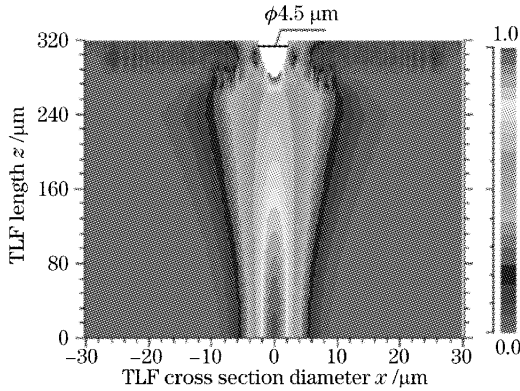


图 3 数值仿真锥形透镜光纤 XZ 光场等高线图
Fig. 3 Numeric simulation of TLF XZ-optical field contour map

2.3 优化设计

采用普通单模光纤(G. 652)制成锥形透镜光纤,其典型参量为 $n_{cl} = 1.450588, n_{co} = 1.453755$,纤芯半径 $\rho(0) = 4.92 \mu\text{m}$,包层半径 $\rho_{cl}(0) = 62.5 \mu\text{m}$,取 $n_L = 1.4506$ 。一般商用锥形透镜光纤拉锥长度在 $300 \sim 400 \mu\text{m}$ 之间。固定拉锥长度 $300 \mu\text{m}$ 时,变化锥角,得到锥形透镜光纤在成锥末端处的结构参量 ρ, ρ_{cl}, R_L 和物理参量 V, w_t, w_L ,见表 1。可以看出 $\alpha = 0.6^\circ, 0.5^\circ$ 时, $V > 1$ 且透镜曲率半径急剧增大,经验公式不再适用; $\alpha = 0.8^\circ$,

表 1 不同锥角锥形透镜光纤的计算结果($z_t = 300 \mu\text{m}$)

Table 1 Computations for TLF with variable taper angle ($z_t = 300 \mu\text{m}$)

$\alpha / ^\circ$	$\rho(z_t) / \mu\text{m}$	$\rho_{cl}(z_t) / \mu\text{m}$	$V(z_t)$	$w_t(z_t) / \mu\text{m}$	$R_L / \mu\text{m}$	$w_L(z_t + R_L) / \mu\text{m}$
0.5	2.2819	28.9807	2.1731	2.6183	28.9807	2.1178
0.6	1.7583	22.3303	1.67442	2.6549	22.3303	2.03312
0.733	1.0618	13.485	1.0112	5.2546	13.4850	2.2256
0.8	0.710938	9.02891	0.677026	38.0193	9.02891	2.00754
0.85	0.449084	5.70337	0.427663	1219.07	5.70337	1.59778

表 2 不同拉锥长度锥形透镜光纤的计算结果($\alpha = 0.733^\circ$)

Table 2 Computations for TLF with variable taper length ($\alpha = 0.733^\circ$)

$z_t / \mu\text{m}$	$\rho(z_t) / \mu\text{m}$	$\rho_{cl}(z_t) / \mu\text{m}$	$V(z_t)$	$w_t(z_t) / \mu\text{m}$	$R_L / \mu\text{m}$	$w_L(z_t + R_L) / \mu\text{m}$
250	1.70151	21.6092	1.62035	2.69043	21.6092	2.03474
280	1.31769	16.7347	1.25484	3.36601	16.7347	2.12353
300	1.0618	13.485	1.0112	5.2546	13.4850	2.2256
310	0.933872	11.8602	0.889326	8.2652	11.8602	2.21945
320	0.805932	10.2353	0.767489	17.2695	10.2353	2.12419
330	0.677993	8.61051	0.645652	52.7428	8.61051	1.96185

0.85° 时, $V < 0.75$,经验公式亦不再适用。固定 $\alpha = 0.733^\circ$,变化拉锥长度 $z_t = 250 \mu\text{m}, 280 \mu\text{m}, 300 \mu\text{m}, 310 \mu\text{m}, 320 \mu\text{m}, 330 \mu\text{m}$ 计算结果见表 2。可以看出拉锥长度在 $300 \sim 320 \mu\text{m}$ 之间,锥形透镜光纤聚焦光斑半径稳定在 $2.1 \sim 2.2 \mu\text{m}$ 之间。其它拉锥长度下, V 值不满足经验公式条件。图 4 绘出了 $\alpha = 0.733^\circ, 0.6^\circ, 0.5^\circ, z_t \leq 320 \mu\text{m}$ 的锥形透镜光纤透镜聚焦前后光斑半径随 z 的变化。

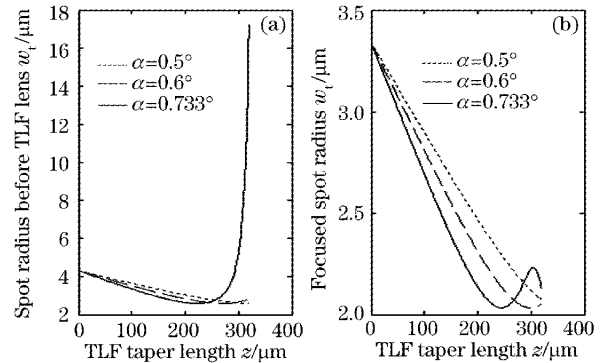


图 4 不同锥角和拉锥长度的锥形透镜光纤透镜聚焦前后的光斑变化

Fig. 4 Spot changes for tapered and lensed fiber before and after lens focusing with variable taper angle and taper length

最终优化设计锥形透镜光纤拉锥长度 $z_t = 300 \mu\text{m}$ 、锥角 $\alpha = 0.733^\circ$ 、透镜曲率半径 $R_L = 13.485 \mu\text{m}$ 。厂商提供的按优化设计参量制作的锥形透镜光纤标称出射光斑直径为 $4.4 \mu\text{m}$,理论模型计算的出射光斑直径 $4.45 \mu\text{m}$ ($2w_L$,表 1 第 4 行、第 7 列),与标准值相比误差小于 1.14% 。进一步得出远场发散角 $\theta = 10.35^\circ$ 。

3 锥形透镜光纤测试分析^[12]

3.1 实验系统及锥形透镜光纤出射光斑图像

为了了解锥形透镜光纤聚焦特性,我们建立了实验测试系统(图 5)。He-Ne 高斯光束经 40 倍

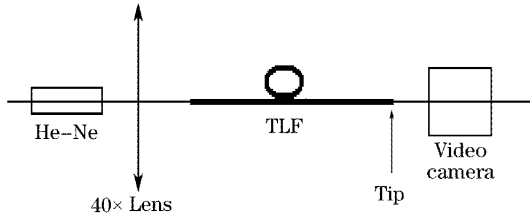


图 5 锥形透镜光纤实验系统框图

Fig. 5 Experimental setup for tapered and lensed fiber measurement

物镜入射锥形透镜光纤,数字摄像机 Video camera 接收出射光场。

图 6 为两个锥形透镜光纤样品 DT10(即拉锥 10#)和 DT12(即拉锥 12#)tip 端距 Video camera 透镜 20 mm 处拍摄到的计算机位图。实验样品结构参量为成锥长度 $z_c=300 \mu\text{m}$ 、锥角 $\alpha=0.733^\circ$ 、透镜曲率半径 $R_L=13.485 \mu\text{m}$,标称出射光斑直径为 $4.4 \mu\text{m}$ ($\lambda=0.6328 \mu\text{m}$)。从圆形光斑位图占整个矩形本底的比例关系以及互补金属氧化物半导体芯片的有效成像尺寸,可以得出经过 camera 的镜头成像在互补金属氧化物半导体芯片上的像方光斑大小,再由此反向推算物空间的锥形透镜光纤出射光斑大小。

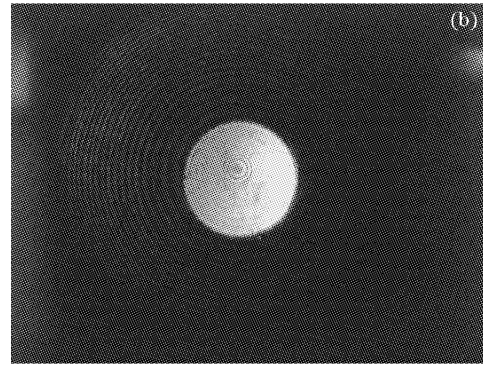
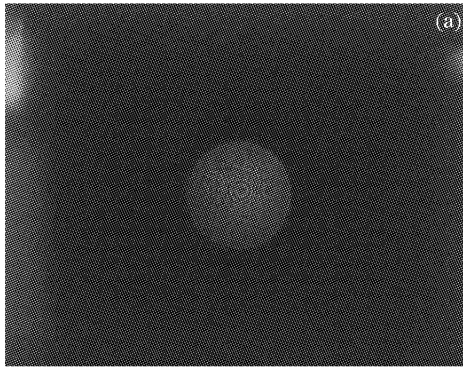


图 6 样品 DT10(a)和 DT12(b)出射光斑图像

Fig. 6 Images of sample DT10 (a) and DT12 (b) output beam spot

3.2 测试结果分析

计算锥形透镜光纤出射光斑大小和远场发散角的反推法利用物理光学中透镜对高斯光束物像转换关系[图 7 和(1)式]:

$$l' = F + \frac{(l-F)F^2}{(l-F)^2 + (\pi w_0^2/\lambda)^2}, \quad (1a)$$

$$\frac{1}{w_0'^2} = \frac{1}{w_0^2} \left(1 - \frac{l}{F}\right)^2 + \frac{1}{F^2} \left(\frac{\pi w_0}{\lambda}\right)^2, \quad (1b)$$

这里 F 为 Video camera 透镜焦距 ($F=6 \text{ mm}$), w_0 为物方高斯光束腰斑半径, l 为物方高斯光束腰和

透镜的距离, w_0' 、 l' 代表像方高斯光束腰斑大小和位置。

测试图样的分析结果见表 3。

表 3 样品 DT10 和 DT12 实验数据

Table 3 Data for sample DT10 and DT12

Test Item	DT10	DT12
z / mm	20	20
l / mm	20	20
x1_B_SDonChip	251	231
x2_B_SDonChip	393	385
SDonChip /mm	1.07831	1.6944
w_0 / mm	0.00224	0.00207
w_{0i} / mm	0.0010	0.0009
PO l_i / mm	8.5714	8.5714
SDonLens /mm	3.59440	3.8981
$\theta / (^\circ)$	10.2971	11.1673

表中 x1_B_SDonChip 和 x2_B_SDonChip 是互补金属氧化物半导体芯片上光斑位图直径两点坐标, SDonChip 是互补金属氧化物半导体芯片上实际光斑直径大小, SDonLens 是透镜上光斑直径大小, w_{0i} 和 l_i 是像方腰斑(或像点)半径和距透镜位置。

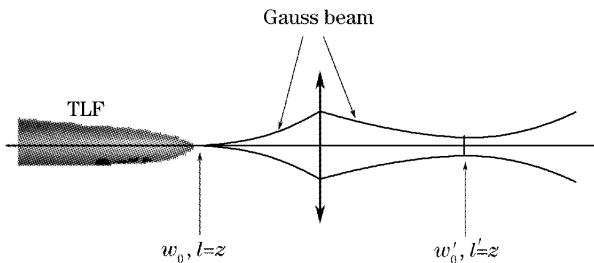


图 7 基于物理光学(PO)的锥形透镜光纤实验反推法

Fig. 7 Tapered and lensed fiber inverse deducing method based on physical optics

ω_0 是锥形透镜光纤末端处物方腰斑半径,即理论公式中的 ω_L 。可见,两个锥形透镜光纤样品出射光斑直径平均值为 $4.31 \mu\text{m}$ 、远场发散角平均值为 10.73° ,与论文第二部分理论公式计算的结果($4.45 \mu\text{m}$ 和 10.35°)相比,误差分别为 3.15% 和 3.67% 。存在误差的主要原因是锥形透镜光纤优化参量在实际拉锥过程中不易精确控制,样品的一致性较难保证。

4 结 论

本文深入研究了锥形透镜光纤的聚焦特性,为实现光纤与平面光波光路芯片高效耦合和封装奠定了基础。将普通单模光纤拉制成锥形透镜光纤,优化设计参量为:成锥长度 $300 \mu\text{m}$,锥角 0.733° ,透镜曲率半径 $13.485 \mu\text{m}$ 。

1) 在平面光波光路芯片技术中,锥形透镜光纤可以实现与光波导的高效耦合。

2) 锥形透镜光纤聚焦特性分析模型理论值与标称值相比,误差小于 1.14% 。

3) 锥形透镜光纤的聚焦光斑尺寸和远场发散角实验结果与理论公式的结果相比,误差分别为 3.15% 和 3.67% 。

参 考 文 献

- 1 Johan H. C. van Zantvoort, Giok-Djan Khoe, Huig de Waardt. Fiber array-to-photonic-chip fixation and fine tuning using laser support adjustment[J]. *IEEE J. Selected Topics in Quant. Electron.*, 2002, **8**(6): 1331~1340
- 2 Qi Xiaoling, Cai Zhigang, Xu Yuke *et al.*. A theoretical study of optical coupling in optical components[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 521~526 (in Chinese)
- 齐晓玲,蔡志岗,徐宇科 等. 光耦合理论及其在通信元器件中的应用[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 521~526
- 3 Long Caihua, Chen Baoxue, Sha Huijun *et al.*. Study on fiber-waveguide automatic alignment system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(4): 442~447 (in Chinese)
- 龙彩华,陈抱雪,沙慧军 等. 光波导-光纤自动调芯系统研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(4): 442~447
- 4 T. Alder, R. Heinzemann, S. Leonhard *et al.*. Fiber-chip-coupling based on InP-V-groove-technology[C]. *Conf. Proc. LEOS'98*, 1998. 40~41
- 5 M. Hoffmann, E. Voges. Bulk silicon micromachining for MEMS in optical communication systems[J]. *J. Micromech. Microeng.*, 2002, (12): 349~360
- 6 M. Fritze, J. Knecht, C. Bozler *et al.*. 3D mode converters for SOI integrated optics[C]. *IEEE International SOI Conference*, 2002. 165~166
- 7 Ma Hong, Yi Xinjian, Chen Sihai. Monolithic integration of spot-size converters with $1.3 \mu\text{m}$ polarization-insensitive semiconductor optical amplifiers[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 756~758 (in Chinese)
- 马宏,易新建,陈四海. $1.3 \mu\text{m}$ 偏振无关半导体光放大器单片集成模斑变换器[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 756~758
- 8 J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart *et al.*. Tapered single-mode fibers and devices Part 1: Adiabaticity criteria[J]. *IEE Proc.*, 1991, **138**(5): 343~354
- 9 R. J. Black, S. Lacroix, F. Gonthier *et al.*. Tapered single-mode fibers and devices Part 2: Experimental and theoretical quantification[J]. *IEE Proc.*, 1991, **138**(5): 355~364
- 10 R. Keil, E. Klement, K. Mathyssek *et al.*. Experimental investigation of the beam spot size radius in single-mode fiber tapers[J]. *Electron. Lett.*, 1984, **20**(15): 621~622
- 11 Francois Gonthier, Alain Henault, Suzannet Lacroix *et al.*. Mode coupling in nonuniform fibers: comparison between coupled-mode theory and finite-difference beam-propagation method simulations[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1991, **8**(2): 416~421
- 12 Alexander J. Fielding, Klaus Edinger, Christopher C. Davis. Experimental observation of mode evolution in single-mode tapered optical fibers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1999, **17**(9): 1649~1656