

大孔径光纤过渡器中光波特性的分析

王云明, 孙小菡, 张明德

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

[摘要] 提出了基于束传输法 (BPM) 的大孔径光纤锥形过渡器理论分析模型。讨论了过渡器在纵向边界线性和非线性情况下 (包括类似正弦型和余弦型变化), 分别以大小端作为输入端口, 耦合角度以及耦合长度对过渡器的损耗和耦合效率的影响, 得出了过渡器最佳纵向边界、耦合角度和耦合长度。

[关键词] 束传输法 (BPM); 大孔径光纤; 锥形过渡器; 插入损耗

[中图分类号] TN 253 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742 (2002) 10-0052-05

1 引言

建立经济高效的光纤城域网 (WAN)、局域网 (LAN) 是今后光纤通信网络技术的重要应用领域之一。各类多模光纤 (包括聚合物光纤、多模石英光纤等) 作为短距离通信传输媒介具有的较大优势^[1,2]。在构成光纤桌面系统以太网时, 各类光纤器件是十分关键的^[2]。在涉及到与光源、探测器的连接耦合以及构成星型耦合器、与单模光纤和其他小孔径光纤连接耦合时, 都会遇到两端尺寸变换等问题, 需采用光纤过渡器。由于此类过渡器在材料及尺寸上与单模石英光纤过渡器相比差异很大, 已有的分析方法并不适用, 制作技术 (如熔融拉锥法) 也必须改变。为了确定大孔径过渡器的尺寸及参数需采用新的途径^[3,4]。笔者基于束传输法 (BPM) 对大孔径过渡器进行研究。

2 理论

2.1 基本方程

基于弱导近似假设, 可知大孔径光纤中传输的光波满足标量亥姆霍兹方程:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2(x, y, z)\phi = 0. \quad (1)$$

式中 $k(x, y, z)$ 为空间波数。设 $\phi = u(x, y, z)e^{j\bar{k}z}$, 其中 $u(x, y, z)$ 是光纤中的传输场。式 (1) 变为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2j\bar{k} \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + (k^2 - \bar{k}^2)u = 0. \quad (2)$$

$\bar{k} = k_0 \bar{n}$ 代表场量 ϕ 的平均相位变化, 称为参考波数, 与导波模的等效折射有关^[5,6]。由于 $u(x, y, z)$ 随 z 缓慢变化, 所以式 (2) 的 $\frac{\partial^2}{\partial z^2}$ 项可以忽略不计, 于是基本的三维 BPM 方程为

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{j}{2\bar{k}} \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + (k^2 - \bar{k}^2) \right\} u. \quad (3)$$

式 (3) 中忽略有关 y (或 x) 的项, 则可得更简单的二维 BPM 方程。从式 (3) 可以看出, 只要给定输入场 $u(x, y, z) = 0$, 就可以得出 $z > 0$ 空间特定的模式场分布。大孔径光纤中各导波模的等效折射率可以通过求解其本征值得出。

2.2 算法

采用有限差分法, 考虑式 (3) 的二维 (x, z) 的

[收稿日期] 2002-02-18; **[修回日期]** 2002-06-29

[基金项目] “九五”重点科技攻关资助项目 (95-720-220-01)

[作者简介] 王云明 (1978-), 男, 江西吉安市人, 东南大学博士研究生

情况,令 u_i^n 代表第 n 个平面上第 i 个节点的场(平面间距为 Δz , 点阵间距为 Δx), 根据 Crank-Nicholson 差分格式,式(3)变为

$$\frac{u_i^{n+1} - u_i^n}{\Delta z} = \frac{j}{2k} \left(\frac{\nabla^2}{\Delta x^2} + (k(x_i, z_{n+1/2})^2 - \bar{k}^2) \right) \cdot \frac{u_i^{n+1} + u_i^n}{2} \quad (4)$$

其中 ∇^2 为二阶微分算子, $\nabla^2 u_i = (u_{i+1} + u_{i-1} - 2u_i)$, 且有 $x_i = i\Delta x$, $z_{n+1/2} = n\Delta z + \Delta z/2$, $\bar{n}(x) = \int_{z+\Delta z}^z n(x, z)/\Delta z dz$ 。式(4)对应于三对角线性方程组,可简单而稳定快速的求解^[7]。直接将 Crank-Nicholson 差分格式应用于三维情形,将得到非三对角线性方程组,可参照交替方向隐式方法^[8,9],将其优化计算。

3 仿真

图 1 为大孔径光纤锥形过渡器的示意图, D_a 是过渡器小端直径, D_b 是大端直径, θ 是圆锥角度, L 是耦合长度。它们之间的关系式为: $\tan \theta = [(D_b - D_a)/2L]$ 。锥形光纤过渡器的各参数及计算取值见表 1。

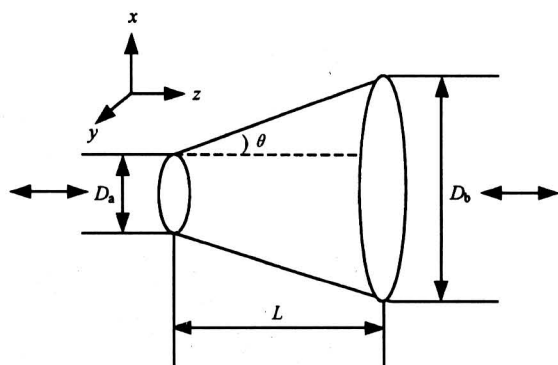


图 1 锥形光纤过渡器的部分示意图

Fig.1 Schematic of optical fiber connector

表 1 光纤过渡器的各项参数

Table 1 Parameters of optical fiber connector

芯层折射率	1.58
包层折射率	1.49
入射光波长/ μm	0.65
小端直径/ μm	200
过渡器长度 $L/\mu\text{m}$	1 000~20 000
过渡器角度 $\theta/^\circ$	1~9
剖分点数	512
步长/ μm	0.65

分别改变 L 和 θ , 得出场强的分布。设 ΔY 为出射端点距轴心的距离, 取 $\Delta Y = 100 \mu\text{m}$ 和 $\Delta Y = 150 \mu\text{m}$ 处, 过渡器角度不同时, 得出端面场强的变化曲线, 如图 2 所示。

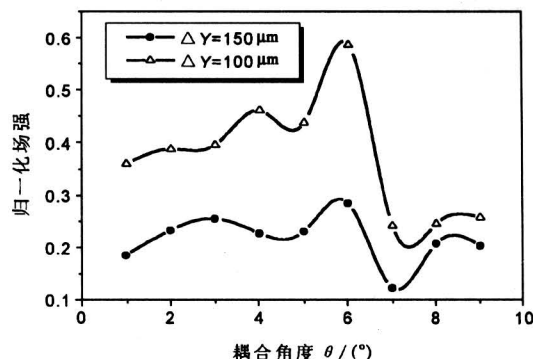


图 2 场强随角度的变化曲线

Fig.2 Normalized field versus coupling angle

可以看出当 $\theta = 6^\circ$ 时, 输出端面的场强最大。因为当 $\theta > 6^\circ$ 时, 过渡器的倾斜较大, 光在传输的过程中, 有更多的模式变成辐射模, 导致出射端面的功率变小。从图 3 的端面场强分布图可知, 光从过渡器小端入射, 经过一段距离的传输, 高阶模越来越多。最后, 在出射端面上, 基模位于中心处, 场强大; 高阶模随着模阶数的增加越来越往边缘移动, 场强也越弱。改变 θ 时, 出射端面的场强分布也在改变, 但中心处的光功率大, 两边的光功率小。取 $\theta = 6^\circ$, L 分别取不同的数值 ($250 \mu\text{m} \sim 1\,900 \mu\text{m}$) 其他相关的计算参数见表 1。取 $\Delta Y = 50 \mu\text{m}$ 和 $\Delta Y = 150 \mu\text{m}$ 处, 得出端面场强随长度 L 的变化关系, 如图 4 所示。

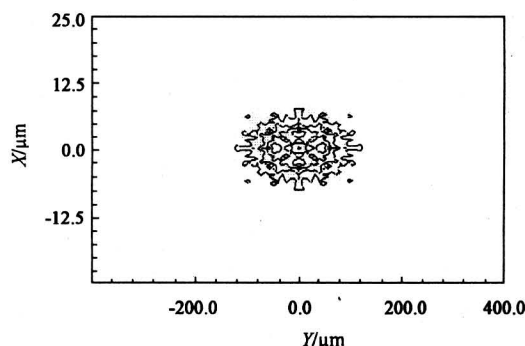


图 3 端面场强分布图

Fig.3 Field distribution in the output section

由图 4 可见, $L = 500 \mu\text{m}$ 时, 输出端面的场强最大; 但是, 当 $L = 500 \mu\text{m}$ 时, $D_b = 305 \mu\text{m}$,

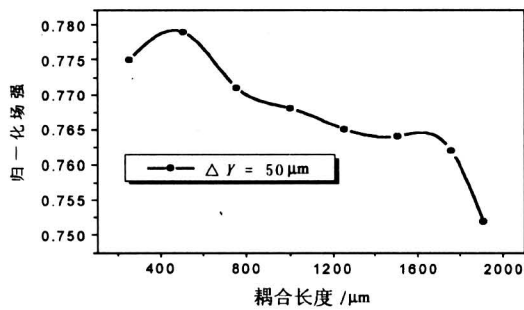
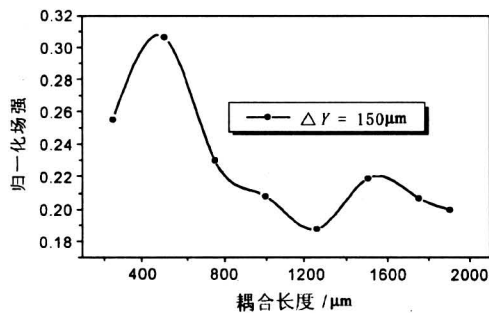
a. $\Delta Y = 50 \mu\text{m}$ b. $\Delta Y = 150 \mu\text{m}$

图4 场强随长度的变化曲线

Fig.4 Normalized field amplitude versus coupling length

此时大端难以放下 N ($N > 3$) 束光纤。因此, 取 $L = 1\,500 \mu\text{m}$, $D_b = 515 \mu\text{m}$ 。

锥形光纤过渡器的各参数和仿真的步骤不变, 输入光场从大端到小端, 分别改变 θ , L 得出的结果如图5和图6所示。 ΔY 取不同数值的计算结果分别列在图5a和图6a与图5b和图6b中。同样可以得出最佳的耦合角度以及最适合锥形过渡器的耦合长度。

过渡器纵向边界非线性变化如图7和图8所示。定义耦合区纵向截面呈类似正弦和余弦曲线状, 分别称作为正弦型和余弦型过渡器。过渡器的小端的直径 D_a 仍然为 $200 \mu\text{m}$ 。

根据 $\theta = 1 \sim 9^\circ$, 分别改变不同的长度, 从小端输入光场, 进行仿真计算。得到图9a和图9b所示场强随角度变化的曲线关系图(对应不同的耦合长度)。可以看出, 当 $\theta = 5.6^\circ$ 时, 过渡器的归一化场强幅度达到最大。可见过渡器的纵向截面发生非线性变化以后, 最佳的耦合长度为 $L = 2\,000 \mu\text{m}$ 。图10所示为分别对正弦型和余弦型过渡器的大端到小端的场强变化关系图, 以及与线性情况下比较。同样得到最佳耦合长度是当 $\theta = 5.6^\circ$ 时 $L =$

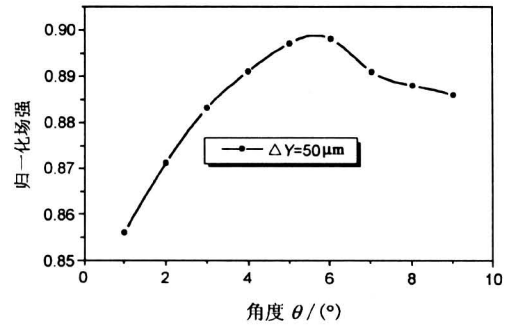
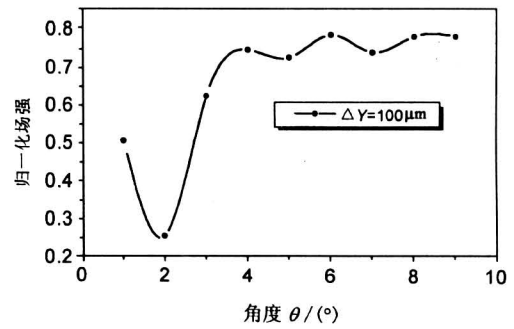
a. $\Delta Y = 50 \mu\text{m}$ b. $\Delta Y = 100 \mu\text{m}$

图5 场强随角度的变化曲线

Fig.5 Normalized field amplitude versus coupling angle

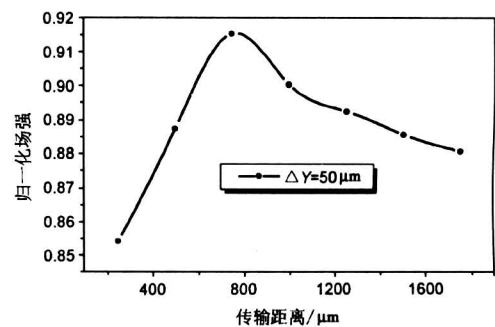
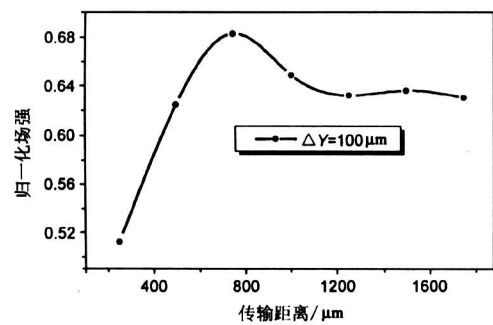
a. $\Delta Y = 50 \mu\text{m}$ b. $\Delta Y = 100 \mu\text{m}$

图6 场强随长度的变化曲线

Fig.6 Normalized field amplitude versus coupling length

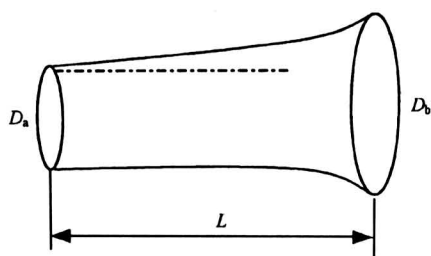


图 7 类似正弦型过渡器的截面图

Fig.7 Section of similarity asinine type

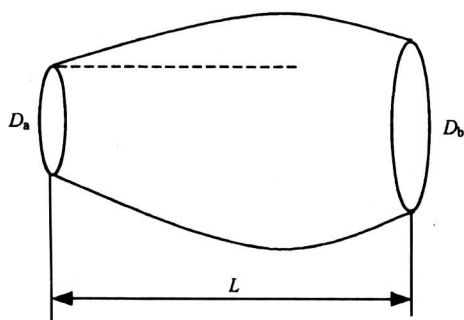


图 8 类似余弦型过渡器的截面图

Fig.8 Section of similarity cosine type

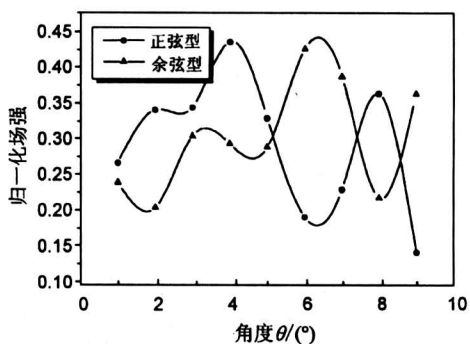
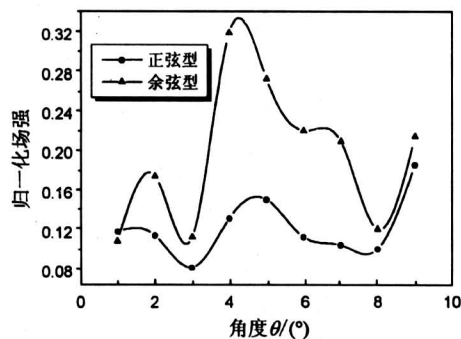
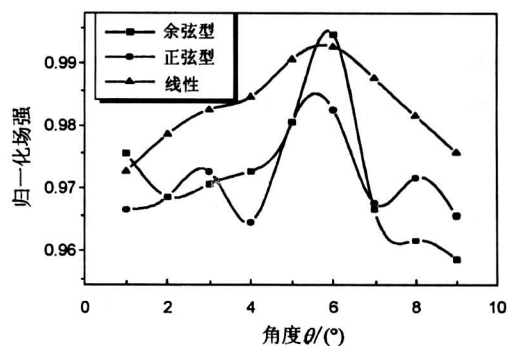
a. $\Delta Y = 100 \mu\text{m}$ b. $\Delta Y = 150 \mu\text{m}$

图 9 场强 (小端到大端) 随角度变化曲线

Fig.9 Normalized field versus coupling angle (from a - b)

图 10 大端到小端场强的变化曲线的比较 ($\Delta Y = 50 \mu\text{m}$)Fig.10 Comparison of the field ($\Delta Y = 50 \mu\text{m}$, from b - a)

2 000 μm 。图 11 所示为过渡器中归一化场强随过渡器总传输距离 (过渡器长度) 的变化曲线, 当到达 0.7 mm 后, 场强趋于稳定。

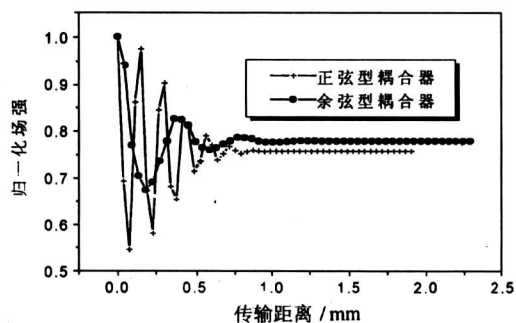


图 11 过渡器中场强随传输距离的变化

Fig.11 Field in the connector versus propagation distance

4 结论

1) 证明了过渡器的输出端光场强度分布不均匀, 中心处强, 两端弱;

2) 由过渡器的大小两端输入场进行模拟、计算, 在线性情况下, 得出了最佳的角度为 6° 以及最适合锥形过渡器的 $L = 1\,500 \mu\text{m}$ 。

3) 分析了过渡器的纵向边界非线性情形下光波特性, 得出过渡器的最佳耦合长度 $L = 2\,000 \mu\text{m}$;

4) 通过比较纵向边界线性和非线性的不同情况, 得出余弦边界比正弦边界更好, 并且在线性情况下, 过渡器的耦合长度不宜过长, 而在非线性情况下允许耦合长度相对较长。

参考文献

- [1] Wang Yunming, Yang Chun, Xiaohan Sun. Study on tapered polymer optical fiber coupler by a beam propagation method [J]. SPIE, 2001, 4604 (11): 117~122
- [2] koike Y, Ishigure T, Nihei E. bandwidth graded-index polymer optical fiber [J]. IEEE J L Technology, 1995, 13: 1475~1489
- [3] Yamazaki S, Hotta H, Nakaya S, et al. A 2.5 Gb/s 100 m GRIN plastic optical fiber data link a 650 nm wavelength [A]. In Graded Index POF [M]. Boston MA: Information Gatekeepers, 1996. 98~101
- [4] Ai Jun, Li Yao. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers [J]. Optical Engineering 1999, 8 (6): 1024~1028
- [5] Feit M D, Fleck J A. Light propagation in grade-index optical fibers [J]. Appl Opt, 1978, 17 (24): 3990~3998
- [6] Koch T B, Devies J B, Wickramasinghe D. Finite element/finite difference propagation algorithm for integrated optical device [J]. Electronics Letters, 1989, 25 (8): 514~516
- [7] Mitomi O, Kasaya K. An improved semivectorial beam propagation method using a finite-element scheme [J]. IEEE J L Technology, 1998, 10 (12): 1754~1756
- [8] Yang Chun, Sun Xiaohan, Wang Yunming, et al. 1×7 Cylindrical mixing-rod plastic optical fiber couple [J]. High Technology Letters, 2000, 12: 17~20
- [9] 杨 春, 孙小茜, 王云明, 等. 1×7 圆柱形棒混合棒塑料光纤过渡器 [J]. 光学学报, 2001, 21 (9): 1116~1122

Analysis on the Performance of Lightwave in the Large-core Optical Fiber Connector

Wang Yunming, Sun Xiaohan, Zhang Mingde

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

[Abstract] An analytical model for the large-core optical fiber connector is presented based on beam propagation method(BPM). In the case of the linear and nonlinear (including sinusoidal and cosine) vertical section of connector, affections of the coupling length and coupling angle for the connector on the insert loss and coupling efficiency are discussed when the beginning section and the ending section act as the input respectively. Optimum vertical section, length, and angle of the connector are obtained.

[Key words] beam propagation method (BPM); large-core optical fibers; tapered connector; insert loss

《中国工程科学》2002 年第 4 卷第 11 期要目预告

我国人群血脂水平现状及其对策 陈灏珠等
 论主战坦克技术特点和发展趋势 王哲荣
 新世纪的精细化工 杨锦宗
 台湾海峡地震危险初析与海峡隧道修建
 的可行性研究 李 珲等
 战斗部材料的研究进展 才鸿年等
 城市燃气发展中的主要问题 李猷嘉
 电动车锂离子电池的材料问题 陈立泉
 交直流电力集成技术 马伟明
 地下工程新技术的实践 马洪琪

风包粉系列浓淡煤粉燃烧技术的研究
 秦裕琨等
 压力梯度作用下相干结构的演化 陆利蓬等
 模糊灰色物元空间(FHW)理论与实践
 ——宏观复杂大系统决策方法 谢砚青等
 偏振模色散对高速光码的影响 饶 敏等
 复杂性工程技术问题研究实践与科学
 方法论思考 李世辉
 植物生长调节剂三十烷醇(TA)乳粉对
 水稻产量的影响 刘德盛等