

波分复用/解复用器中自聚焦棒透镜 的长度匹配*

胡卫生 曾庆济

(上海交通大学电子信息学院、宽带光网技术研究开发中心, 上海 200030)

摘 要 在 $1 \times N$ 波分复用/解复用器中, $N + 1$ 个自聚焦棒透镜构成了一个 1 到 N 的准直系统。自聚焦棒透镜之间的间隔不等, 导致了较大的不均匀的附加耦合损耗。为了使总的平均损耗最低, $N + 1$ 个自聚焦棒透镜的长度应匹配选择。数值计算结果表明, 输入自聚焦棒透镜应比 $1/4$ 节距稍长 $\Delta Z_0 = 20 \sim 50 \mu\text{m}$, 因 N 而异, 有一上限。 N 个输出自聚焦棒透镜的长度不等, 靠近输入端者比 $1/4$ 节距略短, 远端者比 $1/4$ 节距略长, 亦因 N 而异。这样匹配使得总的损耗最低, 适用于 $N \leq 8$ (尤其是 $N \leq 6$) 的情形。

关键词 波分复用/解复用器, 自聚焦棒透镜, 准直系统, 耦合损耗, 光纤通信。

1 引 言

在一根单模光纤中同时传输多个波长的信道, 能数倍乃至数十倍地提高光纤的实际传输容量, 实现新一代的宽带光通信网, 即多波长光通信网^[1, 2]。波分复用/解复用器是最基本和最关键的器件之一。早期的波分复用/解复用器基于多模光纤, 信道间隔较大(如 30 nm), 技术上较易实现^[3]。但目前和未来的多波长光通信网基于单模光纤, 利用掺铒光纤在 1.55 μm 波段约 30 nm 带宽的均衡光放大能力。这就要求波长信道作密集安排, 如间隔为 3.2 nm、1.6 nm 甚至 0.8 nm^[4, 5]。目前基于干涉滤光膜片的波分复用/解复用器性能优异, 已获得重要应用^[6], 示意结构如图 1 所示。以 $1 \times N$ 解复用器为例, 单模光纤基模高斯光束通过 $N + 1$ 个自聚焦棒透镜实现光耦合。连至输入光纤的自聚焦棒透镜用于光束准直; 其余 N 个连至输出光纤, 用于光束聚焦。由此构成一个 1 到 N 的准直耦合系统。因为自聚焦棒透镜之间的间隔不等, 将带来一定的耦合损耗。如何选择自聚焦棒透镜, 以最大限度地降低耦合损耗,

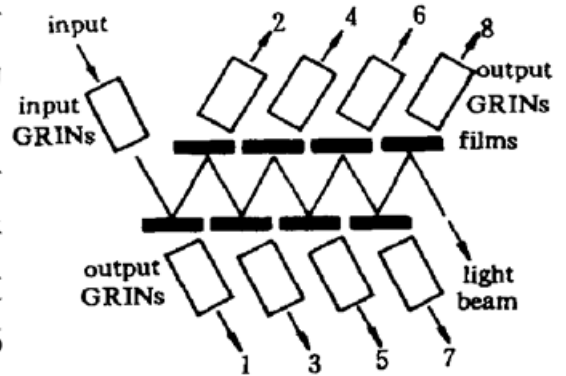


Fig. 1 A schematic of a $1 \times N$ demultiplexer and wherein 1-to- N collimating system using gradient-index-rod lenses

* 国家科委 863 高技术项目。

收稿日期: 1997-10-04; 收到修改稿日期: 1998-05-04

便是本工作的出发点。

2 理论基础

$1 \times N$ 准直系统的基本准直单元如图 2 所示。一对自聚焦棒透镜之间的约化间隔是变化的, 令其为

$$d_i = 10i \text{ (mm)} \quad (1)$$

下标 i 对应第 i 个输出自聚焦棒透镜, $i = 1, 2, \dots, N$ 。这里假设间隔依次递增 10 mm 是合理的。

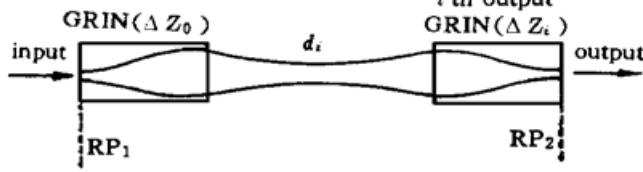


Fig. 2 A schematic of a collimating unit used in the 1 -to- N collimating system. The separation d_i is varying ($i = 1, 2, \dots, N$). RP: reference plane

考虑到 d_i 是变化的, 自聚焦棒透镜不能是标准的 $1/4$ 节距, 否则将带来较大的耦合损耗^[6, 7]。不妨设输入自聚焦棒透镜比 $1/4$ 节距稍长 ΔZ_0 , 输出自聚焦棒透镜比 $1/4$ 节距稍长或稍短 ΔZ_i ,

$i = 1, 2, \dots, N$ 。不难写出输入自聚焦棒透镜的光线矩阵 G_0 为^[9]

$$G_0 = \begin{bmatrix} -\sin A^{1/2} \Delta Z_0 & (1/n_0 A^{1/2}) \cos A^{1/2} \Delta Z_0 \\ -n_0 A^{1/2} \cos A^{1/2} \Delta Z_0 & -\sin A^{1/2} \Delta Z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 $A^{1/2}$ 为自聚焦棒透镜的聚焦参数, 表示梯度折射率的变化程度。 n_0 是自聚焦棒透镜光轴上的中心折射率。将(2)式中的 ΔZ_0 换成 ΔZ_i 即得到输出自聚焦棒透镜的光线矩阵 G_i 。

一对自聚焦棒透镜之间的均匀介质(如空气)的光线传输矩阵为^[8]

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & d_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

这样便得到准直单元的光线矩阵:

$$M_i = G_i T_i G_0 = \begin{bmatrix} A_i & B_i \\ C_i & D_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $i = 1, 2, \dots, N$ 。单模光纤中传输的是基模高斯光束, 复曲率参数为 q_0 :

$$q_0 = j\lambda/\pi w_0^2 \quad (5)$$

式中 λ 为光波波长, w_0 为束斑半径, j 表示虚数。直接利用 $ABCD$ 定律, 得到耦合单元输出端面处的高斯光束复曲率参数^[8]

$$q_i = (A_i q_0 + B_i)/(C_i q_0 + D_i) \quad (6)$$

并且

$$q_i = 1/R_i + j\lambda/\pi w_i^2 \quad (7)$$

R_i 和 w_i 分别是高斯光束在输出参考平面处(如图 2)的曲率半径和束斑半径。高斯光束耦合进输出单模光纤的耦合效率为^[9]

$$\kappa_i = 4[(w_0/w_i + w_i/w_0)^2 + (\pi w_0 w_i/\lambda)^2 (1/R_i)^2]^{-1} \quad (8)$$

相应的附加耦合损耗为

$$L_i(\text{dB}) = 4.343 \ln \kappa_i^{-1} \quad (9)$$

需要指出的是, 本文仅考虑因自聚焦棒透镜之间的间隔引起的附加耦合损耗, 其它因素引起的损耗不包括在内。

3 数值计算结果与讨论

为节省篇幅, 本文仅讨论一种自聚焦棒透镜, 即 $\lambda = 1.56 \mu\text{m}$, $A^{1/2} = 0.326 \text{ mm}^{-1}$,

$n_0 = 1.5901^{[10]}$, $w_0 = 5.25 \mu\text{m}^{[6, 7]}$ 。令 ΔZ_0 和 ΔZ_i 在一定范围内变化, 计算出相应的耦合损耗 L_i , 以最低平均损耗作为判断条件(目标函数), 确定出最佳 ΔZ_0 和 ΔZ_i 。定义平均损耗

$$\langle L_i \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i \quad (10)$$

其中 $N = 4, 5, \dots, 16$ 。计算结果示于图 3~ 图 5。图 3 示出了不同 N 值下 ΔZ_i 的优化值。负(正)值表示比 1/4 节距稍短(长)。可见, 靠近输入自聚焦棒透镜的输出自聚焦棒透镜稍短, 靠近者稍长。

图 4 示出了不同 N 值下的损耗分布 L_i 。发现只能保证一个输出自聚焦棒透镜与输入自聚焦棒透镜之间的耦合损耗接近于 0, 其余稍高, 最末端者最高。表现出一定的不均匀性, N 大时更为明显(如 $N > 8$)。欲降低单个端口的最大损耗, 需适当调整优化的 ΔZ_0 和 ΔZ_i 参数, 但代价是增加了部分其他端口的损耗, 最终使得总的平均损耗增加。

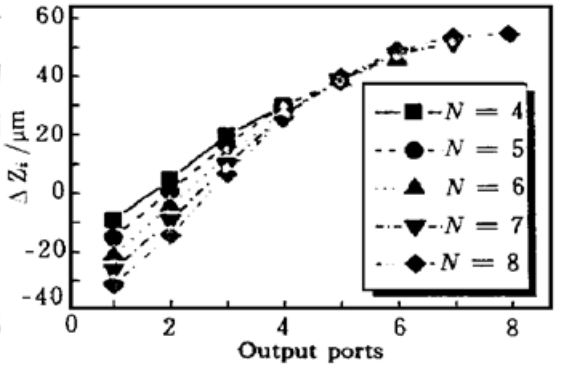


Fig. 3 Optimized excess length ΔZ_i of the N output GRINs. $N = 4, 5, \dots, 8$

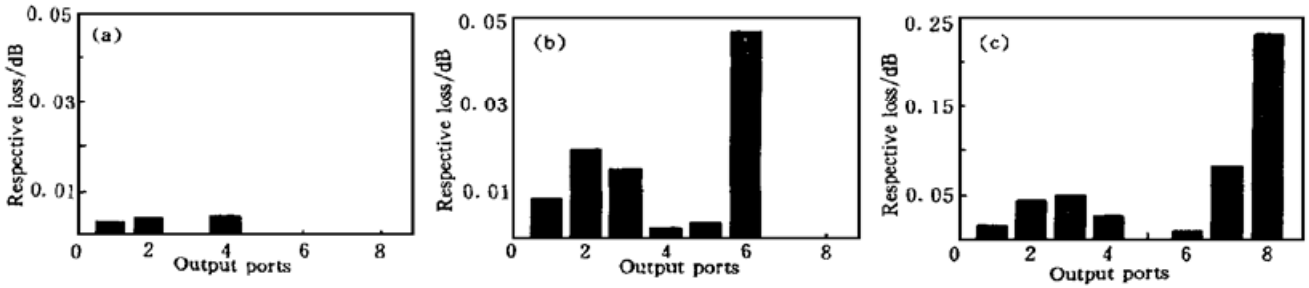


Fig. 4 Excess coupling losses L_i at (a) $N = 4$, (b) $N = 6$ and (c) $N = 8$

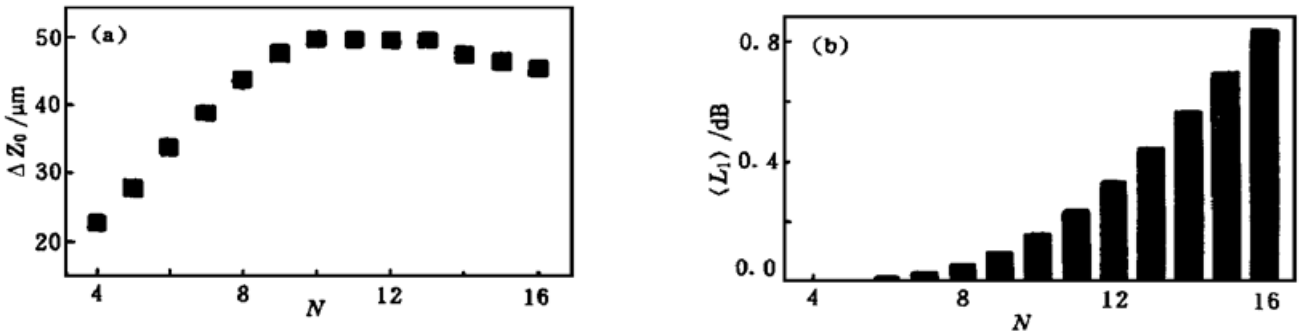


Fig. 5 (a) Optimized ΔZ_0 versus N . and (b) Average coupling $\langle L_i \rangle$ loss versus N under optimum matching

ΔZ_0 优化值示于图 5(a), 一般在 $20 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间, N 较小时随 N 而增大, N 较大时随 N 而下降, 有一上限。不同 N 值下的平均损耗 $\langle L_i \rangle$ 示于图 5(b)。 $N \leq 6$ 时平均损耗甚小, 几可忽略。 $N \leq 8$ 亦可取, 再大便不宜了。

结 论 在波分复用/解复用器中, 用到多个自聚焦棒透镜, 构成了一个一到多个准直耦合系统。因自聚焦棒透镜之间的间隔不同, 带来一定的不均匀的附加耦合损耗。为了最大限度地降低耦合损耗, 本文通过计算机编程计算, 找到了自聚焦棒透镜之间的最佳长度匹配。计算结果表明, 输入自聚焦棒透镜比 1/4 节距稍长 (ΔZ_0), 其合适的长度与 N 有关, 一般在 20

~ 50 μm 之间。 N 较小时随 N 而增大, 较大时随 N 而下降, 有一上限。 N 个输出自聚焦棒透镜比 $1/4$ 节距稍长 ($\Delta Z_i > 0$) 或稍短 (< 0), 各有最佳值。这样的匹配使得总的平均损耗最低, 适用于 $N \leq 8$ (尤其是 $N \leq 6$) 的情形。但 N 个损耗值有一定的不均匀性, 只能保证一个最小 (接近于 0), 其余略高, 尤以远端最大。

参 考 文 献

- [1] Brackett C A. Forward-is there an emerging consensus on WDM networking. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6) : 936~ 941
- [2] Koga M, Hamazumi Y, Watanabe A *et al.*. Design and performance of an optical path cross-connect system based on wavelength path concept. *J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(6) : 1106~ 1119
- [3] Ishio H, Minowa J, Nosu K. Review and status of wavelength-division multiplexing technology and its application. *J. Lightwave Technol.*, 1984, **2**(4) : 448~ 463
- [4] Wisely D R. 32 channel WDM multiplexer with 1 nm channel spacing and 0.7 nm bandwidth. *Electron. Lett.*, 1991, **27**(6) : 520~ 521
- [5] Dragone C, Edwards C A, Kistler R C. Integrated optics $N \times N$ multiplexer on silicon. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1991, **3**(10) : 896~ 899
- [6] Gilsdorf R W, Palais J C. Single-mode fiber coupling efficiency with graded-index rod lens. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(16) : 3440~ 3445
- [7] Sakamoto T. Coupling characteristic analysis of single-mode and multimode optical-fiber connectors using gradient-index-rod lenses. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(25) : 5184~ 5190
- [8] Gerrard A, Burch J M. Introduction to matrix methods in optics. London: *John Wiley & Sons*, 1975. Chap II and III
- [9] Kogelnik H. Coupling and conversion coefficients for optical modes. *Proc. Symp. on Quasi-Opt. Microwave Res. Inst. Symp. Series*, 1964, **14** : 333~ 347
- [10] *SELFOC[®] Product Guide*, Somerset: NSG America, Inc.

Optimum Length Matching of Gradient-Index-Rod Lenses in Wavelength-Division Multi/Demultiplexers

Hu Weishen Zeng Qinji

(Research and Development Center for Broadband and Optical Networking Technology,
College of Electron. and Inform. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030)

(Received 4 October 1997; revised 4 May 1998)

Abstract There are $N + 1$ gradient-index-rod lenses (GRINs) in a $1 \times N$ wavelength division multi/demultiplexer, forming a 1-to- N collimating system. Excess coupling losses arise due to the varying separations between the GRINs. The lengths of the GRINs need to be properly chosen to achieve a lowest average coupling loss. Numerical results show that the input GRIN is ΔZ_0 longer than quarter pitch with $\Delta Z_0 = 20 \sim 50 \mu\text{m}$, depending on N . There is an upper limit for ΔZ_0 . The lengths of N output GRINs are differently shorter ($\Delta Z_i < 0$) or longer (> 0) than quarter pitch. ΔZ_i increases from negative to positive starting from the near end to the far end GRINs, also depending upon N . The optimized matching GRINs assure the lowest coupling loss at $N \leq 8$, especially negligible at $N \leq 6$.

Key words wavelength-division multi/demultiplexers, gradient-index-rod lens, collimating system, coupling loss, optical fiber communication.