

正方分布的 4×4 单模光纤熔锥 耦合器耦合特性分析

姚寿铨 黄 勇 谢国平

(上海科学技术大学上海光纤技术与现代通信研究所, 上海 201800)

提 要

本文以线性耦合波方程为基础, 采用散射矩阵的方法讨论了具有正方分布的 4×4 单模光纤熔锥形耦合器的耦合特性, 并与实验作了比较, 得到了比较一致的结果。

关键词: 单模光纤, 散射矩阵, 熔锥耦合器。

一、引 言

星型单模光纤耦合器在现代光纤通信技术和光纤传感技术中有着广阔的应用前景。而 4×4 单模光纤耦合器可以兼有 2×2 耦合器和 3×3 耦合器功能, 且利用单个 4×4 耦合器就可以实现光波的 $\pi/2$ 相移相干接收, 这对相干通信和干涉型光纤传感器的信号处理非常有利, 是以前用几个 2×2 单模光纤耦合器适当串接成一个 4×4 耦合器所不能得到。叶培大曾提出: 实现新的零差接收方案的关键是制造一个具有正方分布的 4×4 单模光纤定向耦合器^[1]。

Yamashita 等人曾利用“点匹配法”分析了四芯光纤中相互耦合的情况, 但这种分析只适用于光纤间场的强耦合情况^[2]。本文以线性耦合波方程组为基础, 讨论了具有弱耦合特性的 4×4 熔锥型耦合器的耦合特性, 并和初步试制成的 4×4 耦合器的实验结果作了比较, 得到了比较一致的结果。

二、基本理论

4×4 单模光纤熔锥型耦合器的横截面如图 1 所示。在这种情况下四根光纤中场的相互作用满足线性耦合波方程:

$$\left. \begin{aligned} \dot{a}_1(z) &= i\beta_1^0 a_1(z) + ik_{12} a_2(z) + ik_{13} a_3(z) + ik_{14} a_4(z), \\ \dot{a}_2(z) &= ik_{21} a_1(z) + i\beta_2^0 a_2(z) + ik_{23} a_3(z) + ik_{24} a_4(z), \\ \dot{a}_3(z) &= ik_{31} a_1(z) + ik_{32} a_2(z) + i\beta_3^0 a_3(z) + ik_{34} a_4(z), \\ \dot{a}_4(z) &= ik_{41} a_1(z) + ik_{42} a_2(z) + ik_{43} a_3(z) + i\beta_4^0 a_4(z). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

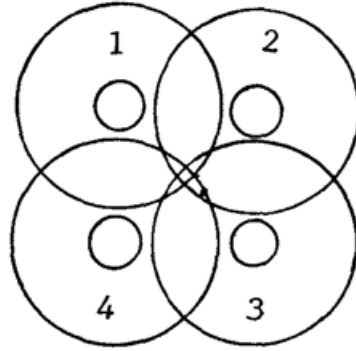


Fig. 2 The cross-section of 4x4 coupler (type 2)

三、在一个端口输入时的功率和相位

现考虑仅仅在一端输入单位光功率即 $[a(0)] = [1\ 0\ 0\ 0]$, 与(5)式一起代入(4)式可得:

$$\left. \begin{aligned} a_1(z) &= \cos(k_2 z) \cos^2(k_1 z) - i \sin(k_2 z) \sin^2(k_1 z), \\ a_2(z) &= \frac{1}{2} \sin(2k_1 z) \cdot [\sin(k_2 z) - i \cos(k_2 z)], \\ a_3(z) &= -\cos(k_2 z) \sin^2(k_1 z) + i \sin(k_2 z) \cos^2(k_1 z), \\ a_4(z) &= \frac{1}{2} \sin(2k_1 z) \cdot [\sin(k_2 z) - i \cos(k_2 z)]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则其各输出端口的输出功率为

$$\left. \begin{aligned} P_1(z) &= \frac{1}{4} [\cos^2(2k_1 z) + 2 \cos(2k_1 z) \cos(2k_2 z) + 1], \\ P_2(z) &= P_4(z) = \frac{1}{4} \sin^2(2k_1 z), \\ P_3(z) &= \frac{1}{4} [\cos^2(2k_1 z) - 2 \cos(2k_1 z) \cos(2k_2 z) + 1]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

在(8)式中, 假定 $k_1 = 10k_2$, 则耦合功率随 z 的变化关系如图 3 所示。各端口的输出相位为:

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \text{tg}^{-1} [-\text{tg}^2(k_1 z) \cdot \text{tg}(k_2 z)], \\ \phi_2 &= \phi_4 = (-1)^n \cdot \frac{\pi}{2} + k_2 z, \\ \phi_3 &= -\pi + \phi_1 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

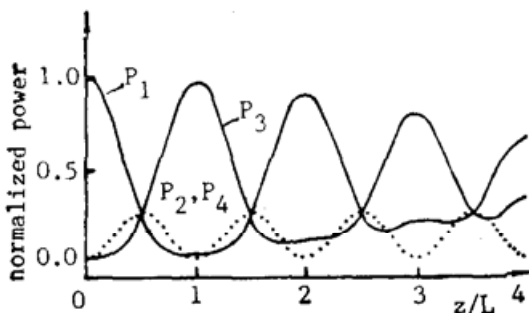


Fig. 3 The coupling characteristics of 4x4 coupler in the case of that $K_1 = 10K_2$

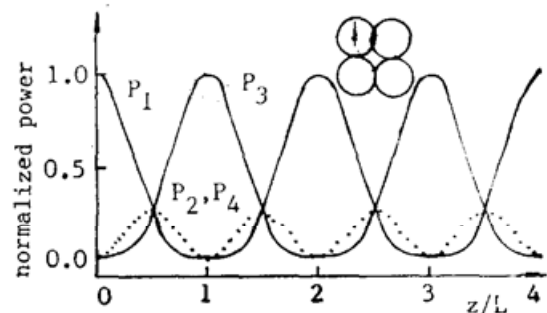


Fig. 4 The Coupling characteristics of 4x4 coupler in the case of that $K_2 = 0$

这里 $n=1, 2, 3 \dots$, 并且它满足 $n\pi \geq 2k_1 z \geq (n-1)\pi$ 。

从(9)式可得: 1 端口输出相位与耦合系数 k_1, k_2 及耦合区长度 z 有关, 而 ϕ_3 和 ϕ_1 之间的相位差始终为 π , 2 端和 4 端输出相位除了有一固定的相移 $(-1)^n \cdot \frac{\pi}{2}$ 以外还和 $k_2 z$ 有关。

若适当控制熔区的温度, 使得耦合区截面如图 2 所示, 则散射矩阵要采用 $[s]'$, 仍然是一端口注入单位光功率时, 其输出功率为:

$$\left. \begin{aligned} P_1(z) &= \cos^4(k_1 z), \\ P_2(z) &= P_4(z) = \frac{1}{4} \sin^2(2k_1 z), \\ P_3(z) &= \sin^4(k_1 z), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

由(10)式可看出: 其功率输出相当于两个直线型排布的 3×3 单模光纤定向耦合器的并联组合。其功率耦合曲线如图 4 所示。同时, 由于 $k_2=0$, 耦合器的输出相位由(9)式简化为:

$$\phi_1=0, \quad \phi_2=\phi_4=(-1)^n \cdot \pi/2, \quad \phi_3=-\pi. \quad (11)$$

式中 n 与(9)式中相同, 对实际器件一般 $n=1$ 。此时其各端口的输出相位差均固定为 $\frac{\pi}{2}$ 和 π 。

四、实验结果与讨论

采用高渗杂的石英毛细管预先套住四根经过清洁处理的单模裸光纤, 再把石英毛细管在高温焰上慢慢拉细, 使得石英毛细管把管内的四根裸光纤排列呈正方形, 再连光纤一起拉锥成 4×4 耦合器。采用高渗杂的石英毛细管是为了使其折射率低于光纤包层的折射率, 以防止在拉锥光纤时其内部模场扩展到石英套管里去形成附加损耗。这种耦合器的剖面如图 5 所示。由图 5 可看出对角光纤之间没有交迭区, 它的输出功率和相位特征应该如式(10), (11) 的表示。图 6 为这种耦合器的非归一化功率谱实验曲线, 与理论曲线基本相符。



Fig. 5 The photograph of cross-section at 4×4 coupler's waist

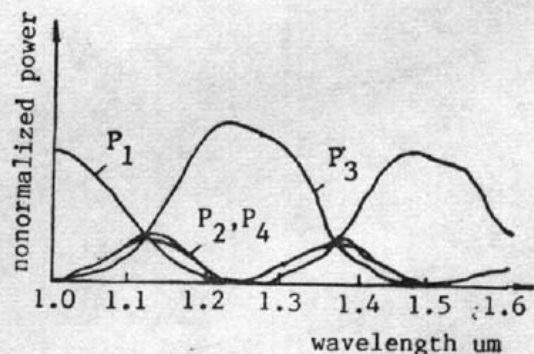


Fig. 6 Measured wavelength response of 4×4 coupler between $1.0 \mu\text{m}$ and $1.6 \mu\text{m}$

以上的情况均是仅仅在耦合器的 1 个端口注入光功率时的情况。若在耦合器一端注入信号光, 在三端注入本地振动光, 这就形成了叶培大教授等提出的新型的零差接收器。

参 考 文 献

- [1] Ye Peuda *et al.*; *Electron. Lett*, 1988, **24**, No. 19 (Sep), 1212~1213.
[2] Yamashita *et al.*; *J. Lightwave Tech.*, 1986, **LT-4**, No. 8 (Aug), 991~997.
[3] 李代高;《矩阵理论及其应用》, (重庆大学出版社, 重庆, 1989), 52~57。

Analysis of characteristics of 4×4 single mode optical fiber fused biconical coupler with a square distribution

YAO SHOUQUAN, HUANG YONG AND XIE GUOPIN

(*Shanghai University of Science and Technology, Wave Science Laboratory, Shanghai 201800*)

(Received 6 August 1990; revised 31 October 1990)

Abstract

This paper, based on linear coupled wave equations, discusses the characteristics of 4×4 single mode optical fiber biconical coupler with a square distribution using the method of scattering matrix. We have gotten a good agreement of results by comparing the theoretical results and the experimental results.

Key words: single mode optical fiber, scattering matrix, fused biconical coupler.