

文章编号: 0258-7025(2004)03-0323-05

熔锥平行排列 3×3 单模光纤耦合器的研究

何娜¹, 吴重庆¹, 卫炎², 刘爱明¹, 董贤子¹

(¹ 北京交通大学理学院, 北京 100044; ² 航天科技集团上海 803 所光纤中心, 上海 200233)

摘要 平行排列 3×3 单模光纤耦合器在光开关、光缓存器、光谐振腔、光滤波器等方面有很重要的应用, 偏振态的演化和波长特性是耦合器应用中的关键问题。利用模耦合理论对平行排列 3×3 单模光纤耦合器的输出性能进行了详细分析, 得出了光纤引线对耦合器的输出偏振态演化起主要作用, 而耦合区的影响则比较小; 通过理论推导模耦合系数, 分析了耦合器的分光比随波长的变化关系, 得出了输出分光比较稳定的耦合器所需要的合适芯间距 (对于我们研制的为 $12.5 \mu\text{m}$)。并采用可移动火焰实际研制出了具有长耦合区的平行排列 3×3 单模光纤耦合器, 测试表明输入光波长在 $1.500 \sim 1.575 \mu\text{m}$ 范围内变化时, 耦合器的输出分光比变化不大, 理论与实验结果基本相符。

关键词 光纤通信技术; 平行排列 3×3 单模光纤; 耦合器; 耦合系数

中图分类号 TN 929.11; TN 253 文献标识码 A

Fused Planar 3×3 Single Mode Fiber Coupler

HE Na¹, WU Chong-qing¹, WEI Yan², LIU Ai-ming¹, DONG Xian-zi¹

¹ School of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

² The Center of Fiber, The 803 Institute of China Aerospace & Technology Corporation, Shanghai 200233, China

Abstract Fused planar 3×3 single mode fiber coupler is very important in optic switch, optic buffer, optic resonator and optic filter etc, both the evolution of polarization and the performance of wavelength are the crux. Based on the coupled-mode equations, the theoretical analysis of a fused planar 3×3 fiber coupler was presented. It is not coupling field but optic fiber pigtail operating on the evolution of polarization. The appropriate distance of the cores of the fiber (it is $12.5 \mu\text{m}$ to us) is obtained via analyzing the relation between the splitting ratio and wavelength. And the fused planar 3×3 single mode fiber coupler is fabricated which has long coupling field by moving flame. The experiment results indicate that the splitting ratio of output of coupler has little change when the wavelength of the input optic range from 1.500 to $1.575 \mu\text{m}$, the experiment results are in good agreement with the theoretical analysis.

Key words optical communication technique; planar 3×3 single mode fiber; coupler; coupling coefficient

1 引言

3×3 单模光纤耦合器是一种重要的光纤耦合器, 可构成分光比可调的耦合器、光开关、光缓存器、光谐振腔、光滤波器等^[1~3]。 3×3 单模光纤耦合器主要有两种结构, 一种是等边三角形分布结构, 已较多地应用到光通信及传感系统; 另一种是平行排列光纤结构 (如图 1)。关于平行排列 3×3 单模光纤

耦合器, 已经有许多文献^[4~7]进行了深入的理论分析。偏振态的演化和分光比与波长的关系是耦合器的重要特性。比如, 当它用作干涉仪的时候, 就必须考虑偏振态的演化。偏振态的不稳定经常导致由它构成的光纤器件性能下降。在已有文献中都没有考虑光纤自身的双折射及光纤自身的模耦合对偏振态的影响, 所以无法得出偏振态的演化规律。为了获得比较好的偏振特性, 通常需要研制“保偏光纤耦合

收稿日期: 2003-04-16; 收到修改稿日期: 2003-06-25

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 60272010) 资助项目。

作者简介: 何娜 (1979—), 女, 陕西汉中, 北京交通大学理学院硕士研究生, 主要从事光纤通信中光器件的研究。

E-mail: henna@bjtu.edu.cn

万方数据

器”。但要把三根保偏光纤的光轴调整为一致是相当复杂的,不便于批量生产。如果能够掌握普通 3×3 耦合器的偏振态演化规律,对于研制新型光纤器件是有帮助的。分光比与波长的关系也是耦合器的重要特性,因为进入耦合器的光波长通常不止一个。如果多波长的光同时进入耦合器或者由于光源波长的波动引起分光比较大的波动,同样会影响由它构成的光纤器件的性能。当前,能进行大批量生产光纤耦合器的方法是熔融拉锥法,用这种方法制造的光纤耦合器的耦合系数与波长有关,导致分光比随波长变化。实际应用中要求耦合器的分光比变化率不能太大,所以对耦合系数波长特性的研究是十分必要的。

2 理论

由于平行排列 3×3 耦合器耦合区的光纤没有被熔拉得很细,可以认为光纤间的模耦合属于弱耦合,近似认为外侧的两根光纤之间不存在耦合,如图 1。

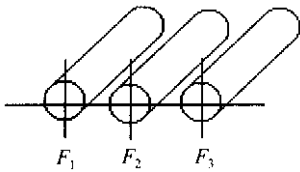


图 1 平行排列 3×3 光纤耦合器

Fig. 1 Planar 3×3 optic fiber coupler

2.1 不考虑双折射时的输出特性^[2]

在平行排列 3×3 光纤耦合器中,用 k_1 (k'_1) 表示相邻光纤 F_1 和 F_2 (或 F_2 和 F_3) 间的耦合系数,假定边上两根光纤完全对称,则 $k_1 = k'_1$; E_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为各根光纤中的场分布, β 为光纤传输常数,由于耦合器中三根光纤间的耦合非常弱,可以近似认为 k_1 在光纤的纵向上为常数,因此耦合方程可以解出,若记 $\theta = \sqrt{2}k_1$,则得到

$$(E_1 \ E_2 \ E_3)^T(z) = \mathbf{T}(E_1 \ E_2 \ E_3)^T(0) \quad (1)$$

上标 T 表示转置,其中传输矩阵 \mathbf{T} 为

$$\mathbf{T} = e^{i\beta z} \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(1 + \cos\theta z) & i\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\theta z & \frac{1}{2}(1 - \cos\theta z) \\ i\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\theta z & \cos\theta z & i\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\theta z \\ \frac{1}{2}(1 - \cos\theta z) & i\frac{\sqrt{2}}{2}\sin\theta z & \frac{1}{2}(1 + \cos\theta z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

考虑中心端注入归一化光功率,得

$$P_1 = P_3 = \frac{1}{2}\sin^2\theta z \quad P_2 = \cos^2\theta z \quad (3)$$

2.2 考虑光纤自身双折射及模耦合时偏振态的演化

实际正规光波导中,无论是圆的还是非圆的,都存在两个偏振主轴,从偏振主轴入射的线偏振光,可以保证仍为线偏振的。分析模式耦合,首先是研究这几个线偏振模之间的耦合。同样认为外侧的两根光纤之间不存在耦合,此时模耦合方程可写为

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} (z) = i \begin{bmatrix} B & C_1 & 0 \\ C_1 & B & C_1 \\ 0 & C_1 & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 E_i ($i = 1, 2, 3$) 为第 i 根光纤中的光场,每个光场均有 x 和 y 两个偏振方向。 $B = \begin{bmatrix} \beta_x & k_{xy} \\ k_{xy} & \beta_y \end{bmatrix}$ 为单根光纤自身的模耦合矩阵。 $C_1 = \begin{bmatrix} k_{ixjx} & k_{ijy} \\ k_{ixjy} & k_{iyjy} \end{bmatrix}$ 为相邻光纤之间的耦合矩阵,其中 k_{ixjx} 为两光纤 x 偏振方向的模耦合系数; k_{ijy} 为两光纤 y 偏振方向的模耦合系数; k_{ixjy} 为一根光纤的 x 偏振方向与另一根光纤的 y 偏振方向的模耦合系数(它比同向耦合要弱得多,可认为相邻光纤之间的耦合矩阵 C_1 中该项为零,而单根光纤自身的模耦合矩阵 B 中该项不为零)。考虑全同光纤,令所有的 $k_{ixjx} = k_{xx}$, $k_{iyjy} = k_{yy}$, 假定 $k_{xx} = k_{yy} = k$ 。(4) 式变为

$$\frac{d}{dz} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{2x} \\ E_{2y} \\ E_{3x} \\ E_{3y} \end{bmatrix} (z) = i \begin{bmatrix} B_x & k_{xy} & k & 0 & 0 & 0 \\ k_{xy} & \beta_y & 0 & k & 0 & 0 \\ k & 0 & \beta_x & k_{xy} & k & 0 \\ 0 & k & k_{xy} & \beta_y & 0 & k \\ 0 & 0 & k & 0 & \beta_x & k_{xy} \\ 0 & 0 & 0 & k & k_{xy} & \beta_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \\ E_{2x} \\ E_{2y} \\ E_{3x} \\ E_{3y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由于光纤耦合器的耦合长度很短,可认为耦合系数在纵向上为常数。因此方程可以解出,若记 $\sqrt{2}k = \theta_1$, $\Delta\beta = \beta_x - \beta_y$, $\sqrt{\beta_x^2 - 2\beta_x\beta_y + \beta_y^2 + 4k^2} = \theta_2$, 则

$$(E_{1x} \ E_{1y} \ E_{2x} \ E_{2y} \ E_{3x} \ E_{3y})^T(z) = \mathbf{T}(E_{1x} \ E_{1y} \ E_{2x} \ E_{2y} \ E_{3x} \ E_{3y})^T(0) \quad (6)$$

$$\mathbf{T} = e^{i\frac{\beta_x + \beta_y}{2}L} \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \mathbf{T}_3 & \mathbf{T}_2 \\ \mathbf{T}_3 & \mathbf{T}_4 & \mathbf{T}_3 \\ \mathbf{T}_2 & \mathbf{T}_3 & \mathbf{T}_1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中

$$\begin{aligned}
 T_1 &= \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ a_2 & a_1^* \end{pmatrix} & T_2 &= \begin{pmatrix} b_1 & b_2 \\ b_2 & b_1^* \end{pmatrix} \\
 T_3 &= \begin{pmatrix} c_1 & c_2 \\ c_2 & -c_1^* \end{pmatrix} & T_4 &= \begin{pmatrix} d_1 & d_2 \\ d_2 & d_1^* \end{pmatrix} \quad (8)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{1}{2}(\cos\theta_1 L + 1) \left(\cos \frac{\theta_2 L}{2} + i \frac{\Delta\beta}{\theta_2} \sin \frac{\theta_2 L}{2} \right) \\
 a_2 &= \frac{ik_{xy}}{\theta_2} \sin \frac{\theta_2 L}{2} (\cos\theta_1 L + 1) \\
 b_1 &= \frac{1}{2}(\cos\theta_1 L - 1) \left(\cos \frac{\theta_2 L}{2} + i \frac{\Delta\beta}{\theta_2} \sin \frac{\theta_2 L}{2} \right) \\
 b_2 &= \frac{ik_{xy}}{\theta_2} \sin \frac{\theta_2 L}{2} (\cos\theta_1 L - 1) \\
 c_1 &= \frac{\sqrt{2}}{2} \sin\theta_1 L \left(-\frac{\Delta\beta}{\theta_2} \sin \frac{\theta_2 L}{2} + i \cos \frac{\theta_2 L}{2} \right) \\
 c_2 &= -\frac{\sqrt{2}k_{xy}}{\theta_2} \sin\theta_1 L \sin \frac{\theta_2 L}{2} \\
 d_1 &= \cos\theta_1 L \left(\cos \frac{\theta_2 L}{2} + i \frac{\Delta\beta}{\theta_2} \sin \frac{\theta_2 L}{2} \right) \\
 d_2 &= \frac{i2k_{xy}}{\theta_2} \cos\theta_1 L \sin \frac{\theta_2 L}{2}
 \end{aligned}$$

上面的传输矩阵可以用来分析耦合器输出偏振态的演化,例如考虑中间端输入 x 方向线偏振光时,输出光主要由从光纤 1 和 3 输出的耦合器。耦合器两侧输出光场分布用斯托克斯矢量表示为

$$\begin{cases}
 S_0 = \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1 L \\
 S_1 = \frac{1}{2} \sin^2 \theta_1 L \left(\frac{\Delta\beta^2 - 4k_{xy}^2}{\theta_2^2} \sin^2 \frac{\theta_2 L}{2} + \cos^2 \frac{\theta_2 L}{2} \right) \\
 S_2 = \frac{2\Delta\beta k_{xy}}{\theta_2^2} \sin^2 \theta_1 L \sin^2 \frac{\theta_2 L}{2} \\
 S_3 = \frac{2k_{xy}}{\theta_2} \sin^2 \theta_1 L \sin \frac{\theta_2 L}{2} \cos \frac{\theta_2 L}{2}
 \end{cases} \quad (9)$$

可以看出,相邻光纤间的耦合系数 $\theta_1 = \sqrt{2}k$ 只影响庞加莱球的半径,也就是输出功率的大小;而输出的偏振态完全取决于光纤自身的双折射 $\Delta\beta$ 和模耦合系数 k_{xy} 。普通单模光纤的拍长为 20 m 左右,根据拍长和传输常数差的关系式 $L = 2\pi/\Delta\beta, \Delta\beta$ 可取 0.314 m^{-1} 。偏振态的演化如图 2,图 3 庞加莱球所示,当 $2k_{xy}/\Delta\beta$ 在 0.1~5 之间变化时,偏振态从 (1, 0.003, 0.007) 演化到 (0.9154, 0.0169, 0.1560),可以看出,偏振态的演化是比较小的;保偏光纤的拍长可以做得比较小(取 2 cm),而且它的 k_{xy} 几乎为零。从(9)式看出, S_2, S_3 趋于零,表明 x 方向线偏振光通过耦合器之后偏振态几乎不变。由此可以得出,

将光引入和引出耦合器的那段光纤引线对光偏振态的演化起主要作用,而耦合区对其影响则比较小。因此,当使用普通光纤制造的耦合器时,要获得好的偏振特性,一定要把耦合器的光纤引线处理好。

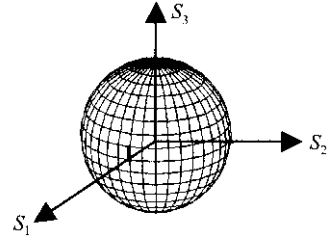


图 2 庞加莱球表示偏振态的演化

Fig. 2 Evolution of state of polarization in Poincaré sphere

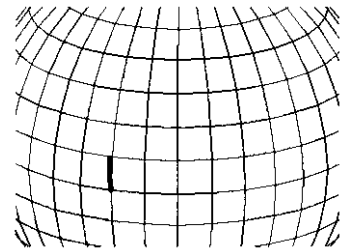


图 3 放大的庞加莱球

Fig. 3 Poincaré sphere amplified

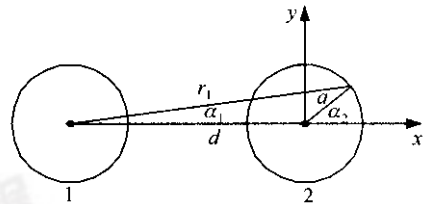


图 4 计算耦合系数

Fig. 4 Computing coupling coefficient

2.3 耦合系数随波长的变化

根据模耦合系数公式^[1]

$$k_{2x1x} = \frac{-i \int (\mathbf{e}_{2x} \times \mathbf{h}_{1x}^* - \mathbf{h}_{2x} \times \mathbf{e}_{1x}^*) \cdot d\mathbf{l}}{\iint_{-\infty}^{\infty} (\mathbf{e}_2 \times \mathbf{h}_2^* - \mathbf{h}_2 \times \mathbf{e}_2^*) \cdot d\mathbf{A}} \quad (10)$$

单模光纤中沿 x 方向偏振的基模场分布为^[1]

$$\begin{aligned}
 e_x &= AG_0(r) & e_y &= 0 \\
 e_z &= -i \frac{\sqrt{2\Delta}}{V} AG_1(r) \sin\theta \\
 h_x &= 0 & h_y &= -n \sqrt{\frac{\epsilon_0}{u_0}} AG_0(r) \\
 h_z &= -i \frac{\sqrt{2\Delta}}{V} n \sqrt{\frac{\epsilon_0}{u_0}} AG_1(r) \cos\theta
 \end{aligned}$$

$$G_0(r) = \begin{cases} \frac{J_0(Ur/a)}{J_0(U)} & r < a \\ \frac{K_0(Wr/a)}{K_0(W)} & r > a \end{cases}$$

$$G_1(r) = \begin{cases} \frac{UJ_1(Ur/a)}{J_0(U)} & r < a \\ \frac{WK_1(Wr/a)}{K_0(W)} & r > a \end{cases} \quad (11)$$

其中 V 为归一化频率, U, W 为在芯层和包层归一化的横向参数, 也称为该模式在芯层和包层的模式参量。可由下式计算

$$V = ak_0 \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = ak_0 n_1 \sqrt{2\Delta}$$

$$U \tan U = W$$

$$U^2 + W^2 = V^2 \quad (12)$$

n_1, n_2, a, k_0 分别为包层折射率、芯层折射率、芯层半径、真空中的波数。

许多文献对基模的 $U = f(V)$ 曲线进行了详细的研究, 得出了一些近似公式。在 $1.500 \sim 1.575 \mu\text{m}$ 波段范围, 可以采用一阶近似

$$W \approx 1.1428V - 0.9960 \quad W \in [1.5, 2.4]$$

$$\delta < 10^{-3} \quad (13)$$

将(11)~(13)式所示模场分布代入(10)式, 经过复杂计算, 耦合系数可写为

$$k_{2x1x} = \frac{a \frac{\sqrt{2\Delta}^2 \pi}{V} \int_0^W \frac{K_1(Wr_1/a)}{K_0(W)} \frac{d\cos\alpha_2 + a}{r_1} d\alpha_2}{4\pi \left[\int_0^{4.1} \frac{J_0^2(Ur/a)}{J_0^2(U)} r dr + \int_{4.1}^{62.5} \frac{K_0^2(Wr/a)}{K_0^2(W)} r dr \right]} \quad (14)$$

那么中间端输入光情况下的输出功率(3)式变为

$$P_1 = P_3 = \frac{1}{2} \sin^2 \sqrt{2} k_{2x1x} z \quad P_2 = \cos^2 \sqrt{2} k_{2x1x} z \quad (15)$$

由此可以计算出耦合系数随波长的变化。

3 结果与讨论

参照(15)式, 耦合区长度 z 取 26.4 mm , n_1, n_2, a 分别取 $1.4621, 1.4571, 4.1 \mu\text{m}$, 对应不同的芯间距 d ($10 \sim 25 \mu\text{m}$) 值, 可得一组 $P-\lambda$ 关系曲线。结果表明, 芯间距超过 $20 \mu\text{m}$ 以后, 随着光波长在 $1.500 \sim 1.575 \mu\text{m}$ 之间变化, 输出功率几乎全部从中间光纤 2 输出, 如图 5 所示。这是由于 G. 652 单模光纤的模场直径为 $9 \sim 10 \mu\text{m}$, 于是芯间距超过 $20 \mu\text{m}$ 以后, 光纤间的耦合就已经很弱了, 也就是耦合系数相变为零。根据(15)式, P_2 趋于 1, P_1 则趋于 0。

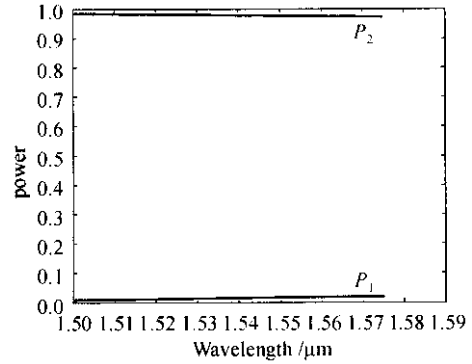


图 5 $d = 22 \mu\text{m}$ 对应的功率与波长曲线

Fig. 5 Output of three fibers versus wavelength when d is $22 \mu\text{m}$

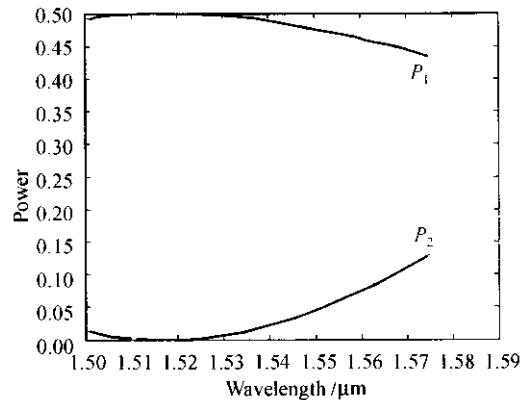


图 6 $d = 12.5 \mu\text{m}$ 对应的功率与波长曲线

Fig. 6 Power versus wavelength when d is $12.5 \mu\text{m}$

芯间距 $d = 12.5 \mu\text{m}$ 时, 大部分功率由光纤 1 和 3 等值输出, 只有很小一部分功率由中间光纤 2 输出, 如图 6 所示, 可以看出, 波长从 $1.5 \mu\text{m}$ 开始增加时, 耦合器输出功率 P_1 增加, P_2 减小; 当波长增加到 $1.53 \mu\text{m}$ 附近, P_1 减小, P_2 增加, 不过变化都很缓慢。表明耦合器能够在 $1.500 \sim 1.575 \mu\text{m}$ 带宽范围内保持比较稳定的分光比。

由于 3×3 耦合器的制作对实验过程要求非常严格, 没有现成的经验, 需要多次摸索。我们和航天科技集团上海 803 所光纤中心共同研制成功了平行排列 3×3 单模光纤耦合器。耦合器的制作采用熔融拉锥法, 拉伸速度为 $120 \mu\text{m/s}$, 拉伸时间为 170 s 。整个拉伸过程中始终从中间端输入光, 监测 3 个输出端功率的分配情况, 当监测到中间端的输出值很小时, 而两侧输出近似均为输入功率的一半, 停止拉伸。

图 7 为耦合器的输出性能的测试曲线。方法为: 使用一个可调激光源从中间端输入光功率为 1

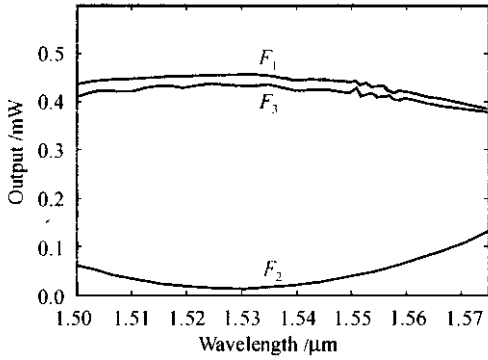


图 7 实验测得的功率与波长曲线

Fig. 7 Output of three fibers versus wavelength obtained from experiment

mW 的光,用光探测器监测光波长,光波长在 1.500~1.575 μm 范围内变化时,测耦合器的输出分光比。可以看出,在监测波段,耦合器中间端口输出功率非常的小,大部分功率由光纤 1 和 3 平分输出(曲线上有一些微小起伏,这是由耦合区的三根光纤的微小差别引起的),而且分光比对波长的变化是不敏感的,起伏最大从 43:7.5:40 变化到 45:0.2:43 (output1:output2:output3),理论和实验曲线基本一致。

研制过程中,曾将耦合器从横断面上切开,在显

显微镜下观察,实际的芯间距约为芯半径的 4~5 倍。由于实际的耦合区呈锥体分布,而我们的分析近似认为是圆柱模型,而且观察的芯间距也不是最细处的值,所以实际的芯间距与理论的芯间距存在一定的差别。

参 考 文 献

- 1 Wu Chongqing. The Theory of Optic Waveguide [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2000. 142~149
吴重庆. 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社, 2000. 142~149
- 2 Yao Shouquan, Wang Yong, Lu Shanda. Analysis of coupling power for fused-biconical linear format 3×3 single mode optical fiber directional coupler [J]. Acta Optica Sinica, 1990, 10(11): 1040~1046
- 姚寿铨,王 勇,陆善达. 熔锥直线型 3×3 单模光纤定向耦合器的光功率耦合分析[J]. 光学学报, 1990, 10(11):1040~1046
- 3 A. W. Snyder. Coupled-mode theory for optical fibers [J]. J. Opt. Soc. Am., 1972, 62(11):1267~1277
- 4 S. K. Sheem. Optical fiber interferometer with [3×3] directional couplers: analysis [J]. J. Appl. Phys., 1981, 52(6):3865~3872
- 5 Sun Liping, Ye Peida. General analysis of [3×3] optical fiber directional couplers [J]. Microwave Opt. Technol. Lett., 1989, 2(2):52~54
- 6 T. L. Xie. Fused 3×3 single-mode fiber optic couplers for fiber interferometric sensors and coherent communications [C]. ECTC 1991, 46~49
- 7 Y.-H. Ja. A single-mode optical fiber ring resonator using a planar 3×3 fiber coupler and a sagnac loop [J]. J. Lightwave Technol., 1994, 12(8):1348~1354

《光学手册》简介

顾问 龚祖同 主编 李景镇

陕西科学技术出版社 16 开 1541 页 定价:100.00 元

本手册是我国编写的第一本基础性大型光学手册。全书有 2700 多个公式,1400 余幅插图和 400 多个数据表格,230 万字。手册包括 25 个光学分科,如量子光学、非线性光学、信息光学、纤维光学和变折射率光学、集成光学、统计光学、成像光学、薄膜光学、光谱学、大气光学、海洋光学、色度学、视觉光学、高速摄影和光子学、光学材料、光学元器件、光学仪器仪表、光电探测器、光学测量仪器等;5 个附录,2 个索引。资料丰富,表达方式详略得当,是“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”(引自王大珩院士为本书的题词)。能使读者在较短时间内全面了解某门光学分科的主要内容,查阅公式、数据省时省力。

手册由 20 多位光学专家编撰完成,在编写过程中得到了龚祖同、王大珩、侯洵、薛鸣球等著名光学专家的指导和帮助,保证了该手册的编写质量和权威性。

如需购买,请与光学期刊联合编辑部葛晓红联系。

电话:021-69918428,021-69918011,请从邮局汇款
地址:上海 800-211 信箱,光学期刊联合编辑部
邮编:201800