

用两级方向耦合器组成的光纤反射器

庞 勇 蒋佩璇 徐大雄

(北京邮电大学无线电工程系, 北京 100088)

摘 要 提出了用级联方向耦合器组成光纤反射器的设想, 给出了其基本结构形式, 推导了各种结构的光场量和强度的反射和传输系数, 并对其特性进行了分析和比较。

关键词 光纤通信, 方向耦合器, 光纤反射器。

1 引 言

光纤激光器一直是人们感兴趣的研究课题, 其谐振腔结构在近年来得到了广泛的研究^[1, 2]。为了系统简化和应用的方便, 全光纤型的光纤激光器越来越受到人们的重视, 此类新型激光器利用光纤反射器^[3]、光纤环形腔^[4]以及光纤光栅^[5]等光反馈器件组成高精细度的谐振腔, 从而实现高性能(高效率、窄线宽、单纵模)的激光输出。

利用单个方向耦合器制成的光纤反射器已在光纤激光器系统中应用^[3, 6], 本文提出由两个方向耦合器组成的级联光纤反射器, 对其基本结构的反射和传输特性进行了理论分析和讨论, 并对这两种结构的光纤反射器的特性作了比较。

2 结构描述

两个方向耦合器组合成的光纤反射器有四端口联接和双端口联接的两种基本结构形式。四端口结构又可以分为结构 I 和结构 II 两种联接方式, 分别示于图 1 和图 2 中; 双端口结构示于图 3。

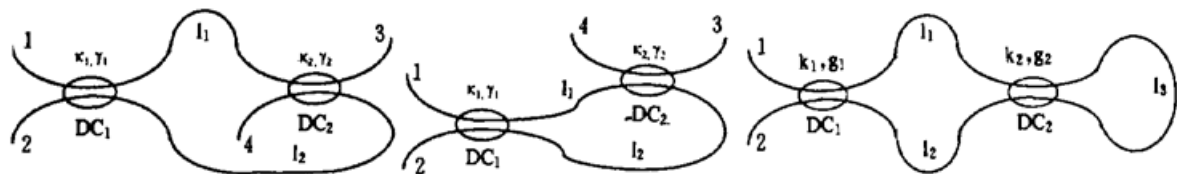


Fig. 1 Configuration I of four-port all-fiber reflector Fig. 2 Configuration II of four-port all-fiber reflector Fig. 3 Configuration of dual-port all-fiber reflector

图中, DC₁ 和 DC₂ 分别表示第一级和第二级方向耦合器, 其强度耦合系数及耦合损耗分别用 κ_1, γ_1 和 κ_2, γ_2 表示; l_1, l_2 和 l_3 分别表示对应的光纤长度; 数字 1、2、3 和 4 为端口编号。

对于四端口结构而言, 由于端口 3 和 4 的输入光不存在反射, 所以本文将不考虑该两端口输入的情况。

因为方向耦合器的对称特性, 只要作一个简单的变换(即 $1 \leftrightarrow 2$ 及 $3 \leftrightarrow 4$), 则上述三种结构中, 端口 1 和端口 2 输入的结果都是等价的, 因此, 本文将只讨论端口 1 输入的情况。

3 特性分析

方向耦合器发生横向耦合时会引起 $\pi/2$ 的相位延迟^[7, 8], 而仅从光强度方面考虑是无法描述这一相位延迟的, 所以有必要从场量(电场)的反射和传输开始讨论。假设随光纤坐标 z 和时间 t 变化的复电场 $E(z, t)$ 可以用下式表示:

$$E(z, t) = E_0 \exp [(-\alpha + j\beta)z - j\omega t], \quad (1)$$

式中 α 、 β 、 ω 分别为光纤损耗系数、传播常数和角频率, E_0 为与 (z, t) 无关的常数(即无强度调制)。光强度 $I(z)$ 可以表示为:

$$I(z) \propto |E(z, t)|^2 \quad (2)$$

本节将对上述三种结构的光纤反射器分别进行讨论, 分析其场量(振幅)及强度(功率)的反射和传输特性。在下面的讨论中, 将用 r_1 和 R_1 分别表示端口 1 的场量和强度反射系数, t_i 和 T_i ($i = 2, 3, 4$) 分别表示对应端口的场量和强度传输系数。

3.1 四端口结构特性分析

四端口光纤反射器的两种结构分别如图 1、图 2 所示。对于结构 I, 通过类似于文献[3]中的推导, 可以得到场量的反射和传输系数为:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= -2\kappa_1^{1/2}(1-\kappa_1)^{1/2}\kappa_2^{1/2}(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)^{1/2} \exp [(-\alpha + j\beta)(l_1 + l_2)], \\ t_2 &= j(1-2\kappa_1)\kappa_2^{1/2}(1-\gamma_1)(1-\gamma_2)^{1/2} \exp [(-\alpha + j\beta)(l_1 + l_2)], \\ t_3 &= (1-\kappa_1)^{1/2}(1-\kappa_2)^{1/2}(1-\gamma_1)^{1/2}(1-\gamma_2)^{1/2} \exp [(-\alpha + j\beta)l_1], \\ t_4 &= j\kappa_1^{1/2}(1-\kappa_2)^{1/2}(1-\gamma_1)^{1/2}(1-\gamma_2)^{1/2} \exp [(-\alpha + j\beta)l_2]. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

根据(2)式, 可以得到强度的反射和传输系数:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 4\kappa_1(1-\kappa_1)\kappa_2(1-\gamma_1)^2(1-\gamma_2) \exp [-2\alpha(l_1 + l_2)], \\ T_2 &= (1-2\kappa_1)^2\kappa_2(1-\gamma_1)^2(1-\gamma_2) \exp [-2\alpha(l_1 + l_2)], \\ T_3 &= (1-\kappa_1)(1-\kappa_2)(1-\gamma_1)^2(1-\gamma_2) \exp (-2\alpha l_1), \\ T_4 &= \kappa_1(1-\kappa_2)(1-\gamma_1)^2(1-\gamma_2) \exp (-2\alpha l_2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

对于结构 II, 其与结构 I 的差别在于由 DC_2 引起的相位变化不同。对(3)式进行如下变换:

$$\left. \begin{aligned} (1-\kappa_2)^{1/2} &\Rightarrow j\kappa_2^{1/2}, \\ \kappa_2^{1/2} &\Rightarrow -j(1-\kappa_2)^{1/2}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

即可得到结构 II 的对应场量的反射和传输系数。对(4)式作如下变换:

$$\left. \begin{aligned} 1-\kappa_2 &\Rightarrow \kappa_2, \\ \kappa_2 &\Rightarrow 1-\kappa_2. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

则可得到结构 II 的对应强度的反射和传输系数。可以看出, 虽然在场量的相位上存在差别, 但这两种结构在强度的反射和传输上具有类似特性, 这一点通过比较图 4 和图 5 可以更加清楚地了解。

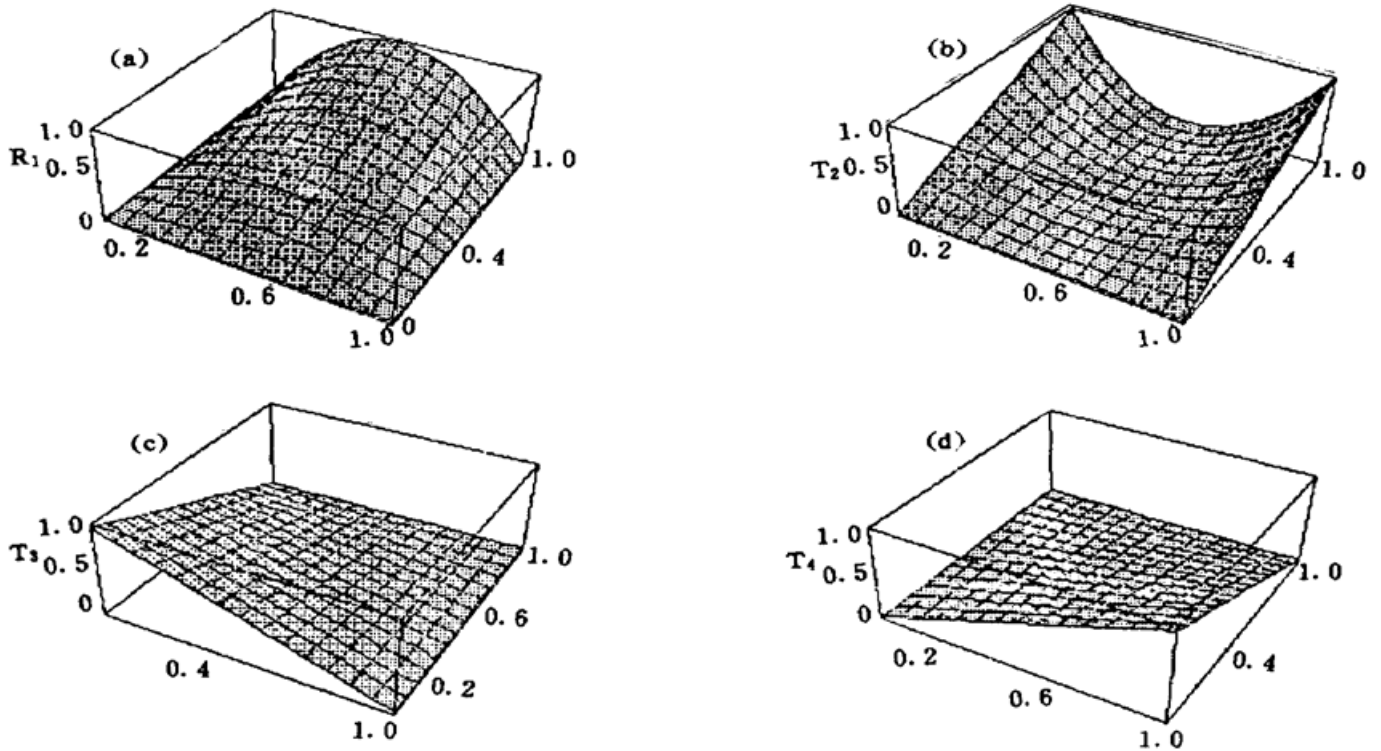


Fig. 4 Reflectivity and transmissivity of four-port all-fiber reflector II

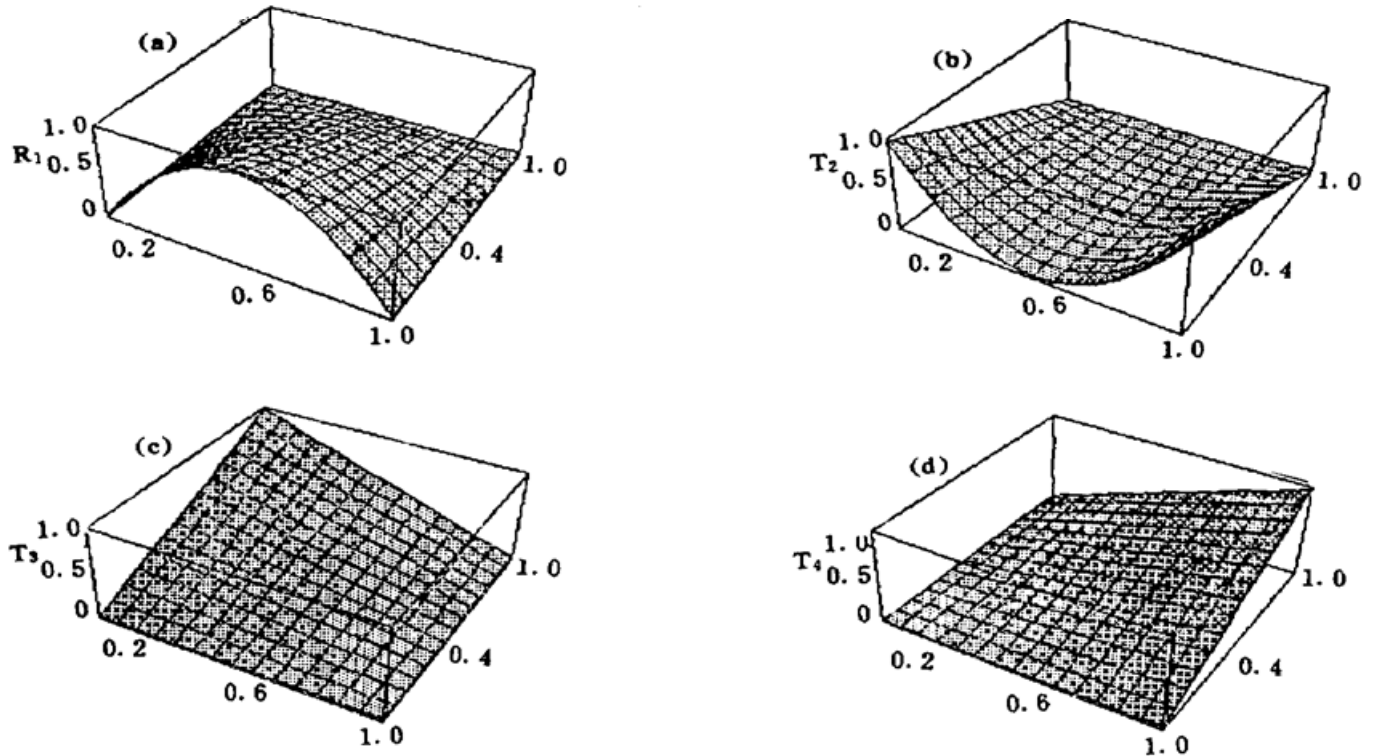


Fig. 5 Reflectivity and transmissivity of four-port all-fiber reflector I

图 4 和图 5 分别为结构 I 和结构 II 型四端口光纤反射器的强度反射和传输特性, 其中 (a) 为端口 1 的反射特性, (b)、(c) 和 (d) 分别为端口 2、3 和 4 的传输特性。为了直观, 计算时忽略了耦合器和光纤的损耗(该损耗使最大反射或传输系数小于 1)。

从图 4 和图 5 可以看出, 结构 I 和结构 II 的反射和传输特性随 k_2 的变化具有相反的趋势, 这种关系正是由 (6) 式决定的, 但就强度的反射和传输基本特性而言, 这两种结构实际上还是相同的, 其本质差别在于它们对场量引起的相位变化不同。显而易见, 四端口结构的强

度反射和传输特性与 κ_2 有线性关系, 端口 1 的反射及端口 2 的传输特性与 κ_1 成抛物线关系, 而端口 3 和 4 的传输特性与 κ_1 也有线性关系。另外, 由图可以得知, 四端口反射器的最大反射系数可以通过 κ_2 调节。

3.2 双端口结构特性分析

双端口光纤反射器结构如图 3 所示。

由于 $l_1 \neq l_2$ 时的结果非常复杂(见附录), 并且将出现与 β 相关的项, 本文暂不考虑。本节中只讨论 $l_1 = l_2 = l$ 的情况。其场量反射和传输系数为:

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= 2j[(1 - 2\kappa_1)\kappa_2^{1/2}(1 - \kappa_2)^{1/2} + \kappa_1^{1/2}(1 - \kappa_1)^{1/2}(1 - 2\kappa_2)](1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2) \\ &\quad \times \exp[(-\alpha + j\beta)(2l + l_3)] \\ t_2 &= [(1 - 2\kappa_1)(1 - 2\kappa_2) - 4\kappa_1^{1/2}(1 - \kappa_1)^{1/2}\kappa_2^{1/2}(1 - \kappa_2)^{1/2}](1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2) \\ &\quad \times \exp[(-\alpha + j\beta)(2l + l_3)] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

强度反射和传输系数为:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= 4[\kappa_1^{1/2}(1 - \kappa_1)^{1/2}(1 - 2\kappa_2) + (1 - 2\kappa_1)\kappa_2^{1/2}(1 - \kappa_2)^{1/2}]^2(1 - \gamma_1)^2(1 - \gamma_2)^2 \\ &\quad \times \exp[-2\alpha(2l + l_3)], \\ T_2 &= [(1 - 2\kappa_1)(1 - 2\kappa_2) - 4\kappa_1^{1/2}(1 - \kappa_1)^{1/2}\kappa_2^{1/2}(1 - \kappa_2)^{1/2}]^2(1 - \gamma_1)^2(1 - \gamma_2)^2 \\ &\quad \times \exp[-2\alpha(2l + l_3)]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

由上述表达式可以看出双端口结构光纤反射器的两个方向耦合器之间的对称关系。

双端口结构的光纤反射器的强度反射和传输特性如图 6 所示, 其中(a)为端口 1 的反射系数, (b)为端口 2 的传输系数。为了直观, 计算时忽略了耦合器和光纤的损耗。

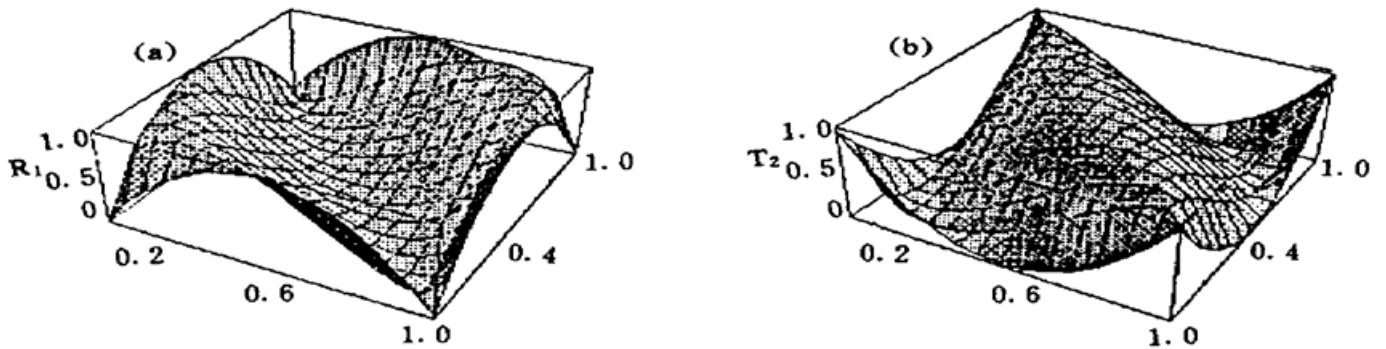


Fig. 6 Reflectivity and transmissivity of dual-port all-fiber reflector

从图 6 可知, 双端口光纤反射器的特点是当耦合器的耦合系数较大或较小也能够得到强度反射或传输系数的最大值, 而一般情况下则要求某一耦合器的耦合系数为 50%。通过适当选择两个耦合器的耦合系数, 双端口光纤反射器也容易获得反射和传输特性完全相反的器件。

3.3 耦合器和光纤损耗的影响

为了直观和简化, 上面的讨论中忽略了耦合器和光纤损耗对上述反射器的强度反射和传输特性的影响, 本节对此作进一步的研究。从(4)式和(8)式可以看出, 损耗的影响表现在降低了反射器所能达到的最大反射或传输系数, 即乘上一个小于 1 的因子 χ 。根据现有水平, 耦合器的插入损耗能够做到小于 0.15 dB(相当于 $\gamma_1 = \gamma_2 \leq 0.035$), 而单模光纤损耗一般小于 0.3 dB/km(相当于 $\alpha \leq 6.9 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$), 如果取 $l_1 = l_2 = l_3 = 1 \text{ m}$, 并令 $\gamma_1 = \gamma_2$, 则对于四端口反射器有 $0.9 \leq \chi < 1$, 而对于双端口反射器有 $0.87 \leq \chi < 1$, 可见损耗对双端口反射器

的影响略大于对四端口反射器的影响。光纤损耗与耦合器的插入损耗相比可以忽略, 所以损耗影响主要取决于耦合器的插入损耗。

结 论 本文分析了用两个方向耦合器组成的四端口结构和双端口结构的光纤反射器的特性, 它们都是从单个方向耦合器制成的光纤反射器发展而来的, 当两个方向耦合器的耦合系数取适当值时, 两种结构的光纤反射器都可以获得与单耦合器器件相同的强度反射和传输特性。

这两种光纤反射器又有着其各自的特点, 四端口光纤反射器由于其特性与 DC_2 的耦合系数有着线性关系, 使得此类反射器的反射和传输特性更加便于控制, 提高了器件应用的灵活性; 双端口光纤反射器则因为其特性关于两个方向耦合器的对称性, 为获得具有特殊性能的器件提供了方便。

上述器件在光纤激光器和光纤滤波器方面都有实用意义。

参 考 文 献

- [1] P. Urquhart, Transversely coupled fiber Fabry-Perot resonator: theory. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(3) : 456~ 463
- [2] P. Barnsley, P. Urquhart, C. Millar *et al.*, Fiber Fox-Smith resonators: application to single-longitudinal-mode operation of fiber lasers. *J. Opt. Soc. Am. (A)*, 1988, **5**(8) : 1339~ 1346
- [3] I. D. Miller, D. B. Mortimore, P. Urquhart *et al.*, Nd^{3+} -doped cw fiber laser using all-fiber reflectors. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(11) : 2197~ 2201
- [4] L. F. Stokes, M. Chodorow, H. J. Shaw, All-single-mode fiber resonator. *Opt. Lett.*, 1982, **7**(6) : 288~ 290
- [5] J. T. Kringelbotn, J.-L. Archambault, L. Reekie *et al.*, Efficient low-noise grating-feedback fiber laser doped with $Er^{3+} \cdot Yb^{3+}$. *Conference on Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, Optical Society of America, Washington, D. C., 1994, **4** : 26~ 27
- [6] E. M. Dianov, T. R. Martirosian, O. G. Okhotnikov *et al.*, Diode-pumped drive-current-controlled mode-locked fiber laser. *Conference on Optical Fiber Communication/International Conference on Integrated Optics and Optical Fiber Communication, Technical Digest Series*, Optical Society of America, Washington, D. C., 1993, **4** : 236~ 237
- [7] A. B. Buckman, *Guided-Wave Photonics*, Ch. 5, Saunders College Publishing, 1992, 149~ 190
- [8] N. Kashima, *Passive Optical Components for Optical Fiber Transmission*. Ch. 10, Artech House, 1995, 225~ 252

附 录

本节给出当 $l_1 \neq l_2$ 时, 双端口光纤反射器场量及强度的反射和传输系数表达式, 式中符号说明如第 2 节和第 3 节中所述。

场量的反射和传输系数分别表示如下:

$$\begin{aligned}
 r &= 2j(1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2) \exp [(-\alpha + j\beta)l_3] \\
 &\times \left[\begin{aligned} &(1 - \kappa_1)\kappa_2^{1/2}(1 - \kappa_2)^{1/2} \exp [(-\alpha + j\beta)(2l_1)] \\ &- \kappa_1\kappa_2^{1/2}(1 - \kappa_2)^{1/2} \exp [(-\alpha + j\beta)(2l_2)] \\ &+ \kappa_1^{1/2}(1 - \kappa_1)^{1/2}(1 - 2\kappa_2) \exp [(-\alpha + j\beta)(l_1 + l_2)] \end{aligned} \right], \quad (A1) \\
 t &= (1 - \gamma_1)(1 - \gamma_2) \exp [(-\alpha + j\beta)l_3]
 \end{aligned}$$

$$\times \begin{bmatrix} -2\kappa_1^{3/2}(1-\kappa_1)^{3/2}\kappa_2^{3/2}(1-\kappa_2)^{3/2}\exp [(-\alpha+j\beta)(2l_1)] \\ -2\kappa_1^{3/2}(1-\kappa_1)^{3/2}\kappa_2^{3/2}(1-\kappa_2)^{3/2}\exp [(-\alpha+j\beta)(2l_2)] \\ + (1-2\kappa_1)(1-2\kappa_2)\exp [(-\alpha+j\beta)(l_1+l_2)] \end{bmatrix}, \quad (\text{A2})$$

强度的反射和传输系数分别表示如下:

$$R = 4(1-\gamma_1)^2(1-\gamma_2)^2\exp(-2\alpha l_3) \times \begin{bmatrix} (1-\kappa_1)^2\kappa_2(1-\kappa_2)\exp(-4\alpha l_1) \\ + \kappa_1^2\kappa_2(1-\kappa_2)\exp(-4\alpha l_2) \\ + \kappa_1(1-\kappa_1)(1-2\kappa_2)^2\exp(-2\alpha(l_1+l_2)) \\ + 2\kappa_1^{3/2}(1-\kappa_1)^{3/2}\kappa_2^{3/2}(1-\kappa_2)^{3/2}\exp[-\alpha(3l_1+l_2)]\cos[\beta(l_1-l_2)] \\ - 2\kappa_1^{3/2}(1-\kappa_1)^{3/2}\kappa_2^{3/2}(1-\kappa_2)\exp[-\alpha(l_1+3l_2)]\cos[\beta(l_1-l_2)] \\ - 2\kappa_1(1-\kappa_1)\kappa_2(1-\kappa_2)\exp[-2\alpha(l_1+l_2)]\cos[2\beta(l_1-l_2)] \end{bmatrix} \quad (\text{A3})$$

$$T = (1-\gamma_1)^2(1-\gamma_2)^2\exp(-2\alpha l_3) \times \begin{bmatrix} 4\kappa_1(1-\kappa_1)\kappa_2(1-\kappa_2)\exp(-4\alpha l_1) \\ + 4\kappa_1(1-\kappa_1)\kappa_2(1-\kappa_2)\exp(-4\alpha l_2) \\ + (1-2\kappa_1)^2(1-2\kappa_2)^2\exp[-2\alpha(l_1+l_2)] \\ - 4\kappa_1^{3/2}(1-\kappa_1)^{3/2}(1-2\kappa_1)\kappa_2^{3/2}(1-\kappa_2)^{3/2}(1-2\kappa_2)\exp[-\alpha(3l_1+l_2)]\cos[\beta(l_1-l_2)] \\ - 4\kappa_1^{3/2}(1-\kappa_1)^{3/2}(1-2\kappa_1)\kappa_2^{3/2}(1-\kappa_2)^{3/2}(1-2\kappa_2)\exp[-\alpha(l_1+3l_2)]\cos[\beta(l_1-l_2)] \\ + 8\kappa_1(1-\kappa_1)\kappa_2(1-\kappa_2)\exp[-2\alpha(l_1+l_2)]\cos[2\beta(l_1-l_2)] \end{bmatrix} \quad (\text{A4})$$

从以上表达式可以看出,图3所示的双端口结构还具有干涉仪的特性,为了简化讨论,本文将不研究这种特性。

All-Fiber Reflectors Using Two-Stage Directional Couplers

Pang Yong Jiang Peixuan Xu Daxiong

(Department of Radio Engineering, Beijing University of Posts & Telecommunications, Beijing 100088)

(Received 14 April 1996; revised 3 June 1996)

Abstract All-fiber reflectors using two-stage directional couplers are proposed. The reflectivity and transmissivity of both optical field and intensity are derived. And the characteristics of such reflectors are analyzed and compared for each basic reflector configuration.

Key words optical fiber communication, directional coupler, fiber reflector.