

耦合光纤环形腔干涉仪列阵

王 安 谢海明 李晓风 朱延彬

(中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

刘 颂 豪

(华南师范大学物理系, 广州 510631)

提 要

本文首次提出耦合光纤环形腔干涉仪列阵, 并给出其耦合波方程和矩阵理论以描述其输出特性。分别计算了由2~4只单模光纤方向耦合器构成的耦合光纤环形腔干涉仪列阵的输出特性。结果表明, 适当地选择诸耦合器的参数, 耦合光纤环形腔干涉仪列阵优于单个光纤环形腔干涉仪的带通特性和更宽的光谱范围。

关键词: 光纤干涉仪列阵, 光纤滤波器

一、引 言

1982年 Stokes 等首次提出了光纤环形腔干涉仪^[1]。此后, 由于它在光纤传感和光纤激光器等方面的潜在应用, 使其成为一个活跃的研究课题^[2~6]。本文首次提出一系列光纤环形腔干涉仪构成的耦合光纤环形腔干涉仪列阵。这种新型的耦合光纤环形腔干涉仪列阵具有如下两方面的实际意义: (1) 与单个光纤环形腔干涉仪相比, 它有更宽的自由光谱区和高的光谱分辨率; (2) 采用掺杂光纤^[7]和耦合光纤环形腔干涉仪列阵结构可望研制出耦合腔光纤激光器。本文基于耦合模方程和矩阵方法给出了耦合光纤环形腔干涉仪列阵的理论分析, 并在此基础上计算了其输出特性。讨论了由两只、三只和四只耦合器构成的耦合光纤环形腔干涉仪列阵的特例, 推导了其透过率曲线无凹陷的条件。为了简单起见, 其分布中忽略了各种吸收和散射引起的损耗, 最后给出各种损耗影响的耦合模方程组。

二、理 论

图1表示 N 个光纤环形腔干涉仪通过超低损耗单模光纤方向耦合器结合在一起的耦合光纤环形腔干涉仪列阵结构, 由图1可以写出第 j 和第 $j+1$ 个光纤环形腔干涉仪中光场之间的关系^[2]:

$$E_j^b = t_j E_j^f + iK_j E_{j+1}^b \exp(i\beta l_j/2), \quad (1)$$

$$E_{j+1}^f = iK_j E_j^f \exp(i\beta l_j/2) + t_j E_{j+1}^b \exp(i\beta l_j), \quad (2)$$

式中第 j 只耦合器的场振幅耦合系数为 K_j , 透过系

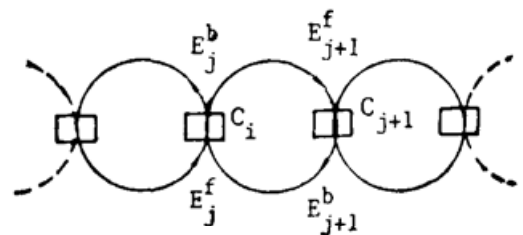


Fig. 1 Coupled fiber ring interferometer array

数为 t_j 。插入损耗记作 γ_j , $i^2 = -1$ 。设耦合器 O_j 与 O_{j+1} 之间的光纤长度 $l_j/2$ 皆相同, 光纤中光的传播常数 $\beta = 2\pi n/\lambda$, 相位 $\phi_j = \beta l_j/2$ 。把(1)、(2)式改写成矩阵形式, 并忽略耦合器插入损耗的影响得

$$\begin{bmatrix} E_j^f \\ E_j^b \end{bmatrix} = \frac{1}{iK_j} \begin{bmatrix} e^{-i\phi_j} & -t_j e^{i\phi_j} \\ t_j e^{-i\phi_j} & -e^{i\phi_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{j+1}^f \\ E_{j+1}^b \end{bmatrix} \quad (3)$$

逐次应用(3)式得

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} E_1^f \\ E_1^b \end{bmatrix} &= (i^{N-1} K_1 K_2 \cdots K_{N-1})^{-1} \begin{bmatrix} e^{-i\phi_1} & -t_1 e^{i\phi_1} \\ t_1 e^{-i\phi_1} & -e^{i\phi_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-i\phi_2} & -t_2 e^{i\phi_2} \\ t_2 e^{-i\phi_2} & -e^{i\phi_2} \end{bmatrix} \cdots \\ &\cdots \begin{bmatrix} e^{-i\phi_{N-1}} & -t_{N-1} e^{i\phi_{N-1}} \\ t_{N-1} e^{-i\phi_{N-1}} & -e^{i\phi_{N-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_N^f \\ E_N^b \end{bmatrix} \\ &= (i^{N-1} K_1 K_2 \cdots K_{N-1})^{-1} \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_N^f \\ E_N^b \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 A 、 B 、 C 、 D 为(4)式中积矩阵的元。由(4)式得由 N 只耦合器构成的耦合光纤环形腔干涉仪列阵(CFRIA)的场振幅透射系数

$$t = \frac{E_1^f \cdot iK_N}{E_1^b} = \frac{i^N K_1 K_2 \cdots K_N}{A + Bt_N} \quad (5)$$

三、由两只和三只耦合器构成的耦合光纤环形腔干涉仪列阵

1. 两只耦合器构成的列阵

$N=2$, 由(4)、(5)式得光强透过率为

$$T = tt^* = \frac{K_1^2 K_2^2}{1 + t_1^2 t_2^2 - 2t_1 t_2 \cos 2\phi_1} \quad (6)$$

2. 三只耦合器构成的列阵

$N=3$, 由(4)、(5)式得光强透过率为

$$\left. \begin{aligned} T = tt^* &= \frac{K_1^2 K_2^2 K_3^2}{D_3}, \\ D_3 &= 1 + (t_1 t_2)^2 + (t_2 t_3)^2 + (t_1 t_3)^2 - 2t_1 t_2 (1 + t_3^2) \cos 2\phi_1 - 2t_2 t_3 (1 + t_1^2) \cos 2\phi_2 \\ &\quad + 2t_1 t_3 \cos 2(\phi_1 + \phi_2) + 2t_1 t_2 t_3 \cos 2(\phi_1 - \phi_2), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

几个较简单的特例:

[特例 1] $K_1 = K_2 = K_3 = K$, $\phi_1 = \phi_2 = \phi$

则得

$$T = K^6 \{ K^6 + [2t \cos 2\phi - t(1+t^2)]^2 \}^{-1}, \quad (8)$$

当 $K^2=0.5$ 时, T 如图 2 所示。

[特例 2] $K_1 = K_3 \neq K_2$, $\phi_1 = \phi_2 = \phi$

则得

$$T = K_1^4 K_2^2 \{ K_1^4 K_2^2 + [t_2(1+t_1^2) - 2t_1 \cos 2\phi]^2 \}^{-1}, \quad (9)$$

中间一个耦合器耦合系数的大小表示两个光纤环形腔干涉仪之间耦合的强弱。由图 3 知, 当耦合增强时, 双峰间距增大; 反之, 当耦合变弱时, 双峰间距减小乃至出现无凹陷带通。

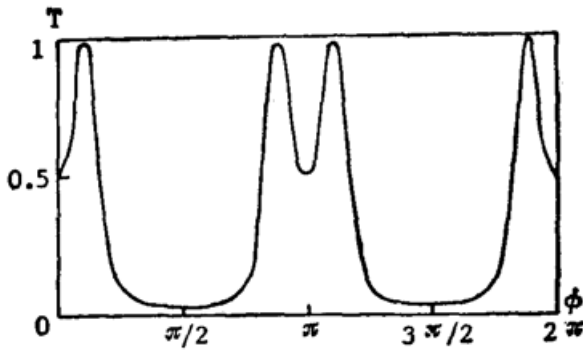


Fig. 2 The transmission of three-coupler CFRIA with $K_1=K_2=K_3=0.71$, $\phi_1=\phi_2=\phi$

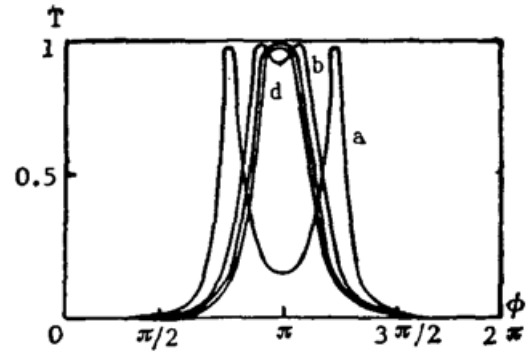


Fig. 3 The transmission of a three-coupler CFRIA for $K_2^2=0.5, 0.1, 0.03, 0.05$ corresponding to curve a, b, c, d

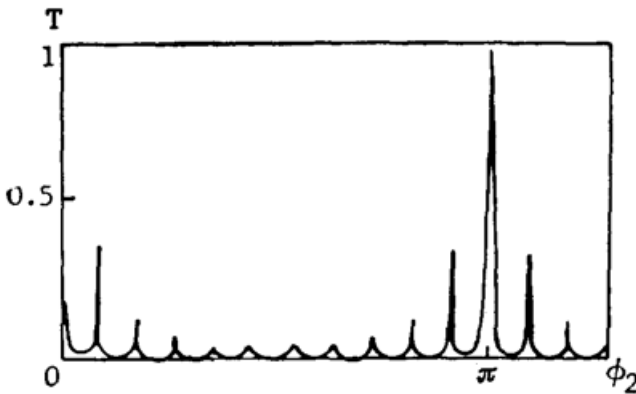


Fig. 4 The transmission of three-coupler CFRIA with $K_1^2=K_3^2=0.3, K_2^2=0.03, \phi_1/\phi_2=11$

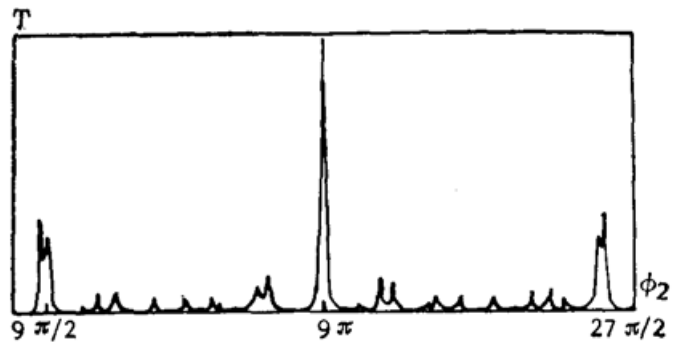


Fig. 5 The transmission of three-coupler CFRIA with $K_1^2=K_3^2=0.3, K_2^2=0.03, \phi_1/\phi_2=11/9$

[特例 3] $K_1=K_3 \neq K_2, \phi_1 \neq \phi_2$

则得

$$T = K_1^2 K_2^2 \{ 1 + 2(t_1 t_2)^2 + t_1^4 - 2t_1 t_2 (1 + t_1^2) [\cos 2\phi_1 + \cos 2\phi_2] + 2t_1^2 \cos 2(\phi_1 + \phi_2) + 2t_1^2 t_2^2 \cos 2(\phi_1 - \phi_2) \}, \quad (10)$$

当 $\cos 2\phi_1 = \cos 2\phi_2 = 1$ 时, 有最大透过率。由图 4 和图 5 知, 当 $\cos 2\phi_1$ 和 $\cos 2\phi_2$ 中只有一个为 1 时, T 有次极大, 当 $(\phi_1/\phi_2) = a > 1$ 时, 与单个光纤环形腔干涉仪相比, 耦合光纤环形腔干涉仪阵列的优点是在相同的分辨本领下光谱范围较大。当由于光纤长度或光源波长发生变化导致 ϕ_1, ϕ_2 变化时, 第一个光纤环形腔干涉仪干涉序改变 1, 则第二个光纤环形腔干涉仪干涉序改变 a 。因此, 从光谱的角度看, 各个主极大不发生交叠的光谱范围与腔长较短的光纤环形腔干涉仪相同, 而是腔长较长的光纤环形腔干涉仪的 a 倍。

[特例 4] $K_1 \neq K_2 \neq K_3, \phi_1 \neq \phi_2$

此时, 透过率由 (7) 式表示。由图 6 和图 3 可以看出, 对称地选择 K_1, K_3 对增大透过率有好处。图 7 中次极大较小, 当把 K_1, K_3 的值互换时, 次极大明显增大, 如图 8 所示。这说明可以通过适当地选择诸耦合器的参数来减小次极大, 从而改善耦合光纤环形腔干涉仪阵列的光谱范围。

3. 四只耦合器构成的阵列

$N=4$, 利用 (4)、(5) 式, 通过复杂的运算有:

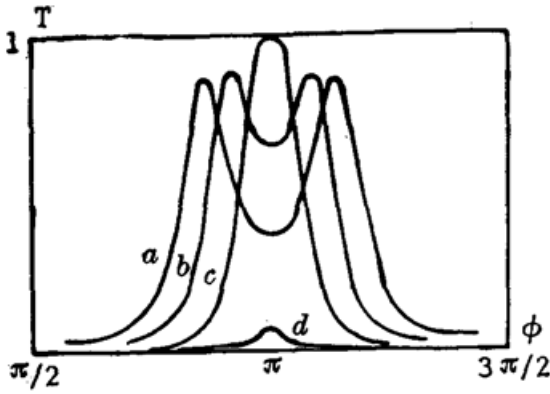


Fig. 6 The transmission of three-coupler CFRIA with $K_1^2=0.64, K_2^2=0.36, K_3^2=0.64, 0.36, 0.10, 0.02$ corresponding to a, b, c, d . $\phi_1=\phi_2=\phi$

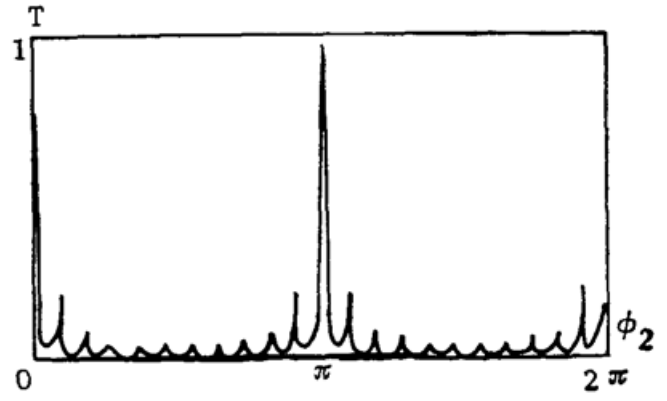


Fig. 7 The transmission of three-coupler CFRIA with $K_1^2=0.4, K_2^2=0.03, K_3^2=0.2, \phi_1/\phi_2=11$

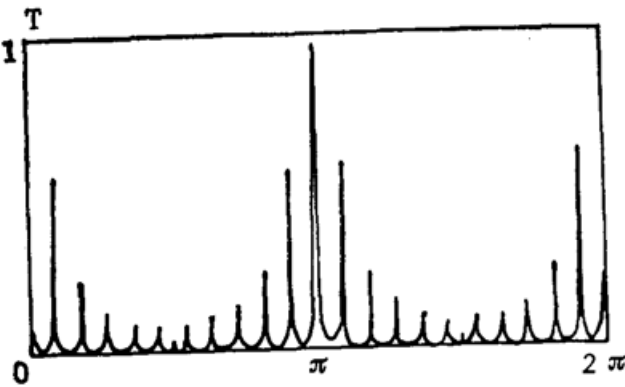


Fig. 8 The transmission of three-coupler CFRIA with $K_1^2=0.2, K_2^2=0.03, K_3^2=0.4, \phi_1/\phi_2=11$

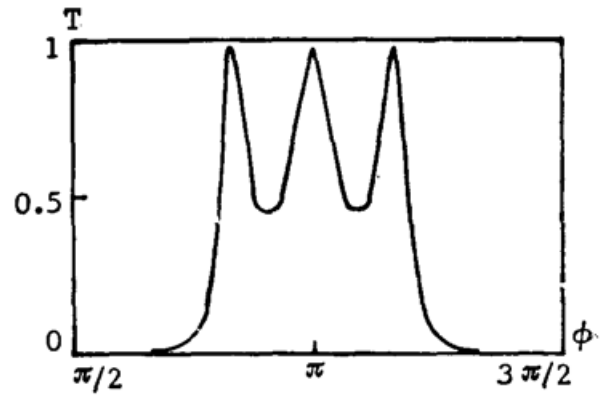


Fig. 9 Transmission of four-coupler CFRIA with $K_1^2=K_2^2=K_3^2=K_4^2=0.5, \phi_1=\phi_2=\phi_3=\phi$

$$T = tt^* = K_1^2 K_2^2 K_3^2 K_4^2 / D_4,$$

$$D_4 = 1 + (t_1 t_2)^2 + (t_2 t_3)^2 + (t_1 t_3)^2 + (t_3 t_4)^2 + (t_1 t_2 t_3 t_4)^2 + (t_2 t_4)^2 + (t_1 t_4)^2$$

$$- 2t_1 t_2 (1 + t_3^2 + t_1^2 + t_3^2 t_1^2) \cos 2\phi_1 - 2t_2 t_3 (1 + t_1^2 + t_4^2 + t_1^2 t_4^2) \cos 2\phi_2$$

$$- 2t_3 t_4 (1 + t_1^2 + t_2^2 + t_1^2 t_2^2) \cos 2\phi_3 + 2t_1 t_3 (1 + t_4^2) \cos 2(\phi_1 - \phi_2)$$

$$+ 4t_1 t_2 t_3 t_4 \cos 2(\phi_1 + \phi_3) + 2t_2 t_4 (1 + t_1^2) \cos 2(\phi_2 + \phi_3) + 2t_1 t_2^2 t_3 (1 + t_4^2)$$

$$\times \cos 2(\phi_1 - \phi_2) + 4t_1 t_2 t_3 t_4 \cos 2(\phi_1 - \phi_3) + 2t_2 t_3^2 t_4 (1 + t_1^2) \cos 2(\phi_2 - \phi_3)$$

$$- 2t_1 t_2^2 t_3 t_4 \cos 2(\phi_1 - \phi_2 + \phi_3) - 2t_1 t_2^2 t_4 \cos 2(\phi_1 - \phi_2 - \phi_3),$$

$$- 2t_1 t_3^2 t_4 \cos 2(\phi_1 + \phi_2 - \phi_3) - 2t_1 t_4 \cos 2(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3),$$
(11)

[特例 1] $K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K, \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi$

则得如图 9 所示, 可表为

$$T = K^8 [K^8 + 8t^2(1 - \cos 2\phi)(t^2 - \cos 2\phi)^2]^{-1}, \tag{12}$$

[特例 2] $K_1 = K_4 \neq K_2 = K_3, \phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi$

则得

$$T = [1 + 2t_1^2(1 - \cos 2\phi)(E - 2 \cos 2\phi - 1)^2 / K_1^4 K_2^4]^{-1},$$

$$E = (1 + t_1^2 + t_1 t_2) t_2 / t_1.$$
(13)

如前所述, 当腔之间的耦合变强时, 出现多峰结构, 随着这种耦合作用的减弱(K_2, K_3

减小), 耦合光纤环形腔干涉仪列阵的输出特性逐渐接近单个光纤环形腔干涉仪。

当 $\cos 2\phi = 1$ 或 $\cos 2\phi = (E-1)/2$ 时,

$$T_{\max} = 1. \quad (14)$$

当 $\cos 2\phi = (3+E)/6$ 时, T 有次极小

$$T_{\min 1} = [1 + 4t_1^2(3-E)^3 / 27K_1^4 K_2^4]^{-1}. \quad (15)$$

当 $t_1 = t_2$ 时, (13) 式化为 (12) 式。

四、耦合光纤环形腔干涉仪列阵带通无凹陷的条件

根据前面的分析, 构成耦合光纤环形腔干涉仪列阵的各环形腔之间的耦合作用的强弱决定列阵带通凹陷的深度。下面以两种情况为例, 推导耦合光纤环形腔干涉仪列阵带通无凹陷的条件。

1. 由三只耦合器构成的“列阵”

设 $K_1 = K_3 \neq K_2$, $\phi_1 = \phi_2 = \phi$, 由 (9) 式当 $\cos 2\phi = [t_2(1+t_1^2)/2t_1]$ 时,

$$T_{\max} = 1. \quad (16)$$

当 $\cos 2\phi = 1$ 时

$$T_{\min 1} = K_1^4 K_2^2 \{K_1^4 K_2^2 + [(t_2(1+t_1)^2 - 2t_1)^2]^{-1}, \quad (17)$$

当 $T_{\max} - T_{\min 1} = 0$ 时, 耦合光纤环形腔干涉仪列阵带通无凹陷, 则由 (16)、(17) 式得无凹陷条件为

$$t_2 = \frac{2t_1}{1+t_1^2}. \quad (18)$$

在此条件下,

$$T = \{1 + 16t_1^2 \sin^4 \phi / K_1^4 K_2^2\}^{-1}. \quad (19)$$

由于在分析中忽略了损耗, 故 $K_j^2 = 1 - t_j^2$ 。当选定了两边两只耦合器的参数之后, 只要使中间耦合器的参数满足 (18) 式, 则“列阵”的透过率曲线无凹陷。

2. 由四只耦合器构成的列阵

设 $K_1 = K_4 \neq K_2 = K_3$, $\phi_1 = \phi_2 = \phi_3 = \phi$ 。同理, 由 (14)、(15) 式得“列阵”带通无凹陷条件为

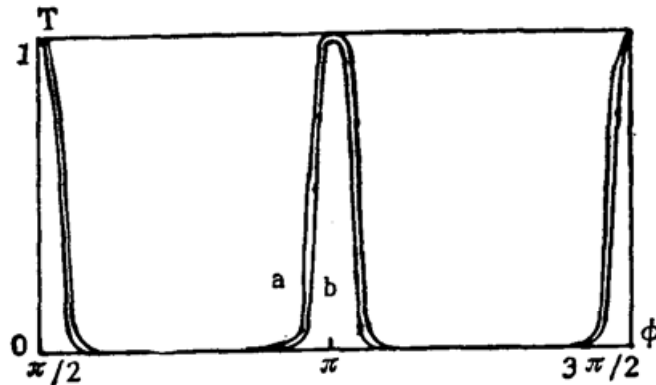


Fig. 10 Flat-top transmission of three-coupler (a), four-coupler (b) CFRIA

$$t_2 = \frac{1}{2t_1} [\sqrt{(1+t_1^2)^2 + 12t_1^2} - (1+t_1^2)], \quad (20)$$

$$T = [1 + 8t_1^2(1 - \cos 2\phi)^3 / K_1^2 K_2^2]^{-1}. \quad (21)$$

图 10 表示耦合光纤环形腔干涉仪列阵无凹陷的带通曲线。曲线 a 对应于三只耦合器构成的“列阵”， $K_1^2 = K_3^2 = 0.53$ ， K_2^2 由(18)式确定；曲线 b 对应于由四只耦合器构成的“列阵”， $K_1^2 = K_4^2 = 0.53$ ， $K_2^2 = K_3^2$ 的值由(20)式确定。

对于其他情况，用类似的方法总可求出构成无凹陷带通耦合光纤环形腔干涉仪列阵的诸耦合器参数应满足的要求。

五、考虑损耗时的耦合模方程组

在前面分析中，为了避免繁杂的计算，忽略了各种损耗的影响。这些损耗包括光纤损耗，耦合器的插入损耗和光纤接续损耗。现在给出考虑了各种损耗影响时，耦合光纤环形腔干涉仪列阵的耦合模方程组，并采用文献[1]，[3~5]中的符号记法，两种符号记法的不同仅在于耦合器插入损耗系数的涵义不同。设第 j 只耦合器 O_j 的光功率耦合系数为 K_j ，插入损耗系数 γ_j ，光功率透过系数为 $1 - K_j$ ，光纤损耗系数为 α ，接续损耗系数为 a_j ，则由图 1 得耦合模方程组

$$E_j^b = (1 - \gamma_j)^{1/2} [(1 - K_j)^{1/2} E_j^a + i K_j^{1/2} (1 - a_j)^{1/2} \exp\left(-\frac{\alpha l_j}{2} + i \frac{\beta l_j}{2}\right) E_j^a], \quad (22)$$

$$E_{j+1}^a = (1 - \gamma_j)^{1/2} \left[i K_j^{1/2} (1 - a_j)^{1/2} \exp\left(-\frac{\alpha l_j}{2} + i \frac{\beta l_j}{2}\right) E_j^a + (1 - K_j)^{1/2} (1 - a_j) \exp\left(-\frac{\alpha l_j}{2} + i \frac{\beta l_j}{2}\right) E_{j+1}^b \right]. \quad (23)$$

由耦合模方程组(22)、(23)式出发，仿第二节便可得到列阵的严格的理论分析。

六、结 论

本文首次提出了耦合光纤环形腔干涉仪列阵这种新型的光纤干涉仪结构，给出了计算其输出特性的耦合模方程和矩阵方法，并举一些特例说明。计算表明，适当地选择构成“列阵”的各单模光纤方向耦合器的参数，可以得到不同特性的透过率曲线，从而满足不同的光谱分析和滤波要求，推导了“列阵”带通无凹陷的条件。最后给出了考虑各种损耗影响的耦合模方程。此外，可以预言，用掺杂光纤^[7]构成耦合光纤环形腔干涉仪列阵，可望成为耦合腔光纤激光器。

参 考 文 献

- [1] L. Stokes *et al.*; *Opt. Lett.*, 1982, **7**, No. 6 (Jun), 288.
- [2] M. H. Yu *et al.*; *Proc. SPIE*, 1984, Vol. 478, 104.
- [3] Y. Ohtsuka; *J. Lightwave Technol.*, 1985, **LT-3**, No. 2 (Feb), 378.
- [4] Y. Ohtsuka; *Appl. Opt.*, 1985, **24**, No. 23 (Dec), 4199.
- [5] F. Zhang *et al.*; *J. O. S. A. (A)*, 1988, **5**, No. 8 (Aug), 1347.
- [6] Yue Chaoyu *et al.*; *Electron. Lett.*, 1988, **24**, No. 10 (May), 622.

[7] L. Reekie *et al.*; *J. Lightwave Technol.*, 1986, **LT-4**, No. 7 (Jul), 956.

Analysis of coupled fiber ring interferometer array

WANG AN, XIE HAIMING, LI XIAOFENG AND ZHU YANBIN

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Hefei, 230031*)

LIU SONGHAO

(*Department of Physics, Huanan Normal University, Gangzhou 510631*)

(Received 23, February 1989; revised 31, October 1989)

Abstract

A new kind of fiber-optic interferometer called coupled fiber ring interferometer array (CFRIA) is proposed. The theoretical analysis based on coupled mode equations and matrix approach is given to describe the transmission characteristics of CFRIA made of two-, three-, four-, N-coupler. It is shown that a suitable choice of coupling coefficients of couplers results in a controllable transmission properties and wider spectral range compared with single fiber ring interferometer.

Key words: fiber-optic interferometer, fiber-optic filter.