

# 微环耦合谐振光波导中的色散控制模型与数值仿真<sup>\*</sup>

田 赫 掌蕴东<sup>†</sup> 王 号 邱 薇 王 楠 袁 萍

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所, 哈尔滨 150080)

(2007 年 12 月 12 日收到, 2008 年 3 月 4 日收到修改稿)

本文利用传输矩阵法得到了微环耦合谐振光波导的色散关系, 讨论了耦合损耗、传输损耗及耦合系数对微环耦合谐振光波导色散的影响, 改变耦合损耗、传输损耗及耦合系数可控制其色散曲线的形状、位置、以及带宽, 色散曲线的变化及控制对微环耦合谐振光波导在滤波、光信号延迟及缓存等方面的应用有重要意义.

关键词: 光波导, 微环光波导, 传输矩阵法

PACC: 4280L, 4281, 4282

## 1. 引 言

早在 1969 年 Marcatili<sup>[1]</sup>就提出了光微环谐振器的概念与结构, 随着平面微加工工艺水平的不断提高, 直至近些年光微环谐振器才受到人们广泛的关注和研究<sup>[2-4]</sup>, 由于光微环谐振器的谐振不需要腔面或光栅来提供光反馈, 因此十分有利于与其他光电子器件的集成, 易于制成光学芯片, 是当前光波导领域中一个重要的研究方向. 微环耦合谐振光波导如图 1 所示, 是由多个微环谐振器耦合而成<sup>[5]</sup>. 由于相邻谐振器之间光场的相互耦合, 同一般的光波导相比, 微环耦合谐振光波导色散强烈, 色散关系近似成正弦曲线<sup>[5, 6]</sup>. 基于微环耦合谐振光波导的色散特性, 其在光通信领域有广泛的应用前景, 目前对其研究包括滤波、光信号延迟、光波非线性相互作用及激光等方面<sup>[7-11]</sup>.

分析微环耦合谐振光波导的方法主要是紧束缚法<sup>[6]</sup>和传输矩阵法<sup>[5, 12, 13]</sup>, 利用紧束缚法可得到微环耦合谐振光波导中传输电场的本征值, 通过求布洛赫形式的独立谐振模, 得到微环链色散关系, 但是这种方法比较复杂, 处理问题难度大, 只有在某些近似情况下才能解出色散关系. 而传输矩阵法则较为简便、直观, 只需求解传输矩阵同样可求得微环耦合谐振光波导的色散关系, 并可证明这两种方法是等价的<sup>[5]</sup>.

文献 5, 6, 14, 15 都在一定的近似情况下求解微环耦合谐振光波导色散关系, 例如忽略微环之间的耦合损耗、光在微环内的传输损耗或将耦合系数看作纯虚数, 而耦合损耗、传输损耗及耦合系数必然对微环耦合谐振光波导的色散关系产生一定的影响, 同时这些影响也提供了通过改变耦合损耗、传输损耗及耦合系数用以控制微环耦合谐振光波导色散关系的潜在机理. 本文正是在这样的背景下, 在考虑耦合损耗、传输损耗的条件下推导出微环耦合谐振光波导色散关系的一般表达式, 并讨论了耦合损耗、传输损耗及耦合系数对其色散的影响, 包括对色散曲线的形状、位置以及带宽的影响, 对微环耦合谐振光波导在滤波、光信号延迟及缓存等方面的应用有重要意义.

## 2. 微环耦合谐振光波导的色散关系

微环耦合谐振光波导结构如图 1 所示,  $a_n, a'_n, b_n, b'_n$  ( $n = 0, 1, 2, \dots$ ) 是其内部光场振幅. 由图 1 相邻两微环之间的耦合可描述为

$$\begin{bmatrix} b_{n-1} \\ b'_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t & k \\ -k^* & t^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ a'_n \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中  $t, k$  分别为振幅透射及耦合系数, 一般情况下  $t, k$  为复数. 由 (1) 式可得到

$$\begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = \frac{1}{k} \begin{bmatrix} -t & 1 \\ -|k|^2 & |t|^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{bmatrix}$$

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(批准号: 60272075, 60478014), 国家高技术研究发展计划(863)(批准号: 2007AA12Z112), 哈尔滨工业大学优秀团队资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

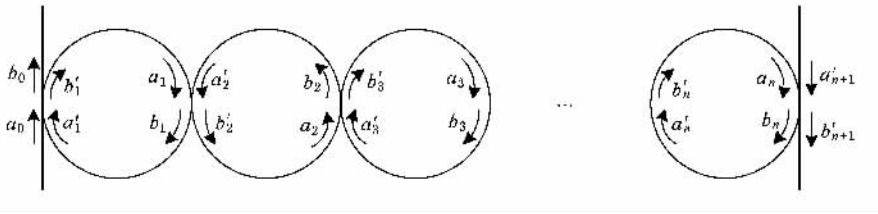


图 1 微环耦合谐振光波导结构及其内部光场振幅

$$= C \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

光在微环内的传输同样可用矩阵描述为

$$\begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha e^{-i\beta\pi R} \\ \frac{1}{\alpha} e^{i\beta\pi R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中  $R$  为微环半径,  $\beta = n_e \omega / c$  为传播常数,  $n_e$  为微环介质的有效折射率,  $\omega$  为光波的角频率,  $c$  为真空中光速.  $\alpha$  描述了光波在微环内传输  $\pi R$  距离时的损耗或增益 ( $\alpha < 1$  对应损耗,  $\alpha > 1$  对应增益). 由 (2) 和 (3) 式得

$$\begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = TC \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由 (4) 式可知, 在微环耦合谐振光波导中, 每一个微环可看作一个单元, 任一组场振幅都可经相同的传输、耦合过程得到下一组振幅矢量, 场是周期性的<sup>[5,11]</sup>. 应用布洛赫定理可得

$$\begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = e^{-iK\Delta} \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中  $K$  为布洛赫波数,  $\Delta = \pi R$  为周期. 这样由 (4) 和 (5) 式可得

$$\text{Det} | TC - e^{-iK\Delta} I | = 0, \quad (6)$$

其中  $I$  为单位阵. 求解 (6) 式得

$$\begin{aligned} & -2\text{Re}(k) \text{Re}(k) \sin(K\Delta) - \text{Im}(k) \cos(K\Delta) \\ & = \text{Re}(k) \left[ \alpha (|k|^2 + |t|^2) + \frac{1}{\alpha} \right] \sin\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi\right) \\ & + \text{Im}(k) \left[ \alpha (|k|^2 + |t|^2) - \frac{1}{\alpha} \right] \cos\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi\right), \end{aligned} \quad (7)$$

(7) 式即微环耦合谐振光波导的色散关系的一般表达式. 在 (7) 式中, 令  $|k|^2 + |t|^2 = 1$  (无耦合损耗),  $\alpha = 1$  (无传输损耗) 及  $\text{Re}(k) = \alpha$  ( $k$  为纯虚数), 可得到简化的色散关系<sup>[5,6,14,15]</sup>

$$\text{Im}(k) \cos(K\Delta) = \sin\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi\right),$$

显然在此式中色散关系仅与  $\text{Im}(k)$  有关, 而忽略了耦合与传输损耗等因素的影响.

改写 (7) 式, 并带入单环谐振条件  $\frac{n_e R}{c} = \frac{m}{\Omega}$ , 其中  $\Omega$  为谐振角频率,  $m$  为正整数, 可得

$$C \cdot \sin(K\Delta - \theta) = \sin\left(\frac{\omega}{\Omega} m\pi + \phi\right), \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} k &= |k| e^{i\theta}, \\ C &= \frac{-2\text{Re}(k) |k|}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \\ \sin\phi &= \frac{B}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \\ \cos\phi &= \frac{A}{\sqrt{A^2 + B^2}}, \\ A &= \text{Re}(k) \left[ \alpha\gamma + \frac{1}{\alpha} \right], \\ B &= \text{Im}(k) \left[ \alpha\gamma - \frac{1}{\alpha} \right], \\ \gamma &= |k|^2 + |t|^2. \end{aligned} \quad (9)$$

色散关系 (8) 式与简化的色散关系

$$\text{Im}(k) \cos(K\Delta) = \sin\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi\right)$$

具有相似的表达式, 但 (8) 式明显受到耦合损耗、传输损耗及耦合系数的影响.

### 3. 色散的控制

利用 (8) 式可计算微环耦合谐振光波导中耦合损耗、传输损耗及耦合系数对其色散的影响, 取  $R = 60 \mu\text{m}$ ,  $n_e = 1.5$ ,  $m = 374$ .

图 2 为耦合损耗及传输损耗对微环耦合谐振光波导色散曲线的影响, 二者对色散曲线的影响类似. 随着耦合损耗或传输损耗的增加色散曲线逐渐上移, 但色散曲线的相位不发生变化, 从 (8) 式也可看出, 耦合损耗和传输损耗的改变使  $C$  和  $\phi$  发生相应的变化, 导致色散曲线的上下移动, 而色散曲线的相位主要由  $\sin(K\Delta - \theta)$  项决定, 受  $\theta$  的控制. 由 (8) 式可得色散曲线的两个边带对应  $\sin(K\Delta - \theta) = \pm 1$  这样带宽  $B = 2\text{FSR} \sin^{-1}(|C|)\pi$ ,  $\text{FSR} = c/$

$2\pi Rn_c$  为自由谱宽,显然耦合损耗和传输损耗的变化也会使色散曲线带宽发生变化,从图 2 中看出,带宽的变化较小.

损耗、传输损耗及耦合系数,以得到不同的色散关系或在微环耦合谐振光波导中通过外加耦合光<sup>[16,17]</sup>来改变耦合损耗、传输损耗或耦合系数,达到

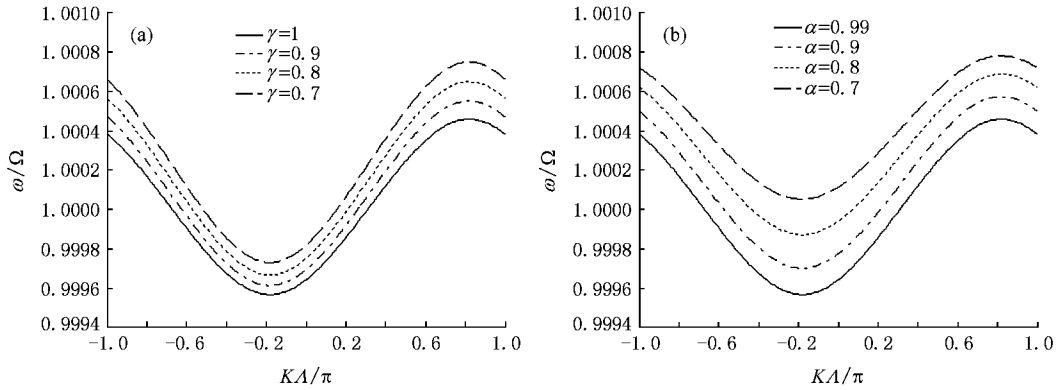


图 2 (a)耦合损耗对色散曲线的影响( $\alpha = 0.99, k = 0.05e^{4.15i}$ ) (b)传输损耗对色散曲线的影响( $k = 0.5e^{4.15i}, |l| = 0.8$ )

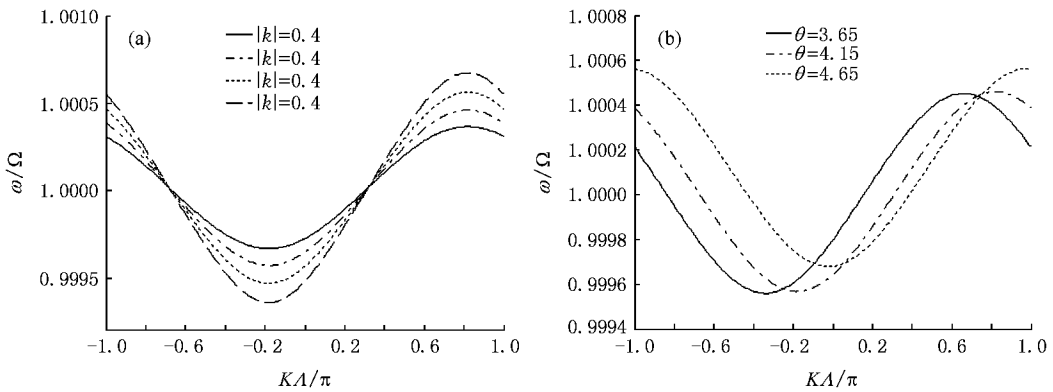


图 3 耦合系数对色散曲线的影响 (a)  $|k|$ 对色散曲线的影响( $\alpha = 0.99, \gamma = 1, \theta = 4.15$ ); (b)  $\theta$ 对色散曲线的影响( $\alpha = 0.99, \gamma = 1, |k| = 0.5$ )

耦合系数对色散曲线的影响如图 3 所示. 图 3 (a)中可见在  $|k|$  变化时,色散曲线的相位同样不发生变化,而带宽随  $|k|$  的增加而显著增大. 同耦合损耗和传输损耗相比,  $|k|$  对带宽的控制更显著,且不会使色散曲线上上下下移动(在图 3(a)中以  $\Omega$  为中心). 由 (8) 式可知  $\theta$  的变化对色散曲线的影响最为复杂,可同时改变  $C, \phi$  与  $\sin(K\Lambda - \theta)$ ,所以在图 3(b)中  $\theta$  的变化使色散曲线的相位,带宽发生改变,同时也使色散曲线产生移动.

由上面的数值计算可知耦合损耗、传输损耗及耦合系数的变化可改变微环耦合谐振光波导的色散,包括色散曲线的形状、位置和带宽. 同时这也提供了通过改变耦合损耗、传输损耗及耦合系数用以控制微环耦合谐振光波导色散的一种机理,如可在制作微环耦合谐振光波导过程中,选取适当的耦合

控制微环耦合谐振光波导色散的目的.

同时我们注意到对微环耦合谐振光波导色散的控制有重要的意义,如可以改变某一固定的频率  $\omega_0$  的群速度  $v_{g, \omega_0}$  ( $v_{g, \omega_0} = d\omega/dK|_{\omega_0}$  与图 2 和 3 中  $\omega_0$  所对应色散曲线的斜率成正比),当耦合损耗、传输损耗或耦合系数改变时,  $\omega_0$  所对应色散曲线的斜率也改变,这样  $v_{g, \omega_0}$  也随之改变,这方面将在以后的工作中做进一步的研究. 同时,对注入微环耦合谐振光波导中带宽为  $B_p$  的光脉冲,只有当  $B_p \leq B$  时才能通过波导<sup>[14]</sup>,这样可以通过改变耦合损耗、传输损耗或耦合系数用以改变  $B$  及  $B$  所对应的频率范围,使得具有更窄带宽且具有特定频率成分的脉冲通过,这样微环耦合谐振光波导起到了滤波的作用.

## 4. 结 论

本文利用传输矩阵法得到了微环耦合谐振光波导的色散关系,讨论了耦合损耗、传输损耗及耦合系数对其色散的影响,从数值计算结果可知,改变微环

耦合谐振光波导的耦合损耗、传输损耗或耦合系数可控制其色散曲线的形状、位置以及带宽,对于以色散为基础的光脉冲延迟、滤波等方面有重要意义,可通过改变微环耦合谐振光波导的耦合损耗、传输损耗或耦合系数以改变光脉冲的群速度,也可实现对不同频率光波的滤波。

- [ 1 ] Marcetili 1971 US Patent 3558213
- [ 2 ] Eldada L 2001 *Opt. Eng.* **40** 1165
- [ 3 ] Little B E, Chu S T, Haus H A, Foresi J, Laine J P 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 998
- [ 4 ] Van V, Ibrahim T A, Ritter K, Absil P P, Johnson F G, Grover R, Goldhar J, Ho P T 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 74
- [ 5 ] Poon J K S, Scheuer J, Mookherjea S, Paloczi G T, Huang Y, Yariv A 2004 *Opt. Express* **12** 90
- [ 6 ] Yariv A, Xu Y, Lee R K, Scherer A 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
- [ 7 ] Olivier S, Smith C, Rattier M, Benisty H, Weisbuch C, Krauss T, Houdré R, Oesterlé U 2001 *Opt. Lett.* **26** 1019
- [ 8 ] Hryniewicz J V, Absil P P, Little B E, Wilson R A, Ho P T 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 320
- [ 9 ] Happ T D, Kamp M, Forchel A, Gentner J L, Goldstein L 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 4
- [ 10 ] Mookherjea S 2005 *Opt. Lett.* **30** 2406
- [ 11 ] Tian H, Zhang Y D, Wang N, Yuan P 2007 *Chinese Science Bulletin* **52** 3047
- [ 12 ] Tong Y W, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 935 ( in Chinese ) [ 童元伟、张冶文、赫 丽、李宏强、陈 鸿 2006 物理学报 **55** 935 ]
- [ 13 ] Hao B L, Liu P K, Tang C J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1862 ( in Chinese ) [ 郝保良、刘濮鲲、唐昌建 2006 物理学报 **55** 1862 ]
- [ 14 ] Melloni A, Morichetti F, Martinelli M 2003 *Opt. Quantum Electron.* **35** 365
- [ 15 ] Chen Y, Blair S 2004 *Opt. Express* **12** 3353
- [ 16 ] Buttler J K, Ackley D E, Eitenberg M 1985 *IEEE J. Quantum Electron.* **QE-21** 458
- [ 17 ] Boumans G, Segard B, Dagoisse D, Glorieux P 2000 *J. Opt. Soc. Amer. B* **17** 781

# Control of dispersion in microring coupled-resonator optical waveguides \*

Tian He Zhang Yun-Dong<sup>†</sup> Wang Hao Qiu Wei Wang Nan Yuan Ping  
( Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China )  
( Received 12 December 2007 ; revised manuscript received 4 March 2008 )

## Abstract

We calculated the dispersion relation of microring coupled-resonator optical waveguides using transfer matrix method and discussed its dependence on the coupling loss, transmission loss and coupling coefficient. The shape, position and bandwidth of dispersion relation could be controlled by changing the coupling loss, transmission loss and coupling coefficient. The adjustment and control of dispersion relation is important for applications of coupled-resonator optical waveguides in filtering, delay and buffer of optical signal.

**Keywords** : optical waveguide, microring optical waveguides, transfer matrix method

**PACC** : 4280L, 4281, 4282

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China ( Grant Nos. 60272075, 60478014 ), the National High Technology Research and Development Program of China ( Grant No. 2007AA12Z112 ), and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology.

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : ydzhang@hit.edu.cn