

光脉冲在微环耦合谐振光波导中传输线性特性的数值仿真^{*}

田 赫 掌蕴东[†] 王 号 邱 薇 王 楠 袁 萍

(哈尔滨工业大学光电子技术研究所可调谐激光技术国家级重点实验室, 哈尔滨 150080)

(2008 年 3 月 19 日收到, 2008 年 5 月 10 日收到修改稿)

利用传输矩阵法得到了微环耦合谐振光波导色散关系的一般表达式,并由色散关系出发讨论了光脉冲在微环耦合谐振光波导中传输时的线性特性,包括带宽、群速度、色散和线性相位变化,这些特性对微环耦合谐振光波导在光通信和光传感领域的应用有重要意义.

关键词:微环光波导,光脉冲线性特性,传输矩阵法,数值仿真

PACC: 4280L, 4281, 4282

1. 引 言

早在 1969 年 Marcattili^[1]就提出了光微环谐振器的概念与结构,但由于制作工艺水平较低的限制,对这方面的研究发展比较缓慢,而近年来随着平面微加工工艺水平的不断提高,光微环谐振器受到人们广泛的关注和研究^[2-4],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.多个微环谐振器相互耦合成链构成微环耦合谐振光波导,如图 1 所示^[5],由于光波在谐振器间的谐振传输,使得光波在微环耦合谐振光波导中的传输特性不同于在一般介质波导中的传输,目前对微环耦合谐振光波导研究包括滤波^[6-8]、波分复用^[9-10]、波长变换^[11]、调制^[12]、开关^[13]等,也有应用于激光方面的相关报道^[14],其在光通信、光学传感及量子光学领域有重要的应用前景.

目前分析微环耦合谐振光波导的方法主要是紧束缚法^[15]和传输矩阵法^[5,16-18],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,得到波导的色散关系,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.与紧束缚法相比,传输矩阵法则较为简便、直观,我们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^[5].本文利用传输矩阵法求解微环耦合谐振光波导色散关系的一般表达式,并由色散关系出发讨论了光脉冲在微环耦合谐振光波导中传输时的线性特性,包括带宽、群速度、色散和线性相位变化,对微环耦合谐振光波导在光通信和光传感领域的应用有重要意义.

2. 理论分析

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,相邻两微环之间的光耦合及微环内的光传输可分别用矩阵描述为

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

$$\begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha e^{-i\beta\pi R} \\ \frac{1}{\alpha} e^{i\beta\pi R} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} a'_n \\ b'_n \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中 t, k 分别为振幅透射及耦合系数,一般情况下

^{*} 国家自然科学基金(基金号 60272075, 60478014), 863 计划(批准号 2007AA12Z112)和哈尔滨工业大学优秀团队项目资助的课题.

[†] E-mail: ydzhang@hit.edu.cn

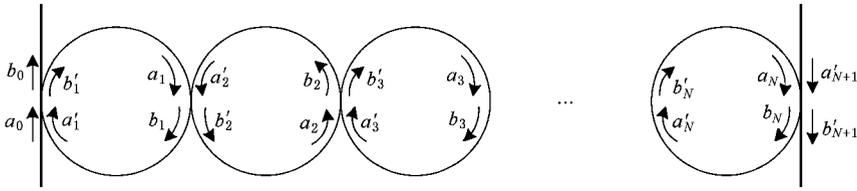


图1 微环耦合谐振光波导结构及其内部光场振幅

t, k 为复数; 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, ω 为光波的角频率, c 为真空中光速. α 描述光波在微环内传输 πR 距离时的损耗或增益 ($\alpha < 1$ 对应损耗, $\alpha > 1$ 对应增益). 由上两式可得

$$\begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = TQ \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

同时我们注意到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^[5,11]. 应用布洛赫定理得到

$$\begin{bmatrix} a_n \\ b_n \end{bmatrix} = e^{-iK\Delta} \begin{bmatrix} a_{n-1} \\ b_{n-1} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

其中 K 为布洛赫波数, $\Delta = \pi R$ 为周期. 这样由(3), (4)两式可得

$$\begin{aligned} & -2\text{Re}(k) \text{Re}(k) \sin(K\Delta) - \text{Im}(k) \cos(K\Delta) \\ & = \text{Re}(k) \left[\alpha(|k|^2 + |t|^2) + \frac{1}{\alpha} \right] \sin\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi\right) \\ & + \text{Im}(k) \left[\alpha(|k|^2 + |t|^2) - \frac{1}{\alpha} \right] \cos\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi\right). \quad (5) \end{aligned}$$

上式即为光波在微环耦合谐振光波导中传输时色散关系的一般表达式. 改写(5)式, 并代入单环谐振条件 $\frac{n_e R}{c} = \frac{m}{\Omega}$, 其中 Ω 为单环谐振光波角频率, m 为正整数, 我们得到

$$C \cdot \sin(K\Delta - \theta) = \sin\left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi\right), \quad (6)$$

式中 $k = |k| e^{i\theta}$, $C = \frac{-2\text{Re}(k)|k|}{\sqrt{A^2 + B^2}}$, $\sin\phi =$

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

下面由色散关系(6)式出发, 讨论脉冲在微环耦合谐振光波导中传输时的线性特性.

3. 脉冲在微环耦合谐振光波导中传输时的线性特性

3.1. 带宽

由色散关系(6)式可解得

$$\omega = \frac{c}{n_e R \pi} \{ 2n' \pi + \pi - \arcsin[C \cdot \sin(K\Delta - \theta)] - \phi \}, \quad (7)$$

$$\omega = \frac{c}{n_e R \pi} \{ 2n' \pi + \arcsin[C \cdot \sin(K\Delta - \theta)] - \phi \}, \quad (8)$$

其中 $n' = 0, 1, 2, \dots$, 可以看出(7)和(8)是无数条色散曲线, 每条色散曲线对应一个频率带, 这些频率带为

$$\omega \in \frac{c}{n_e R \pi} [2n' \pi + \pi - |\arcsin C| - \phi, 2n' \pi + \pi + |\arcsin C| - \phi], \quad (9)$$

$$\omega \in \frac{c}{n_e R \pi} [2n' \pi - |\arcsin C| - \phi, 2n' \pi + |\arcsin C| - \phi]. \quad (10)$$

(9)和(10)式是两个相邻的频率带. 显然任意两个相邻频带的中心频率之间的间隔是 $\frac{c}{n_e R} = \text{FSR}$ (FSR 为自由谱宽), 且任一个频带的宽度均为 $B = 2\text{FSR} \sin^{-1}(|C|)\pi$. 一般情况下这些频带的分布如图2所示, 图中实线和虚点线区域分别为谐振频率 Ω 和 $\Omega - \text{FSR}$ 附近的色散曲线和频带. 由(9)(10)式可知, 当且仅当 $|C| = 1$, 两相邻频带才能连接在一起, 考虑微环耦合谐振光波导中不存在外加增益时, $|C| = 1$ 仅发生在 $\alpha = 1, |k|^2 + |t|^2 = 1$ 和 $|k| = 1$, 这意味着波导中不存在传输损耗、耦合损耗且微环之间能量耦合率为1, 而实际的微环耦合谐振光波导是不可能同时满足这三个条件的, 所以其色散频带是不连续的. 实际上, 那些不在色散频带中的频率成分是无法通过微环耦合谐振光波导的, 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 $B_p \leq B$ 时光脉冲才能通过波导.

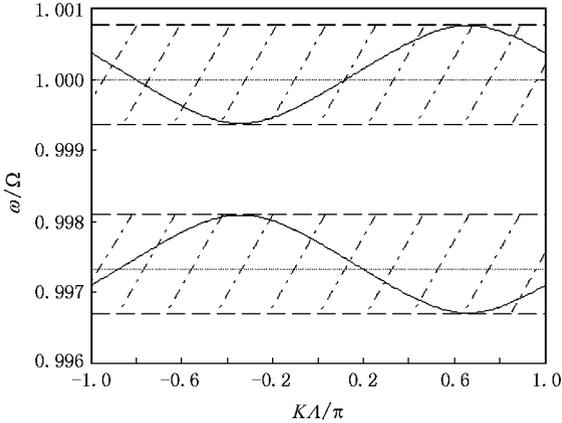


图2 谐振频率 Ω 和 Ω -FSR 附近的色散曲线(实线)和频带(虚点线)其中取 $n_e = 1.5$, $R = 60 \mu\text{m}$, Ω 对应 $m = 374$, $k = 0.7e^{3.64i}$, $|t| = 0.65$, $\alpha = 0.9$

3.2. 群速度

众所周知,光波通过周期结构时包含无数个空间谐波,这些空间谐波称为布洛赫波,由方程(6)可求得第 q (q 为正整数)个谐波的波数为

$$K_q = \frac{1}{\Lambda} \left\{ \pm \cos^{-1} \left[\frac{1}{C} \sin \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right) + q \cdot 2\pi + \frac{\pi}{2} + \theta \right] \right\}, \quad (11)$$

式中的正负号表示光脉冲在微环耦合谐振光波导中正反两个方向的传播都是可以的.值得注意的是,尽管这些空间谐波的相速度不同,但它们的群速度是一样的,在上式中对 K_q 求导,就得到布洛赫波减慢的群速度

$$\nu_g = \frac{c}{n_e} \frac{\sqrt{C^2 - \sin^2 \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right)}}{\left| \cos \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right) \right|}. \quad (12)$$

群速度随频率分布如图3所示,可见微环耦合谐振光波导中光的群速度小于光波相速度($\nu = c/n_e$),且与图2的色散曲线相对应可知,当入射光波频率在色散频带中心,光波群速度较大,而当入射光波频率越接近色散频带边缘,群速度则越小.为了描述光波群速度的减慢程度,我们定义群速度减慢因子 S ——波导中光波相速度与慢群速度之比,

$$S = \frac{\nu}{\nu_g} = \frac{\left| \cos \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right) \right|}{\sqrt{C^2 - \sin^2 \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right)}}. \quad (13)$$

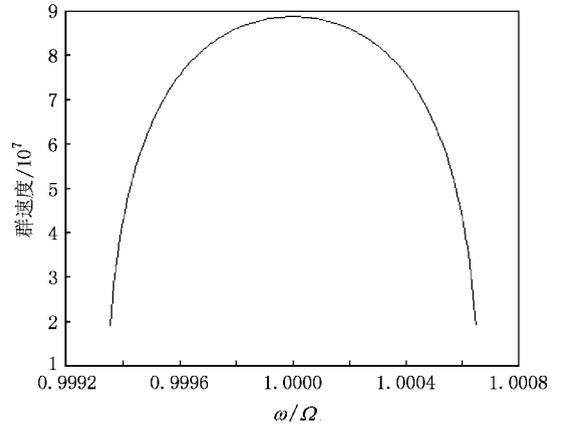


图3 群速度(其中取 $n_e = 1.5$, $R = 60 \mu\text{m}$, Ω 对应 $m = 374$, $k = 0.7e^{3.64i}$, $|t| = 0.65$, $\alpha = 0.9$)

3.3. 色散

在光通信系统中,传光介质的色散直接关系到光脉冲传输距离的大小以及通信系统的通信容量,在微环耦合谐振光波导中,当脉冲带宽 $B_p \leq B$ 时,色散成为影响脉冲在微环耦合谐振光波导中传输的主要因素.为了量化色散对脉冲在微环耦合谐振光波导中传输时的影响,考虑色散系数为 $K_q^{(n)} = d^n K_q / d\omega^n$,由(11)式可求得二阶色散系数为

$$K_q^{(2)} = \frac{n_e^2 \Lambda}{c^2} \text{Stan} \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right) \times \frac{1 - C^2}{C^2 - \sin^2 \left(\frac{\omega n_e R}{c} \pi + \phi \right)}. \quad (14)$$

相应的二阶色散长度为 $L_d = T_0^2 / K_q^{(2)}$, T_0 为脉冲强度下降为 $1/e$ 时脉冲的半宽度,由此可知,当光脉冲在微环耦合谐振光波导中传输距离超过 L_d 时,色散对光脉冲的影响将变得显著,脉冲将严重变形,这样在应用中为了克服色散对光脉冲传输的剧烈影响,光脉冲在微环耦合谐振光波导中传输的距离应小于 L_d ,否则会大大增加通信系统的误码率.值得注意的是这里我们主要考虑二阶色散系数,这是因为在微环耦合谐振光波导中,更高阶的色散系数同二阶色散系数相比要小得多(由(14)式继续对 ω 求导可得到高阶色散系数),可以忽略.

3.4. 线形相位变化

当介质的有效折射率变化 dn_e ,光波在介质中传输距离 L 时,导致相位变化 $d\varphi = \frac{\omega L}{c} dn_e$,而在微

环耦合谐振光波导中,由于谐振加强,其有效相位变化 $d\varphi_{\text{eff}} = dK_y L$,微环耦合谐振光波导中这种相位变化的增强可用相位灵敏度 $d\varphi_{\text{eff}}/d\varphi$ 描述,由(11)式可得 $d\varphi_{\text{eff}}/d\varphi = S > 1$. 值得注意的是这种相位变化的加强是由光在微环内谐振传播引起的,这区别于热光、电光或克尔效应等. 微环耦合谐振光波导中增强的相位变化可应用于相位灵敏或控制装置.

值得注意的是,在方程(6)中改变耦合损耗、传输损耗及耦合系数会使色散关系发生变化,相应的脉冲带宽、群速度、色散系数及线性相位也发生变化,这些参数的变化意味着在微环耦合谐振光波导中传输的脉冲线性特性将有所不同,同时,我们可通过改变耦合损耗、传输损耗及耦合系数控制脉冲在微环耦合谐振光波导中的传输. 关于耦合损耗、传

输损耗及耦合系数对脉冲线性特性的影响将在以后的工作中进行更细致研究.

4. 结 论

本文利用传输矩阵法得到了微环耦合谐振光波导色散关系的一般表达式,并由色散关系出发讨论了光脉冲在微环耦合谐振光波导中传输时的线性特性,包括带宽、群速度、色散和线性相位变化,脉冲在微环耦合谐振光波导中的传输受到带宽的限制,而色散也限制了脉冲传输的距离,同时脉冲的传输行为又表现为群速度的减小及相位变化的增强,这些结果对微环耦合谐振光波导在光通信和光传感领域的应用有重要意义.

- [1] Marcatili 1971 *US Patent* 3558213
- [2] Eldada L 2001 *Opt. Eng.* **40** 1165
- [3] Little B E, Chu S T, Haus H A *et al* 1997 *J. Lightwave Technol.* **15** 998
- [4] Van V, Ibrahim T A, Ritter K *et al* 2002 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **14** 74
- [5] Poon J K S, Scheuer J, Mookherjea S *et al* 2004 *Opt. Express* **12** 90
- [6] Barwicz T, Watts M R, Smith H I 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 2207
- [7] Okamoto H, Haraguchi M, Okamoto T *et al* 2006 *Electronics and Communications in Japan* **89** 25
- [8] Djordjev K D, Lin C K, Zhu J T *et al* 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 3464
- [9] Suzuki S, Hatakeyama Y, Kokubun Y *et al* 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 745
- [10] Vorckel A, Monster M, Henschel W *et al* 2003 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **15** 921
- [11] Absil P P, Hryniewicz J V, Little B E *et al* 2000 *Opt. Lett.* **25** 554
- [12] Rabiei P, Steier W H, Zhang C *et al* 2002 *J. Lightwave Technol.* **20** 1968
- [13] Van V, Ibrahim T A, Ritter K *et al* 2002 *IEEE Photon Technol. Lett.* **14** 74
- [14] Baktur R, Pearson L W, Ballato J 2007 *Journal of Applied Physics* **101** Art. No. 043102
- [15] Yariv A, Xu Y, Lee R K, Scherer A 1999 *Opt. Lett.* **24** 711
- [16] Tong Y W, Zhang Y W, He L, Li H Q, Chen H 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 935 (in Chinese) [童元伟、张治文、赫 丽、李宏强、陈 鸿 2006 物理学报 **55** 935]
- [17] 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]
- [18] Tian H, Zhang Y D, Wang N, Yuan P 2007 *Chinese Science Bulletin* **52** 3047

The numerical emulation of linear characteristics of optical pulse propagation in microring coupled-resonator optical waveguides^{*}

Tian He Zhang Yun-Dong[†] Wang Hao Qiu Wei Wang Nan Yuan Ping

(*National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Institute of Opto-electronics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China*)

(Received 19 March 2008; revised manuscript received 10 May 2008)

Abstract

The general expression of dispersion relation of microring coupled-resonator optical waveguides was obtained using transfer matrix method. Based on the dispersion relation the linear characteristics of optical pulse propagation in microring coupled-resonator optical waveguides was discussed with respect to the bandwidth, group velocity, dispersion and linear phase shift. These characteristics are important for applications of coupled-resonator optical waveguides in optical communications or as optical sensors.

Keywords : microring optical waveguide, optical pulse linear characteristic, transfer matrix method, numerical emulation

PACC : 4280L, 4281, 4282

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 60272075 and 60478014), the National High Technology Research and Development Program (863) of China (Grant No.2007AA12Z112) and the Program of Excellent Team in Harbin Institute of Technology.

[†] E-mail ydzhang@hit.edu.cn