

文章编号: 0258-7025(2008)05-0675-05

串联微环谐振器的光学特性

高震森 李淳飞

(哈尔滨工业大学物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 根据波导耦合方程, 导出了串联微环谐振器的传输矩阵, 并分析了环数、环间耦合系数以及损耗对串联微环谐振器输出特性的影响。数值模拟表明, 串联微环谐振器具有光子带隙的特征。当环数增加时, 通带内满足谐振条件的波长数增加; 当环间耦合系数增加时, 可使通带带宽加宽; 通过适当选择环数和环间耦合系数, 可以实现滤波和波分复用(WDM)的功能。选用脉冲宽度为 50 ps 的高斯型激光脉冲注入微环谐振器, 发现当环间耦合系数较小时, 出射脉冲相对于入射脉冲具有光学延迟的效果, 并且随着环数的增加, 延迟时间逐渐增大, 而当环间耦合系数较大时, 光学延迟效果不明显。

关键词 集成光学; 微环谐振器; 传输矩阵; 串联耦合; 光学延迟

中图分类号 TN 256 文献标识码 A

Optical Properties of the Series-Coupled Microring Resonators

Gao Zhensen Li Chunfei

(Department of Applied Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The transfer matrix of the series-coupled microring resonators is derived in detail based on the coupled mode theory of waveguides. The influence of the coupling coefficients, the number of the rings and loss on the transmission spectrum of the resonators are analyzed. Numerical simulation indicates that the bandwidth of the pass band will increase with the coupling coefficient, and at the same time, the number of the resonant wavelength in the pass band will also increase with the number of the rings. The microring resonator can act as filters or wavelength division multiplexer (WDM) in appropriate condition. Additionally, we find that the structure has the performance of optical delay when we launch a 50 ps (full-width at half maximum, FWHM) long Gaussian-shaped pulse into the structure. The larger the number of the rings, the more group delay we can achieve when the coupling coefficients is rather small, however, no delay effect can be observed when the coupling coefficient between the rings is strong.

Key words integrated optics; microring resonator; transfer matrix; series-coupled; optical delay

1 引言

微环谐振器具有成本低、结构简单、集成度高、损耗小等特点, 既可以在全光通信系统中用作滤波器、色散补偿器、分插复用器等通信器件, 又可以应用于生物化学传感领域, 高灵敏度地探测生物化学物质的微量变化, 是一种非常有应用价值的光波导器件^[1]。然而, 由于工艺水平的限制, 一直没有得到很大的发展。近年来, 由于对光波导的制备取得了很大的进步, 微环谐振器的研究再度引起国内外研

究者的高度重视和广泛研究^[2~4]。单个微环谐振器具有滤波器的功能, 但它的光谱输出是上凸的洛伦兹线形, 平坦特性差, 其滤波性能对温度或压力的变化很敏感, 稳定性差。为此, 人们提出利用多环串联或并联来改善谐振器的性能^[5]。目前, 人们对多环谐振器的研究大多局限于它的滤波特性, 而对其他性能的报道很少。

本文根据波导耦合方程, 详细地导出了串联微环谐振器的传输矩阵, 并给出了一个通用的串联相同微环谐振器的传输光谱公式, 在此基础上分析了

收稿日期: 2007-09-03; 收到修改稿日期: 2007-11-07

基金项目: 国家自然科学基金(10474017)资助项目。

作者简介: 高震森(1986—), 男, 山西人, 硕士研究生, 主要从事光纤通信器件方面的研究。E-mail: gaozhensen@hit.edu.cn

导师简介: 李淳飞(1938—), 男, 江西人, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学和光纤通信技术方面的研究。

E-mail: cfli@hit.edu.cn

环数、耦合系数以及损耗对串联微环谐振器输出特性的影响。

2 理论分析

串联微环谐振器是将多个环形谐振器级联起来构成的,其结构如图 1(a)所示。假定只从环的一端 a_0^+ 输入光信号,通过耦合器进入微环谐振器,当环数为偶数时,满足谐振条件的光信号将从 output (even) 端口输出;当环数为奇数时,从 output(odd) 端口输出,其他非谐振光将全部从 through 端口输出。

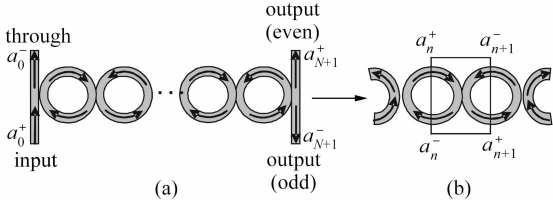


图 1 (a) 由相同单环组成的串联微环谐振器的结构示意图;(b) 拆分示意图

Fig. 1 (a) Scheme of series-coupled microring resonator composed of the same single ring resonators; (b) unit cell of the resonator

在这种结构中,有两列波同时存在,一个是向前传播的波,另一个是向后传播的波,两列波相互干涉决定输出光谱。这种串联微环谐振器可以看作对环的一种周期性排列,因此,可以预测它应当具有类似光子晶体的特点,表现出光子带隙 (photonic band gap) 的特征。为了研究串联微环谐振器的传输特性,可将它拆分为许多基本单元,由这些基本单元的级联得到输出光谱。拆分方法多种多样,如图 1(b) (实线框)是将其拆分为多个半环波导的级联。由波导耦合方程,对第 n 个基本单元有

$$\begin{bmatrix} a_n^+ \\ a_n^- \end{bmatrix} = \frac{i}{t_0} \begin{bmatrix} -e^{ikd} & r_0 \\ -r_0 & e^{-ikd} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_{n+1}^+ \\ a_{n+1}^- \end{bmatrix}, \quad (1)$$

这是一个基本单元的传输矩阵。式中 $a_n^+, a_n^-, a_{n+1}^+, a_{n+1}^-$ 分别表示第 n 个和第 $n+1$ 个环通过微环中心的垂直截面上的光场振幅, + 和 - 分别表示向前传播和向后传播, r_0 和 t_0 分别为耦合器振幅反射率和透射率。 $d = l/2$, l 为环的周长, $k = n\omega/c$, $\omega = 2\pi c/\lambda$, n 为介质的有效折射率, λ 为入射波长,对于 N 个周期性的环腔,如果把输入输出波导分别看作半个环腔,则共有 $N+1$ 个相同的基本单元,于是可得

$$\begin{bmatrix} a_{N+1}^+ \\ a_{N+1}^- \end{bmatrix} = Q^{N+1} \cdot \begin{bmatrix} a_0^+ \\ a_0^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_0^+ \\ a_0^- \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, $Q = \frac{i}{t_0} \begin{bmatrix} e^{-ikd} & -r_0 \\ r_0 & -e^{ikd} \end{bmatrix}$, 对(2)式进行矩阵运算就可以得到谐振器的传输光谱,但这对于级联多个环腔时计算非常复杂。我们给出一种更为简单的计算方法,对于串联谐振器的一个周期,可以等效为图 2 的系统,其反演系统也成立。



图 2 串联微环谐振器一个周期的等效系统

Fig. 2 Equivalent system in one period of series-coupled microring resonator

设 t 为此系统的透射系数, r 为反射系数,且满足 $|t|^2 + |r|^2 = 1$, 则其传播矩阵为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1/t & r^*/t^* \\ r/t & 1/t^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

与(1)式相比较,可得 $t = it_0 e^{-ikd}$, $r = r_0 e^{-ikd}$ 。对于 N 个周期性的环腔,其传播矩阵可类似写为

$$\mathbf{M}^N = \begin{bmatrix} 1/t_N & r_N^*/t_N^* \\ r_N/t_N & 1/t_N^* \end{bmatrix}, \quad (4)$$

利用 Sylvester's 的理论^[6], (4)式可写为

$$\mathbf{M}^N = \frac{1}{\sin(\beta d)} \begin{bmatrix} M_{11} \sin(N\beta d) - \sin[(N-1)\beta d] & M_{12} \sin(N\beta d) \\ M_{21} \sin(N\beta d) & M_{22} \sin(N\beta d) - \sin[(N-1)\beta d] \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\cos(\beta d) = (M_{11} + M_{22})/2$ 。比较(4)式和(5)式,可以得到

$$\frac{1}{t_N} = \frac{1}{t} \frac{\sin(N\beta d)}{\sin(\beta d)} - \frac{\sin[(N-1)\beta d]}{\sin(\beta d)}, \quad (6a)$$

$$\frac{r_N}{t_N} = \frac{r}{t} \frac{\sin(N\beta d)}{\sin(\beta d)}, \quad (6b)$$

$$\cos(\beta d) = \frac{\sin(kd)}{t_0}, \quad (7)$$

(7)式也可通过求解传输矩阵的本征方程得到,它决定了无限多个环腔的色散关系。在无限多个环腔中传播

的波是一种在周期性结构中存在的波,为布洛赫波, β 即为布洛赫波的传播常数。由(6)式可得强度透射率和反射率的表达式

$$T_N = \frac{t_0^2 \sin^2(\beta l)}{t_0^2 \sin^2(\beta l) \cos^2[(N+1)\beta l] + \cos^2(kd) \sin^2[(N+1)\beta l]},$$

$$R_N = \frac{r_0^2 \sin^2[(N+1)\beta l]}{t_0^2 \sin^2(\beta l) \cos^2[(N+1)\beta l] + \cos^2(kd) \sin^2[(N+1)\beta l]} \quad (8)$$

3 数值计算

3.1 串联微环谐振器的光子带隙特性

单个微环的谐振方程和自由光谱范围(FSR)表达式为

$$nl = m\lambda, \quad \text{FSR} = \lambda n / m n_g, \quad (9)$$

式中 m 为谐振级数, n_g 为群折射率。数值模拟过程中,为了使通信波长 1550 nm 处于谐振中心频率,环腔的弯曲损耗尽可能小,且自由光谱范围又足够大,采用 $l = 49.6 \mu\text{m}$, $n = 1.5$, 可得 $m = 48$, $\text{FSR} \approx 28.6 \text{ nm}$ 。对无限多个环腔的色散曲线和 $N = 5$ 时的透射谱做图对比,取 $t_0 = 0.5$, 如图 3 所示。由图 3 可以看出,透射曲线呈现出明显的光子禁带特征,禁带中心在 $kd/\pi = M + 1/2 (M = 0, 1, 2, \dots)$ 处。在(7)式中,令 $\cos(\beta l) = 1$, 可得通带带宽为 $\Delta\lambda = \lambda^2 \arcsin(t_0) / \pi n d$ 。可见,随着耦合系数的减小,环间的耦合作用减弱,通带带宽逐渐变窄,禁带加宽。

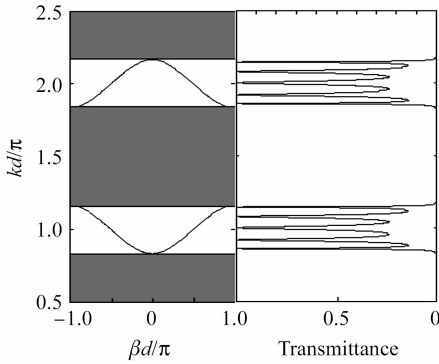


图 3 色散曲线(左)和 $N = 5$ 时的透射曲线(右)

Fig. 3 Dispersion curve (left) and transmission spectrum for $N = 5$ (right)

3.2 谐振器的滤波和波分复用特性

图 4 是 $t_0 = 0.9$, 取不同的奇数环时的透射谱。由图可见,当环数较小时,透射谱的带阻不完全,随着环数的增加,带阻特性逐渐变好,当达到 $N = 7$ 时,带阻特性非常好,此时若继续增加环数,只是增加了通带内的谐振波长数,对滤波效果不会有明显的改善。另外,虽然 $N = 7$ 时带阻特性非常好,但与此同时,通带内的非谐振光增强,通带的平坦特性变差,严重影响了滤波性能。为了改善通带的平坦特

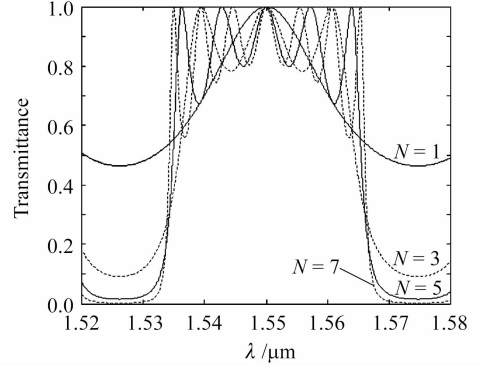


图 4 $t_0 = 0.9$, 取不同的奇数环时的透射谱

Fig. 4 Transmission spectrum for different numbers of rings when $t_0 = 0.9$

性,可以通过增加环间耦合系数来实现。通带的平坦特性和禁带的带阻特性是一对矛盾体,要想保证两种特性都具有优良的性能,只能增加环数和环间耦合系数。

中心波长和带宽是表征滤波器通带响应的重要指标。通过改变单个微环的长度可以调节谐振器的谐振波长,数值模拟过程中选择 1550 nm 作为中心波长。谐振器的带宽不仅与环数有关,而且与环间耦合系数、环的长度有关。通常,由色散关系式(7)可确定无限多个环腔的带宽 $\Delta\lambda$, 环数越多,越接近于这一值。图 5 是无限多个环腔的通带带宽与耦合系数、长度的关系。由图 5 可见,耦合系数越大,带宽越宽,环的长度越长,带宽越小。在器件的实际制作过程中,可以根据实际情况来折衷选取,但环的长度不宜太长,否则会使器件的损耗加大,从而影响器件的滤波性能。考虑损耗时,只需将前面的 k 变为 $\tilde{k} = k - i\alpha$ 即可。其中, α 为损耗系数。损耗存在时器件的最大透射率随损耗增加而逐渐减小,器件性能急剧恶化,实际制作过程中应尽量减少损耗。若将耦合系数减小,禁带宽度逐渐加宽,同时,透射带内非谐振波长的透射率逐渐减小为零,表现出良好的波长选择特性。即在透射带内,某些波长不再从透射端输出,而从反射端输出,并且从透射带内输出的波长间隔基本相同,如果适当增加环的个数,就可以使这些波长间隔达到通信中密集波分复用的标准

0.8 nm,这可能应用于未来全光通信中密集波分复用和解复用系统。图6是 $t_0 = 0.1$ 时不同环数的透

射谱。此时,通带带宽大约为3 nm,当环为11时,信道间隔已非常小。

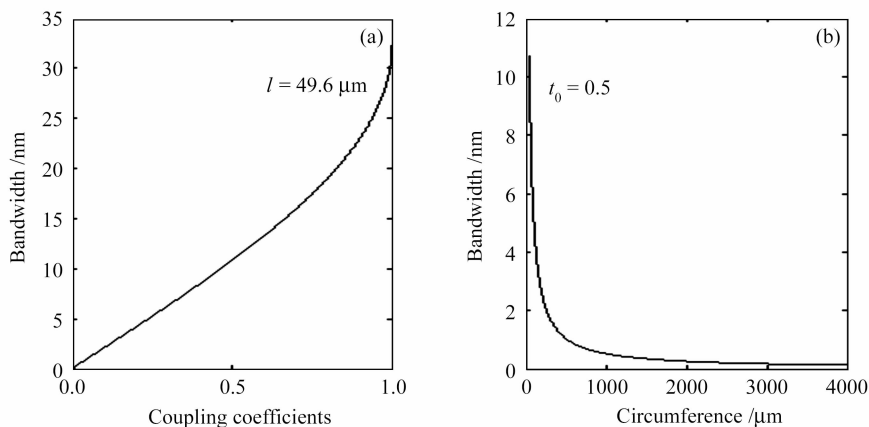


图5 耦合系数(a)和环腔长度(b)对通带带宽的影响

Fig. 5 Bandwidth of the pass band with different coupling coefficients (a) and ring lengths (b)

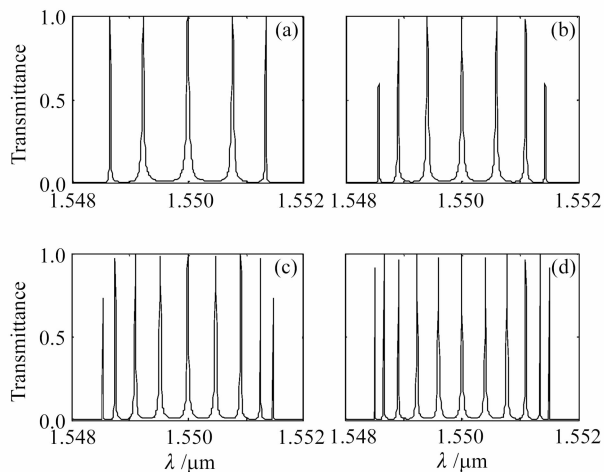


图6 $t_0 = 0.1, N = 5, 7, 9, 11$ 时的透射谱

Fig. 6 Transmission spectrum for $N = 5, 7, 9, 11$ when

$$t_0 = 0.1$$

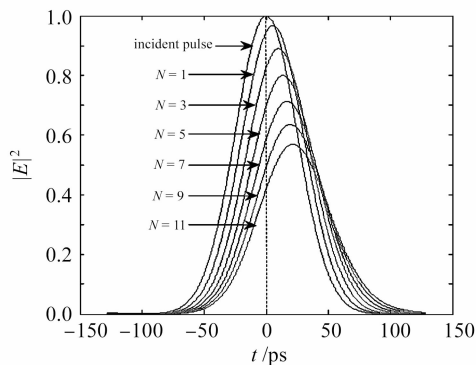


图7 $t_0 = 0.3$,取不同环数时的延迟示意图

Fig. 7 Characteristic of optical delay for the microring resonator

3.3 脉冲的光学延迟

单个谐振器的光学延迟特性已有人做过理论方

面的探讨^[7],但对串联微环谐振器光学延迟特性的研究还未见报道。选用半峰全宽(FWHM)为50 ps,中心波长为1550 nm的高斯脉冲注入串联微环谐振器进行数值模拟,比较出射脉冲与入射脉冲之间的时间延迟,得到如图7所示的结果。所选的脉冲宽度远大于环腔的寿命,否则会引起输出脉冲的畸变。结果显示,当环间耦合系数较大时,延迟时间较小;当耦合系数较小时,随着环数的增加,延迟时间逐渐增大。取 $t_0 = 0.3$,当环数达到11时,延迟时间可到21.81 ps,如果将脉冲中心频率调节到带边处,则可获得更大的延迟。这种光学延迟线可望应用在全光缓存、全光开关以及量子远程相干通信等领域。

4 结 论

采用传输矩阵的方法导出了串联相同微环谐振器的传输光谱表达式,研究了环数、环间耦合系数以及损耗对环的输出特性的影响,指出通过适当地选择环数、环间耦合系数,不仅可以实现滤波的功能,而且还可以实现波分复用器的功能。通过对高斯激光脉冲的传输进行数值模拟发现,利用串联微环谐振器可以实现光学延迟。

参 考 文 献

- 1 Han Xiyou, Pang Fufei, Cai Haiwen *et al.*. An integrated optical device-waveguide ring resonator [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2004, **41**(8):26~31
韩秀友,庞拂飞,蔡海文等. 环形波导谐振腔集成光学器件[J]. *激光与光电子学进展*, 2004, **41**(8):26~31
- 2 Xiyou Han, Feng Liu, Fufei Pang *et al.*. Polarization dependent characteristics of a racetrack waveguide resonator

- fabricated by ion exchange in K9 glass [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(7):393~396
- 3 Dong Xiaowei, Pei Li, Jian Shuisheng. Transfer matrix method for analyzing the characteristics of multiple-ring higher order microring resonators [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):929~932
董小伟, 裴丽, 简水生. 传输矩阵法分析多环高阶谐振滤波器特性[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):929~932
- 4 Han Xiyou, Pang Fufei, Cai Haiwen *et al.*. Optical waveguide ring resonator filter by using ion-exchanged glass [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7):1053~1056
韩秀友, 庞拂飞, 蔡海文 等. 一种离子交换制备的玻璃光波导谐振腔滤波器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(7):1053~1056
- 5 B. E. Little, S. T. Chu, H. A. Haus *et al.*. Microring resonator channel dropping filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(6):998~1005
- 6 A. A. Tovar, L. W. Casperson. Generalized Sylvester theorems for periodic applications in matrix optics [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1995, **12**(3):578~590
- 7 J. E. Heebner, V. Wong, A. Schweinsberg *et al.*. Optical transmission characteristics of fiber ring resonators [J]. *J. Quantum Electron.*, 2004, **40**(6):726~730

Chinese Optics Letters (《中国光学快报》)“纳米光学”专题 征 稿 启 事

纳米科学与技术的快速发展对许多学科产生了巨大影响,尤其是激光与光学领域。*Chinese Optics Letters* (《中国光学快报》)计划于2008年10月推出“纳米光学”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“纳米光学”方面原创性的研究论文,旨在集中报道该方面最新的研究成果及研究进展,以引起国内外广大科研工作者的更大关注。

征稿范围包括:

- Quantum dots and nanowires
- Photonic crystals
- Silicon photonics
- Solar cells and solar energy
- VCSELs
- Slow light and fast light
- Plasmonics
- Other

Feature Editors:

Connie Chang-Hasnain

John R. Whinnery Chair Professor in

Electrical Engineering and Computer

Sciences

University of California

T. P. Lee

Telcordia Technologies (Retired)

截稿日期:2008年7月15日

投稿方式以及格式:可直接将稿件电子版发至邮箱:col@mail.shnc.ac.cn(主题标明“纳米光学专题投稿”),或通过网上投稿系统直接上传稿件(投稿类型选择 focus issue submission),详情请参见《中国光学快报》网站:<http://www.col.org.cn>。投稿必须是英文稿,其电子版请使用 Latex 或者 MS-Word 格式。有任何问题请发邮件至 col@mail.shnc.ac.cn 询问。