

文章编号: 0253-2239(2008)02-0285-05

# 集成马赫-曾德尔热光耦合器的可调谐振环优化设计

张晓阳 张 彤 季春玲 褚 丰 王 通 崔一平

(东南大学 电子科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

**摘要** 根据耦合模理论,推导出可调谐光波导谐振环的光强和相位传递函数的表达式,并分析了可调谐谐振环的传输特性。结果表明,谐振环中集成的马赫-曾德尔耦合器的参量设定和调谐方式直接影响谐振环的谐振频率移动范围和调制功率。通过改变耦合器参量对谐振环进行优化设计,在中心波长为 1550 nm 附近,谐振环半径 2 cm,传输损耗 0.08 dB/cm 的情况下,实现了清晰度和最佳谐振深度的调谐,谐振频率的移动范围低于 0.027 GHz,降低了谐振环对频率调制器的调频要求,同时降低了耦合器的调制功率。

**关键词** 集成光学; 可调谐振环; 传递函数; 谐振深度; 清晰度

**中图分类号** TN252; TN815 **文献标识码** A

## Optimized Design for Tunable Optical Waveguide Ring Resonator Integrated with Thermo-Optic Mach-Zehnder Interferometer

Zhang Xiaoyang Zhang Tong Ji Chunling Chu Feng Wang Tong Cui Yiping

(School of Electronic Science and Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

**Abstract** The transmission characteristics of optical waveguide ring resonator with tunable Mach-Zehnder interferometer (MZI) are analyzed. The formulas of the intensity and phase transfer functions are deduced according to the coupled-mode theory. It shows that the resonant frequencies shift range and the modulation power of Mach-Zehnder interferometer are heavily dependent on the parameters of Mach-Zehnder interferometer. An optimized design for ring resonator is demonstrated, the numerical ring modeling with the radius of 2 cm and the propagation loss of 0.08 dB/cm is performed around the central wavelength of 1550 nm, the resonant frequencies shift range is lower than 0.027 GHz, and the maximum notch depth is obtained, it means that the frequency modulator with small bandwidth can be used for the ring resonator and the finesse can be tuned with lower power.

**Key words** integrated optics; tunable ring resonator; transfer function; notch depth; finesse

## 1 引 言

光波导谐振环是集成光学领域的研究热点之一,是光波导陀螺、光开关、激光放大器、滤波器等光学器件的核心组成部分<sup>[1~9]</sup>。为了满足不同的用途和性能,可调谐清晰度和谐振深度的光波导谐振环成为目前研究的重点。调谐方法是在谐振环中集成耦合比可调的耦合器,对谐振环的谐振特性进行精确控制。目前常用的调制方法有以下几种:在谐振

环中集成热光或电光可调耦合器,通过波导的热光或电光效应调节耦合器的耦合比<sup>[1~4]</sup>;通过改变波导应力,微调耦合器耦合比的方法,实现对谐振环谐振特性的调谐<sup>[5]</sup>;在谐振环和耦合器中集成光放大器的方法,通过降低环形谐振腔和耦合器的插入损耗,调谐谐振环的清晰度<sup>[6]</sup>。热光效应是光波导材料普遍具备的性质,与具备电光效应的材料相比,具有低损耗,易实现,可控性好的特点,更加符合可调

收稿日期:2007-07-04; 收到修改稿日期:2007-08-23

基金项目: 部委项目(6906005001,6906002043)和教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-05-0465)资助课题。

作者简介: 张晓阳(1983-),男,黑龙江牡丹江人,硕士研究生,主要从事集成光学器件方面的研究。

E-mail: zxycom@163.com

导师简介: 张 彤(1967-),男,教授,博士生导师,主要从事集成光学理论与器件等方面的研究。

E-mail: tonnyz@263.net

谐振环的设计需要,是目前的一个研究热点<sup>[1~4,10]</sup>。具有对称结构的马赫-曾德尔热光可调耦合器是应用最广泛的一种结构。但是,目前文献中介绍的谐振环设计,并没有针对马赫-曾德尔耦合器的结构进行优化设计,加大了器件的制造难度和调制功率。本文针对集成马赫-曾德尔耦合器的光波导谐振环进行了详细分析,得到了马赫-曾德尔耦合器结构参量和谐振环传输特性的关系,并通过对耦合器参量的优化设计,减小了器件的调制功率和谐振环对频率调制器调频带宽的要求,实现了谐振环谐振性能的优化。

## 2 可调谐波导谐振环的结构和调谐原理

图 1 是可调谐谐振环的结构示意图。

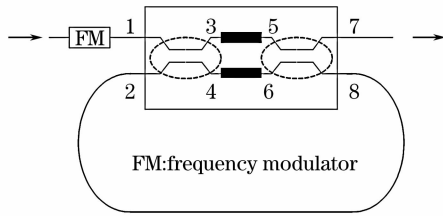


图 1 可调谐谐振环的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of tunable ring resonator

可调谐谐振环主要包括频率调制器,马赫-曾德尔耦合器和环形谐振腔三部分。入射光经过频率调制器 FM,进入马赫-曾德尔耦合器的 1 端,按一定的耦合比  $K$ ,分别进入谐振环和输出端 7。光信号在环中传输,最终形成稳定的输出信号。马赫-曾德尔耦合器由 2 个相位调制器和 2 个对称结构的定向耦合器组成,在相位调制器上加一定功率的电信号,改变波导 5,6 端输出光信号的相位差,控制耦合比  $K$ 。由于耦合比连续可调,当马赫-曾德尔耦合器的耦合比满足<sup>[9]</sup>

$$K = K_r = 1 - (1 - r_0) \exp(-2\alpha L) \quad (1)$$

时,谐振环达到最佳谐振深度,当耦合比继续减小时,谐振环的清晰度随之增大。式中, $K_r$  是最佳耦合比, $r_0$  是马赫-曾德尔耦合器的插入损耗, $\alpha$  是环形波导的振幅衰减系数, $L$  是波导环的长度。谐振环的自由光谱范围和清晰度如下:

$$R_{FS} = c/(nL), \quad (2)$$

$$F = \frac{R_{FS}}{\delta f_{1/2}} = \pi \left[ 2 \arcsin \frac{1 - A^{1/2}}{\sqrt{2(1 + A)}} \right], \quad (3)$$

$$A = (1 - K)(1 - r_0) \exp(-2\alpha L), \quad (4)$$

马赫-曾德尔耦合器的耦合比:

$$K = 4(1 - k)k \cos^2 \left( \frac{\varphi_5 - \varphi_6}{2} \right), \quad (5)$$

式中  $n$  是环形波导的有效折射率, $c$  是真空中光速, $k$  是两个方向耦合器的耦合比,当  $k = 0.5$  时,马赫-曾德尔耦合器的耦合比在  $0 \sim 1$  之间可调,即为马赫-曾德尔光开关。 $\varphi_5$ 、 $\varphi_6$  是光信号经过两个相位调制器后,相位的变化值。

耦合器输出端 8 处光信号的相对光强

$$|E_8/E_1|^2 = \frac{(1 - r_0)K}{1 + A - 2A^{1/2} \cos(\beta L + \varphi_{82})}, \quad (6)$$

当  $\cos(\beta L + \varphi_{82}) = \pm 1$  时,分别得到  $|E_8|_{\max}^2$ 、 $|E_8|_{\min}^2$ ,式中  $\varphi_{82}$  为光信号由 2 端输入马赫-曾德尔耦合器,传输至 8 端的相位变化值。由此可以推导出当谐振环处于谐振状态时,相位匹配条件为

$$\beta L + \varphi_{82} = 2m\pi, \quad m = 1, 2, \dots \quad (7)$$

且

$$\beta L = 2\pi n L f / c, \quad (8)$$

$f$  是对应的光信号的谐振频率。由(6)~(8)式得到谐振环的谐振频率

$$f = \frac{\beta L c}{2\pi n L} = \frac{(2m\pi - \varphi_{82})c}{2\pi n L}, \quad (9)$$

由(9)式可知,当改变耦合比  $K$  时,谐振环的谐振频率会随着  $\varphi_{82}$  的变化而产生移动,且与其他分量无关。根据马赫-曾德尔耦合器内光信号的传递规则推导出信号由 2 端输入,到达 8 端的电场和相位变化值:

$$\frac{E_{82}}{E_2} = k \exp[i(\varphi_5 - \pi)] + (1 - k) \exp(i\varphi_6), \quad (10)$$

$$\arg(E_{82}/E_2) = \varphi_{82} = \begin{cases} \arctan \frac{-k \sin \varphi_5 + (1 - k) \sin \varphi_6}{B}, & B \geq 0 \\ \pi + \arctan \frac{-k \sin \varphi_5 + (1 - k) \sin \varphi_6}{B}, & B < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$B = -k \cos \varphi_5 + (1 - k) \cos \varphi_6,$$

由(11)式可知,当调谐耦合比时, $\varphi_5$ 、 $\varphi_6$  的变化将引起  $\varphi_{82}$  的变化,从而使谐振环的谐振频率发生移动(文献[3,4]中的实验结果和推导是吻合的)。此时,需要利用频率调制器 FM<sup>[8]</sup>对入射光信号调频,使谐振环重新工作在谐振频率。因此,减小谐振频率移动的范围可以降低谐振环对频率调制器 FM 调频带宽的要求。

### 3 谐振环的优化设计

根据热光调制的原理<sup>[3,10]</sup>可知,加热器应加载于马赫-曾德尔耦合器的一臂,以实现最高的调制效率。首先讨论加热电极位于波导 5。 $\varphi_0$  是  $\varphi_5$ 、 $\varphi_6$  的初始值, $\Delta\varphi = \varphi_6 - \varphi_5$ , $\varphi_6 = \varphi_0$  不变。则(11)式化简为:

$$\varphi_{82} = \begin{cases} \arctan \frac{-k\sin(\varphi_0 - \Delta\varphi) + (1-k)\sin\varphi_0}{B'}, & B' \geq 0 \\ \pi + \arctan \frac{-k\sin(\varphi_0 - \Delta\varphi) + (1-k)\sin\varphi_0}{B'}, & B' < 0 \end{cases}$$

$$B' = -k\cos(\varphi_0 - \Delta\varphi) + (1-k)\cos\varphi_0,$$

$$\Delta\varphi \in (0, \pi).$$
(12)

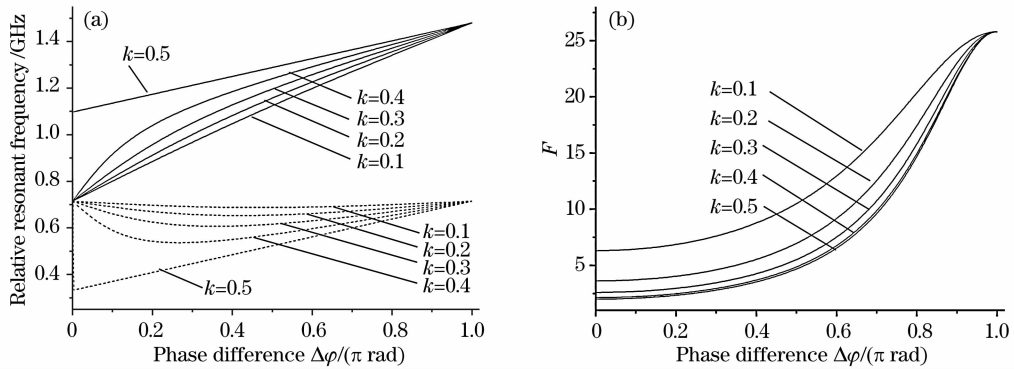


图 2 谐振频率(a),清晰度(b)和相位差  $\Delta\varphi$  的关系曲线

Fig. 2 Relationship between resonant frequencies (a), finesse (b) and phase difference  $\Delta\varphi$

图 2(a)中,虚线是对波导 5 进行相位调制时, $k$  分别取 0.1~0.5 时,谐振频率随相位差  $\Delta\varphi$  的变化范围,实线是对波导 6 进行相位调制时, $k$  分别取 0.1~0.5 时,谐振频率相应的变化范围。由图 2(a)可知,对波导 6 调制时,谐振频率变化范围均很大,而对波导 5 调制时, $k$  越小,谐振频率的移动范围就越小。当  $k = 0.1$  时,谐振频率的移动范围仅为 0.027 GHz,同时,由(1)式、(5)式限定  $k$  值的最小值,使谐振环可调谐至最佳谐振深度:

$$4(1-k)k \geq K_r. \quad (14)$$

当耦合器的耦合比减小时,清晰度会随着  $\Delta\varphi$  的增加而增大,由(3)式得到图 2(b)。

图 2(b)是  $k$  分别取 0.1~0.5 时,清晰度和  $\Delta\varphi$  的关系曲线,由图 2(b)可知,当获得相同清晰度的谐振环时, $k$  越小,所需要的  $\Delta\varphi$  越小,马赫-曾德尔耦合器的调制功率也随之减小。

结合图 2 对耦合器进行优化设计:令加热电极位于波导 5,并减小  $k$  的设计值。且当  $k$  减小至

在计算的频率范围内,可以忽略不同频率对应的  $\varphi_0$ 、 $n$ 、 $k$  的微小变化,则(11)式中其中唯一自变量为  $\Delta\varphi$ ,将(12)式代入(9)式,并对(9)式求导,令  $df/d\Delta\varphi = 0$ ,解得

$$-k^2 + k(1-k)\cos\Delta\varphi = 0, \quad (13)$$

由(13)式可知,谐振频率  $f$  的变化范围仅与  $k$ 、 $\Delta\varphi$  有关,当  $\Delta\varphi \in (0, \pi)$  变化时,谐振频率  $f$  的移动范围取决于  $k$  的设计值。同理,可推导出加热电极位于波导 6 时  $f$  的变化范围。设定谐振环参量如下,输入中心波长在 1550 nm 附近,谐振环的半径为 2 cm,波导芯层有效折射率 1.56,环内波导传输损耗  $2\alpha = 0.08 \text{ dB/cm}$ ,耦合器插入损耗  $r_0 = 0.01$ ,由(9)式、(12)式得到图 2(a)。

$4(1-k)k = K_r$  时,谐振环可调谐至最佳谐振深度,并可以较小的调制功率获得高清晰度的谐振环,同时满足谐振频率移动范围最小。

### 4 软件仿真

利用文献[11]中介绍的仿真方法,用 Matlab 软件建立谐振环数值模型。利用多光束干涉的理论模拟谐振环的传输特性。光信号中心波长在 1550 nm 附近,TE 模,波导尺寸满足单模传输,波导材料为各向同性介质,满足弱导条件,其他参量设定同上,得到图 3。图 3(a)~图 3(c)中马赫-曾德尔耦合器的参量设定分别为: $k = 0.5$ ,加热电极加载于波导 5; $k = 0.1$ ,加热电极加载于波导 6; $k = 0.1$ ,加热电极加载于波导 5。当谐振环工作在最佳谐振深度( $F = 13$ )时, $\Delta\varphi$  分别为:0.78 $\pi$  rad、0.6 $\pi$  rad、0.6 $\pi$  rad。由于耦合器的调制功率和  $\Delta\varphi$  成正比关系,所以,得到相同清晰度的谐振环时, $k = 0.1$  时耦合器的调制功率明显低于  $k =$

0.5的耦合器。同时,图3(c)中不同清晰度对应的谐振峰频移明显小于图3(a)和图3(b)。表明对马

赫-曾德尔耦合器参量优化之后[图3(c)],谐振环的性能得到了明显的改善。

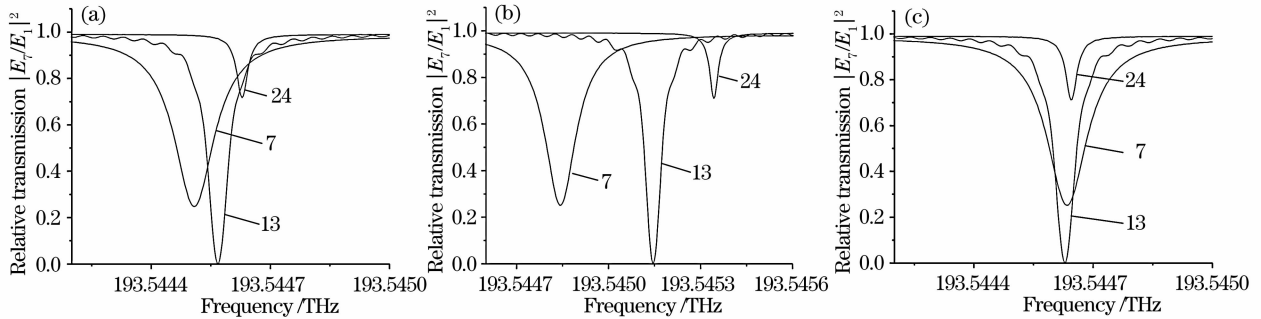


图3 不同耦合器参量对应的谐振频率移动

Fig. 3 Resonant frequencies shift with different parameters of MZI

## 5 工艺制作容差分析

由(3)式~(5)式可知,波导的传输损耗和耦合器的插入损耗影响可调谐振环的清晰度,应针对方向耦合器的结构进行优化设计,减小耦合长度,降低谐振环的整体损耗,提高谐振环清晰度。同时还应考虑制作容差对谐振环性能的影响:1)方向耦合器耦合比的制作容差;2)波导传输损耗的制作容差。

图4是不同谐振环周长 $L$ 下、传输损耗和谐振环最佳耦合比 $K_r$ 的关系,弯曲波导传输损耗一般小于 $0.1\text{ dB/cm}$ <sup>[3,7]</sup>。由图4示可知,通常尺寸的可调谐振环的 $K_r$ 均小于 $0.25$ 。因此,只要确保马赫-曾德尔(MZI)可调耦合器的可调范围 $K \in (0, 0.3)$ ,即可实现器件最佳谐振深度、清晰度的连续调谐。

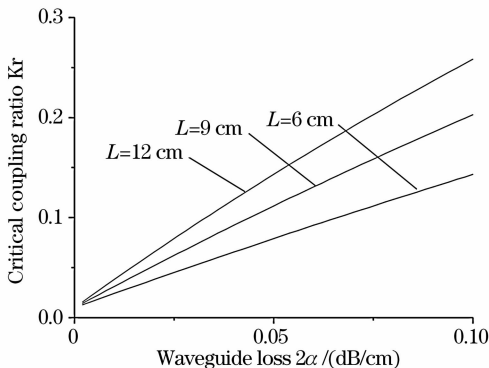


图4 传输损耗和谐振环最佳耦合比 $K_r$ 的关系曲线

Fig. 4 Relationship between critical coupling ratio and waveguide loss

图5是 $k$ 对应的马赫-曾德尔耦合器耦合比 $K$ 的可调范围。当 $k$ 近似等于 $0.1(\pm 0.02)$ 时即可实现马赫-曾德尔耦合器具有较大的可调范围,确保 $K_r < K$ 。低耦合比的耦合器更容易制备,对耦合长度和波导最短间距的要求均可放宽。利用

Optiwave公司的3D-BPM软件模拟,当波导材料满足弱导耦合条件时,耦合长度 $500\ \mu\text{m}$ ,两波导最小间距 $6\ \mu\text{m}$ ,即可实现耦合比 $k \approx 0.1$ 。

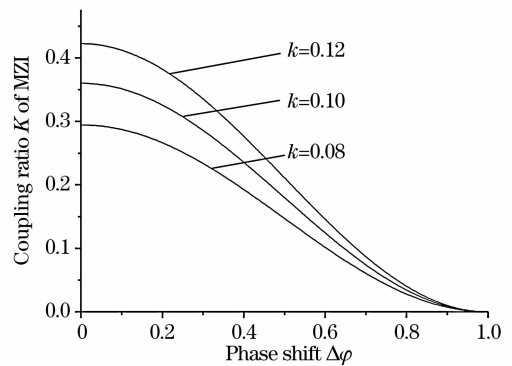


图5 不同参量 $k$ 对应的马赫-曾德尔耦合器耦合比可调范围

Fig. 5 Tunable ranges of MZI with different  $k$

## 6 结 论

给出了可调谐光波导谐振环的光强和相位传递函数的通用公式,解释了可调谐振环工作时谐振频率移动的原因。并针对应用广泛的集成马赫-曾德尔热光耦合器的可调谐振环进行了原理分析和参量优化。通过优化设计之后,自由谱线宽度为 $1.5\text{ GHz}$ 的谐振环在工作时,谐振频率移动范围小于 $0.027\text{ GHz}$ ,同时降低了耦合器的调制功率。最后结合集成光学器件的制作工艺,讨论了优化可调谐振环性能的方法。这种经过优化设计的谐振环结构可以在一定程度上改善激光选模器、滤波器,对角速度敏感的光波导陀螺等器件的传输性能,并降低器件的制造成本和难度。

## 参 考 文 献

1 Amnon Yariv. Critical coupling and its control in optical

- waveguide-ring resonator systems[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(4): 483~485
- 2 William M. J. Green, Reginald K. Lee, Guy A. DeRose *et al.*. Hybrid InGaAsP-InP Mach-Zehnder racetrack resonator for thermo-optic switching and coupling control[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(5): 1651~1659
- 3 Toshimi Kominato, Yoshinori Hibino, Katsuhide Onose. Silica-based finesse-variable ring resonator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(5): 560~562
- 4 Hidenori Takahashi, Kohsuke Nishimura, Masashi Usami. Tunable chromatic dispersion compensator utilizing silica waveguide ring resonator having Mach-Zehnder interferometric variable coupler eliminating crossing point of waveguides[C]. *Lasers and Electro-Optics Society*, 2002, LEOS 2002. *The 15th Annual Meeting of the IEEE*, 2002, **2**: 665~666
- 5 John E. Heebner, Vincent Wong, Aaron Schweisberg *et al.*. Optical transmission characteristics of fiber ring resonators[J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 2004, **40**(6): 726~730
- 6 Han Xiuyou, Pang Fufei, Sun Guoyong *et al.*. Analysis on filter characteristics of active waveguide ring resonator[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1357~1361  
韩秀友, 庞拂飞, 孙国勇等. 有源波导环形谐振腔滤波特性分析[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10): 1357~1361
- 7 Kenya Suzuki, Koichi Takiguchi, Kazuo Hotate. Monolithically integrated resonator microoptic gyro on silica planar lightwave circuit[J]. *IEEE J. Lightwave Technology*, 2000, **18**(1): 66~72
- 8 Yao Qiong, Hu Yongming, Xie Yuanping *et al.*. Study on square-wave frequency modulation of resonator fiber optic gyroscope[J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(4): 503~505  
姚琼, 胡永明, 谢元平等. 谐振型光纤陀螺方波频率调制方法[J]. *光学技术*, 2005, **31**(4): 503~505
- 9 Zhang Shaoxian, Zeng Xuefei, Liu Yongzhi. A kind of optical gyroscope structure based on ring resonator and Mach-Zehnder interference[J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 117~120  
张少先, 曾雪飞, 刘永智. 谐振腔马赫曾德尔干涉集成光波导陀螺[J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 117~120
- 10 Qi Ming, Zhang Xinliang, Huang Dexiu. Tunable differential phase-shift keying demodulator using the Mach-Zehnder interferometer[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(12): 1643~1647  
齐鸣, 张新亮, 黄德修. 可调马赫-曾德尔干涉仪型差分相移键控解调器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(12): 1643~1647
- 11 Xiaoyang Zhang, Chunling Ji, Tong Zhang *et al.*. Analysis of ring resonator of integrated optical waveguide gyroscope[C]. *Proc. SPIE*, 2007, **6722**: 6722M-1