

文章编号: 0253-2239(2010)07-2098-06

可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性研究

张佳宁 韩秀友 宋红妍 滕 婕 吴彭生 王凌华 赵明山

(大连理工大学物理与光电工程学院光子技术研究中心, 辽宁 大连 116024)

摘要 对马赫-曾德尔干涉仪(MZI)构成的可调耦合器结构集成波导微环谐振腔延时特性进行了分析,推导出该结构微环谐振腔的延时响应函数。研究表明马赫-曾德尔干涉仪两臂相位差的变化在实现微环谐振腔等效耦合系数可调谐的同时,其引起的附加相位改变将造成波导微环谐振腔谐振频率发生漂移。分析了马赫-曾德尔干涉仪中 3 dB 耦合器耦合系数偏差对等效耦合系数调谐范围以及微环谐振腔谐振频率漂移的影响。以四环级联微环谐振腔为例,分析了附加相位改变对延时响应的影响,通过采用环波导上相位修正的方法,获得了延时量为 0.6 ns,延时带宽为 2 GHz,延时抖动品质因子小于 $1 \times 10^{-3} \text{ ns}^2$ 的目标延时响应。

关键词 微波光子学;光延时线;集成波导微环谐振腔;马赫-曾德尔干涉仪;耦合系数

中图分类号 TN252 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2098

Study on Time Delay Characteristics of Integrated Waveguide Microring Resonator with Tunable Coupler

Zhang Jianing Han Xiuyou Song Hongyan Teng Jie Wu Pengsheng
Wang Linghua Zhao Mingshan

(Photonics Research Center, School of Physics & Optoelectronic Engineering,
Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract The time delay characteristics of integrated waveguide microring resonator with tunable coupler constructed by the Mach-Zehnder interferometer (MZI) is analyzed, and the time delay response function is deduced. The results show that the variation of the phase difference between the two arms of MZI tunes the equivalent coupling coefficient of the microring resonator, and it also changes the additional phase of the tunable coupler, which makes the resonant frequency shift of the microring resonator. The influence of the discrepancy of coupling coefficients of the 3 dB couplers in MZI on the tuning range of the equivalent coupling coefficient and the resonant frequency shift of the microring resonator is also presented. By amending the phase of ring waveguide, the target delay time of 0.6 ns, bandwidth of 2 GHz, and delay time ripple metric less than $1 \times 10^{-3} \text{ ns}^2$ are obtained with cascaded four microring resonators.

Key words microwave photonics; optical delay line; integrated waveguide microring resonator; Mach-Zehnder interferometer (MZI); coupling coefficient

1 引 言

集成波导微环谐振腔具有优异的滤波性能、紧凑的结构和高度的集成性等优点,以它为主体可以构成各种不同功能的集成光子学器件,如光分插复

用器、陷波滤波器、高速调制器、光开关和波导传感器等,在新一代全光通信系统和集成光学传感器系统中,具有十分重要和广阔的应用前景^[1~5]。同时,集成波导微环谐振腔利用其对光波的谐振效应,可

收稿日期: 2009-08-12; 收到修改稿日期: 2009-09-22

基金项目: 国家自然科学基金(60807015, 60577014)和教育部高校博士点新教师基金(200801411037)资助课题。

作者简介: 张佳宁(1985—),女,硕士研究生,主要从事集成光子学器件设计、制备及应用研究。

E-mail: zhangjianing1023@yahoo.com.cn

导师简介: 韩秀友(1977—),男,博士,副教授,主要从事集成光电子器件及其在光通信、光传感和微波光子学等方面的应用研究。E-mail: xiuyouhan@gmail.com(通信联系人)

使光波在环形腔内往返多次传输从而对光波产生一定的延时^[6]。通过合理设计微环谐振腔结构和级联一定数目的微环谐振腔可以达到对延时量的连续可调与控制。基于微环谐振腔结构的集成光波导光延时线已成为近年来微波光子学领域中光控波束形成网络技术研究的热点之一^[7~9]。为了实现微环谐振腔集成光波导光延时线对延时量的连续可控制,其耦合器的耦合系数应具有可调谐功能,而采用基于微机电系统(MEMS)技术的垂直耦合器结构^[10]、基于热光/电光效应的平面定向耦合器结构^[11,12]以及马赫-曾德尔干涉仪(MZI)耦合器结构^[13~15]等技术都可以实现耦合系数的调谐功能。其中基于 MZI 结构的耦合器突破了传统定向耦合器结构中波导间距小、耦合系数不易控制的局限,通过改变干涉仪两臂的相位差即可实现耦合系数的调谐,具有极大的灵活性,同时也降低了器件制备工艺的复杂性和难度。

基于 MZI 耦合器结构的波导微环谐振腔器件已有报道^[13~15],然而 MZI 对耦合器附加相位以及微环谐振腔延时响应特性的影响尚未见到系统的研究报告。本文对基于 MZI 可调耦合器结构集成光波导微环谐振腔的延时特性进行了系统研究,推导出其延时响应函数,分析了 MZI 两臂相位差的变化对可调耦合器附加相位的影响以及致使光波导微环谐振腔谐振频率的漂移量。

2 MZI 耦合器结构集成波导微环谐振腔的延时响应函数

基于 MZI 耦合器结构的集成光波导微环谐振腔如图 1 所示。由两个定向耦合器相连组成的等臂长 MZI 作为集成波导微环谐振腔的可调耦合器,其中两个定向耦合器的交叉强度耦合系数均为 κ_i ,相移器置于干涉仪的一臂上(利用波导的热光或电光效应实现相位的改变),相移器提供的相移量 θ 的改变将使得 MZI 耦合器等效耦合系数发生变化,进而实现波导微环谐振腔耦合系数的调谐;为了实现延时量的可控调谐,另一相移器置于环波导上,提供大小为 φ 附加相移。

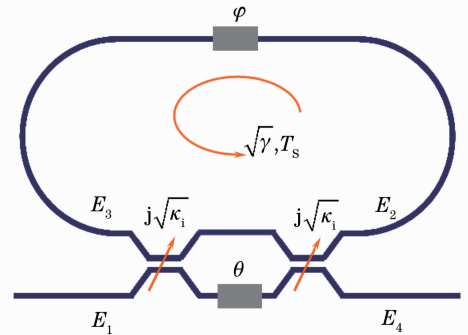


图 1 可调集成波导微环谐振腔结构示意图

Fig. 1 Schematic map of the tunable integrated waveguide microring resonator

根据传输矩阵理论^[16],图 1 中 MZI 的输出和输入光场满足以下关系

$$\begin{bmatrix} E_2 \\ E_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{1-\kappa_i} & j\sqrt{\kappa_i} \\ j\sqrt{\kappa_i} & \sqrt{1-\kappa_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\kappa_i} & j\sqrt{\kappa_i} \\ j\sqrt{\kappa_i} & \sqrt{1-\kappa_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ E_1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

将式中的各个矩阵相乘,即可得到 MZI 的传输矩阵 \mathbf{M} ,其阵元分别为

$$\begin{aligned} M_{11} &= \exp(-j\theta/2) [(1-\kappa_i)\exp(j\theta/2) - \kappa_i\exp(-j\theta/2)], \\ M_{12} &= \exp(-j\theta/2) [j\sqrt{\kappa_i(1-\kappa_i)}\exp(-j\theta/2) + j\sqrt{\kappa_i(1-\kappa_i)}\exp(j\theta/2)], \\ M_{21} &= \exp(-j\theta/2) [j\sqrt{\kappa_i(1-\kappa_i)}\exp(-j\theta/2) + j\sqrt{\kappa_i(1-\kappa_i)}\exp(j\theta/2)], \\ M_{22} &= \exp(-j\theta/2) [(1-\kappa_i)\exp(-j\theta/2) - \kappa_i\exp(j\theta/2)]. \end{aligned} \quad (2)$$

对上式中的阵元进行化简,可以得到

$$\mathbf{M} = \exp(-j\theta/2) \begin{bmatrix} \exp(j\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{1-\kappa} & j\sqrt{\kappa} \\ j\sqrt{\kappa} & \sqrt{1-\kappa} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(-j\theta) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中

$$\kappa = 4\kappa_i(1-\kappa_i)\cos^2(\theta/2), \quad (4)$$

$$\Theta = \arctan\left[\frac{\tan(\theta/2)}{(1-2\kappa_i)}\right]. \quad (5)$$

将(4)式称为 MZI 的等效耦合系数。根据(5)式,当 MZI 中定向耦合器为 3 dB 分束时(即 $\kappa_i = 0.5$),可得 $\Theta = \pi/2$ 。

光场在环波导中的传输关系式为

$$E_3 = \sqrt{\gamma} \exp[-j(\omega T_s + \varphi)] E_2, \quad (6)$$

式中 φ 是环波导上的附加相移, γ 为环形谐振腔波导的强度损耗因子, $T_s = nL/c$ 为光波绕环一周所需的

时间, n 为波导的有效折射率, L 为波导微环的周长。

由(1),(3)和(6)式可以推导得出 MZI 耦合器结构集成波导微环谐振腔的光场传输函数为

$$H(\omega) = \frac{E_4}{E_1} = \frac{\sqrt{1-\kappa} \exp[-j(\Theta + \theta/2)] - \sqrt{\gamma} \exp[-j(\omega T_s + \varphi + \theta)]}{1 - \sqrt{\gamma} \sqrt{1-\kappa} \exp[-j(\omega T_s + \varphi - \Theta + \theta/2)]}. \quad (7)$$

进而推导得出其相位响应函数为

$$\Phi(\omega) = \arctan \left\{ \frac{\text{Im}[H(\omega)]}{\text{Re}[H(\omega)]} \right\} = \arctan \left[\frac{-\sqrt{1-\kappa}(1+\gamma) \sin(\Theta + \theta/2) - \sqrt{\gamma}(1-\kappa) \sin(\omega T_s + \varphi - 2\Theta) + \sqrt{\gamma} \sin(\omega T_s + \varphi + \theta)}{\sqrt{1-\kappa}(1+\gamma) \cos(\Theta + \theta/2) - \sqrt{\gamma}(1-\kappa) \cos(\omega T_s + \varphi - 2\Theta) - \sqrt{\gamma} \cos(\omega T_s + \varphi + \theta)} \right], \quad (8)$$

则 MZI 耦合器结构集成波导微环谐振腔的延时响应函数为

$$\tau(\omega) = -\frac{d\Phi(\omega)}{d\omega} = \frac{T_s}{2} \frac{1 - \gamma(1 - \kappa)}{1 + \gamma(1 - \kappa) - 2\sqrt{1 - \kappa}\sqrt{\gamma} \cos(\omega T_s + \varphi - \Theta + \frac{\theta}{2})} + \frac{T_s}{2} \frac{\gamma - (1 - \kappa)}{(1 - \kappa) + \gamma - 2\sqrt{1 - \kappa}\sqrt{\gamma} \cos(\omega T_s + \varphi - \Theta + \frac{\theta}{2})}. \quad (9)$$

3 MZI 耦合器对集成波导微环谐振腔延时特性的影响

将(7)式改写为

$$H(\omega) = \frac{\sqrt{1-\kappa} - \sqrt{\gamma} \exp[-j(\omega T_s + \varphi - \Theta + \frac{\theta}{2})]}{1 - \sqrt{\gamma} \sqrt{1-\kappa} \exp[-j(\omega T_s + \varphi - \Theta + \frac{\theta}{2})]} \exp[-j(\Theta + \frac{\theta}{2})]. \quad (10)$$

将(10)式和(9)式与直接由定向耦合器构成的集成波导微环谐振腔的光场传输函数和延时响应函数^[17]比较,可以看出 MZI 耦合器结构对集成光波导微环谐振腔产生了附加相位 Ψ_1 和 Ψ_2 , 分别为

$$\Psi_1 = -\Theta + \theta/2, \quad (11)$$

$$\Psi_2 = \Theta + \theta/2. \quad (12)$$

因此基于 MZI 耦合器结构的集成波导微环谐振腔可以等效为图 2 所示的集成波导微环谐振腔。其中耦合器的耦合系数为 MZI 的等效耦合系数; 附加相位 Ψ_1 作用于环波导上, 将会对环形腔的谐振频率产生偏移, 同时会影响到谐振频率及其附近频率延时量的大小; 附加相位 Ψ_2 作用于直波导上, 将对经过该直波导的所有频率分量产生附加相位。

为了实现图 2 所示集成波导微环谐振腔等效耦合系数 κ 在(0, 1)范围内的连续可调, 根据 MZI 的工作特性, 在构成 MZI 的两个定向耦合器为 3 dB 分束的条件下(即 $\kappa_i = 0.5$), MZI 干涉臂上相移量 θ 的应在(0, π)范围可调, 由(11)式可以看出附加相位 Ψ_1 将随着相移量 θ 的变化而改变。因此, 在实

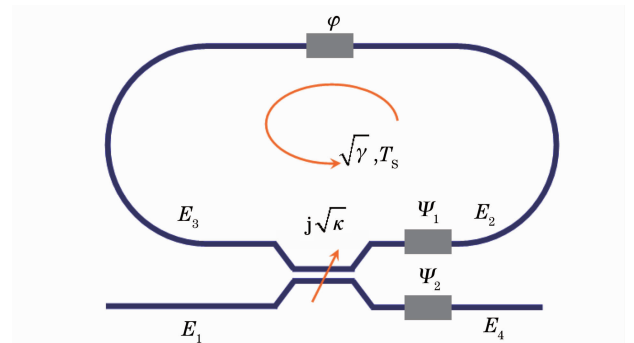


图 2 等效的集成波导微环谐振腔结构示意图
Fig. 2 Schematic map of the equivalent integrated waveguide microring resonator

现图 2 所示等效耦合系数调谐的同时, 附加相位 Ψ_1 将对波导微环谐振腔的谐振频率产生偏移。

在不考虑环波导上附加相移 φ 的情况下, 通常光波导微环谐振腔谐振频率应满足

$$\omega_{R0} T_s = 2m\pi, \quad (13)$$

式中 m 为谐振级数, $\omega_{R0} = 2\pi f_{R0}$, f_{R0} 为谐振频率。由于 MZI 耦合器引入了附加相位 Ψ_1 , 则该集成波

导微环谐振腔的谐振频率应满足

$$\omega_R T_s + \Psi_1 = 2m\pi. \quad (14)$$

对于同一谐振级数 m , 由 MZI 耦合器的附加相位 Ψ_1 引起的谐振频率偏移量为

$$\Delta f = f_R - f_{R0} = -\Psi_1 / (2\pi T_s). \quad (15)$$

对于实际制备的光波导器件, 由于光波导材料或制备工艺等因素, MZI 中定向耦合器的分束比可能会偏离 3 dB, 即耦合系数 κ_i 与 0.5 会有一定的偏差。图 3 给出了 MZI 中定向耦合器耦合系数 κ_i 与 0.5 偏离 ± 0.1 的范围内, MZI 等效耦合系数随相移量 θ 变化的关系曲线。由图 3 可以看出, $\kappa_i = 0.5$ 时, 相移量 θ 在 $0 \sim \pi$ 范围内变化, 可以实现等效耦合系数 κ 在 $1 \sim 0$ 范围内调谐; $\kappa_i = 0.4$ 与 0.6 的曲线及 $\kappa_i = 0.45$ 与 0.55 的曲线分别重合, 这与(4)式相对应, 当 κ_i 与 0.5 有偏差时, MZI 等效耦合系数不能实现 $(0, 1)$ 范围的调谐, 其最大等效耦合系数数值将小于 1, 定向耦合器耦合系数的偏差越大, 其最大等效耦合系数越小(从图 3 中的插图可以清晰地看出), 因此需要严格控制波导材料参数和制备工艺条件, 使得 MZI 中定向耦合器耦合系数的偏差尽可能小。

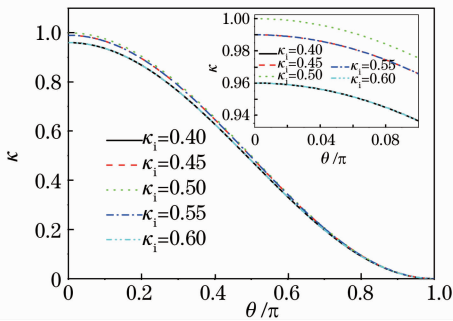


图 3 不同定向耦合器耦合系数 κ_i 下 MZI 等效耦合系数 κ 随相移量 θ 变化的关系曲线

Fig. 3 Variation curves of the equivalent coupling coefficient κ with the phase shift θ at different coupling coefficients κ_i of direction couplers in the MZI

如果 MZI 中 3 dB 定向耦合器的耦合系数存在偏差, 其产生的附加相位也将有所不同, 由(5)式可得

$$\Theta = \begin{cases} \arctan\left[\frac{\tan(\theta/2)}{(1-2\kappa_i)}\right], & \kappa_i \leq 0.5 \\ \pi - \arctan\left[\frac{\tan(\theta/2)}{(2\kappa_i-1)}\right], & \kappa_i > 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

以矩形截面有机硅杂化聚合物(PSQ)波导微环谐振腔为研究对象^[18], 取波导微环的周时延 $T_s = 0.08$ ns, 初始谐振频率为 $f_{R0} = 193.55$ THz, 根据(11), (15)和(16)式, 计算 MZI 中 3 dB 定向耦合器

耦合系数偏差对谐振频率偏移量 Δf 的影响绘于图 4。由图 4 可以看出当 $\kappa_i \leq 0.5$ 时, Δf 均为正值, $\kappa_i = 0.5$ 谐振频率偏移量 Δf 随着相移量 θ 的增加而线性减小; 当 $\kappa_i > 0.5$, Δf 均为负值, 且耦合系数偏差越大, 谐振频率偏移量 Δf 亦越大。

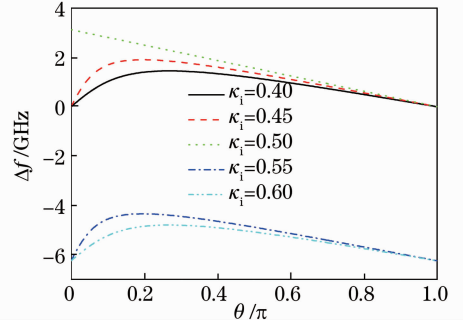


图 4 不同定向耦合器耦合系数 κ_i 下谐振频率偏移量 Δf 随相移量 θ 变化的关系曲线

Fig. 4 Variation curves of the resonant frequency shift Δf with the phase shift θ at different coupling coefficients κ_i of direction couplers in the MZI

4 MZI 耦合器结构波导微环谐振腔延时线的优化设计

由以上分析可以看出, MZI 结构代替传统的定向耦合器可以实现等效耦合系数的调谐, 但是 MZI 结构同时对集成波导微环谐振腔产生附加相位 Ψ_1 和 Ψ_2 (如图 2 所示)。因此, 在利用该结构集成波导微环谐振腔实现一定的延时目标时, 对环波导相移进行调谐的过程中, 必须考虑附加相位 Ψ_1 和 Ψ_2 的贡献。根据光延时线用于相控阵天线系统中为天线阵元提供相对延时补偿的特点, 作用于直波导上附加相位 Ψ_2 的贡献可以通过一个公共的参考相位来平衡掉, 在优化设计时可以只考虑 Ψ_1 的贡献。

以上述周时延为 $T_s = 0.08$ ns 的矩形截面聚合物 PSQ 集成波导微环谐振腔^[18] 作为延时单元, 取周损耗因子 $\gamma = 0.95$, 微环谐振腔的谐振光波频率 $f = 193.55$ THz, 来实现延时量 $T_D = 0.6$ ns, 延时带宽 $B = 2$ GHz 的延时目标。采用延时抖动品质因子为判据的优化设计方法^[17], 设延时抖动品质因子 $\epsilon_c = 1 \times 10^{-3}$ ns², 首先考虑由定向耦合器构成的集成波导微环谐振腔作为基本单元, 优化设计得到级联 4 个波导微环谐振腔即可实现该延时目标, 相应各个集成波导微环谐振腔的等效耦合系数 κ 和环波导上的附加相移 φ 如表 1 所示^[17]。

表 1 四环级联定向耦合器结构集成光波导微环谐振腔光延时线的结构参数

Table 1 Structural parameters of optical delay line with direction coupler based cascaded four integrated waveguide microring resonators

Parameter	Value
κ_1	0.6620
φ_1/π	0.6968
κ_2	0.7536
φ_2/π	-0.7771
κ_3	0.7679
φ_3/π	0.1077
κ_4	0.8253
φ_4/π	-0.5303

采用 MZI 耦合器结构集成光波导微环谐振腔实现以上延时目标,需要根据表 1 中得到的定向耦合器耦合系数由(4)式来确定 MZI 干涉臂上的相移量 θ ,同时考虑 MZI 附加相移 Ψ_1 的贡献来修正环波导的附加相移 φ ,设修正后的环波导上附加相移为 φ' ,则有

$$\varphi' = \varphi - \Psi_1 = \varphi + \Theta - \theta/2. \quad (17)$$

图 5 是未考虑 MZI 结构对微环波导附加相位 Ψ_1 的情况下(MZI 结构中的定向耦合器耦合系数为 $\kappa_i=0.5$)四环级联 MZI 耦合器结构集成光波导微环谐振腔光延时线的延时响应曲线。由图 5 可以看出,由于 MZI 结构对微环波导附加相位 Ψ_1 的作用,使得每个微环谐振腔的谐振频率发生偏移(其大小可由图 4 中 $\kappa_i=0.5$ 曲线确定),最终造成级联微环谐振腔的延时响应中心频率发生偏移,同时也造成延时带宽内较大的延时抖动。

考虑 MZI 结构对微环波导附加相位 Ψ_1 的贡献,对环波导的附加相移进行修正,表 2 给出了实现上述

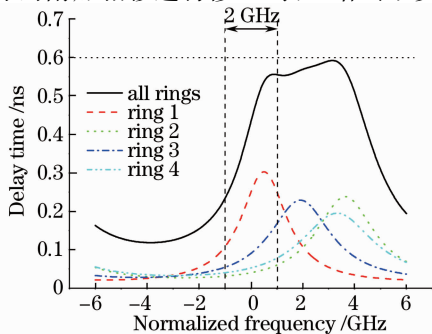


图 5 未考虑 MZI 附加相位 Ψ_1 时四环级联集成光波导微环谐振腔的延时响应曲线

Fig. 5 Delay time response curves of cascaded four integrated waveguide microring resonators without considering the additional phase Ψ_1 of MZI

目标延时 MZI 干涉臂上相移量 θ 以及修正后微环波导附加相移 φ' 的优化参数值。图 6 给出了优化修正的四环级联 MZI 耦合器结构集成光波导微环谐振腔的延时响应曲线,可以看出达到了延时目标。

表 2 四环级联 MZI 耦合器结构集成波导微环谐振腔光延时线的参数值

Table 2 Parameters of optical delay line with MZI coupler based cascaded four integrated waveguide microring resonators

Parameter	Value / π
θ_1	1.2408
φ'_1	-0.9504
θ_2	1.0389
φ'_2	-1.0514
θ_3	1.0053
φ'_3	-1.0681
θ_4	0.8624
φ'_4	-1.1396

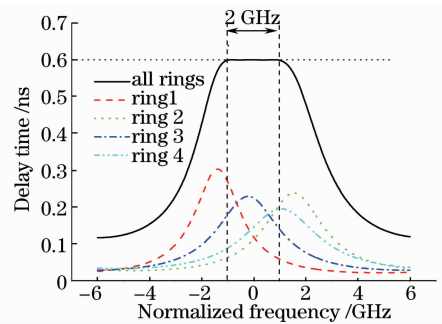


图 6 考虑 MZI 附加相位 Ψ_1 时四环级联集成光波导微环谐振腔的延时响应曲线

Fig. 6 Delay time response curves of cascaded four integrated waveguide microring resonators considering the additional phase Ψ_1 of MZI

5 结 论

对基于 MZI 可调耦合器结构的集成光波导微环谐振腔延时特性进行了分析,采用传输矩阵方法推导出该结构微环谐振腔的延时响应函数,研究表明利用 MZI 结构实现耦合系数调谐的同时,将对波导微环产生附加的相位作用,致使其谐振频率发生偏移。对 MZI 结构中定向耦合器耦合系数偏差对耦合系数调谐范围以及微环谐振腔谐振频率的影响进行了讨论。采用环波导上相位修正的方法,优化设计得出实现延时量为 0.6 ns,延时带宽为 2 GHz,延时抖动品质因子小于 $1 \times 10^{-3} \text{ ns}^2$ 的目标延时所需的四环级联微环谐振腔结构参数。

参 考 文 献

- 1 S. Otto. A decade of progress in microring and microdisk based photonic circuits: a personal selection [C]. *SPIE*, 2008, **6872**: 68720H
- 2 Tang Jianxiang, Jin Yaohui, Gao Yu *et al.*. Microring resonator optical switch for ultralow-latency interconnections[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(s2): 200~203
唐健雄, 金耀辉, 高煜等. 微环共振器光开关在高速互连中的应用[J]. *中国激光*, 2008, **35**(s2): 200~203
- 3 Qiang Li, Tong Ye, Yuanyuan Lu *et al.*. All-optical NRZ-to-AMI conversion using linear filtering effect of silicon microring resonator[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(1): 12~14
- 4 D. V. Katrien, B. Irene, S. Etienne *et al.*. Silicon-on-insulator microring resonator for sensitive and label-free biosensing[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(12): 7610~7615
- 5 Zhixuan Xia, Huaxiang Yi, Yao Chen *et al.*. Sensitivity and detection limit of dual-waveguide coupled microring resonator biosensors[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 598~600
- 6 G. Lenz, B. J. Eggleton, C. K. Madsen *et al.*. Optical delay lines based on optical filters[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2001, **37**(4): 525~532
- 7 M. S. Rasras, C. K. Madsen, M. A. Cappuzzo *et al.*. Integrated resonance-enhanced variable optical delay lines[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(4): 834~836
- 8 L. Zhuang, C. G. H. Roeloffzen, R. G. Heideman *et al.*. Single-chip ring resonator-based 1×8 optical beam forming network in CMOS-compatible waveguide technology[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(15): 1130~1132
- 9 M. Fakharzadeh, S. K. Chaudhuri, S. Safavi-Naeini. Optical beamforming with tunable ring resonators[C]. *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, 2008, **6**: 1~4
- 10 Jin Yao, David Leuenberger, Ming-Chang M. Lee *et al.*. Silicon microtoroidal resonators with integrated MEMS tunable coupler [J]. *IEEE J. Selected Topics in Quantum Electron.*, 2007, **13**(2): 202~208
- 11 R. C. Alfarness, R. V. Schmidt. Tunable optical waveguide directional coupler filter[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **33**(2): 161~163
- 12 Chandross, Edwin Arthur, Hale Artrua *et al.*. Tunable directional optical waveguide couplers [P]. United States Patent 6002823, 1999
- 13 T. Kominato, Y. Hibino, K. Onose. Silica-based finesse-variable ring resonator[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1993, **5**(5): 560~562
- 14 W. Green, R. Lee, G. DeRose *et al.*. Hybrid InGaAsP-InP Mach-Zehnder racetrack resonator for thermo-optic switching and coupling control[J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(5): 1651~1659
- 15 Zhang Xiaoyang, Zhang Tong, Ji Chunling *et al.*. Optimized design for tunable optical waveguide ring resonator integrated with thermo-optic Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(2): 285~289
张晓阳, 张彤, 季春玲等. 集成马赫-曾德尔热光耦合器的可调谐振环优化设计[J]. *光学学报*, 2008, **28**(2): 285~289
- 16 A. Yariv. Universal relations for coupling of optical power between microresonators and dielectric waveguides[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(4): 321~322
- 17 Han Xiuyou, Song Hongyan, Zhang Jianing *et al.*. Study on the integrated waveguide optical delay line based on microring resonators [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 782~786
韩秀友, 宁红妍, 张佳宁等. 微环谐振腔集成波导光延时线研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 782~786
- 18 Li Linke. Study of Novel-Polymer-Based Microring Resonator. Master thesis [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007
李林科. 基于新型聚合物材料的微环谐振器的基础研究. 硕士学位论文[D]. 大连: 大连理工大学, 2007