

文章编号: 0258-7025(2009)03-0695-04

马赫-曾德尔干涉仪辅助的光纤环特性

李卫彬^{1,2} 孙军强¹

(¹ 华中科技大学光电子科学与工程学院, 武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074)
² 河南理工大学物理化学学院, 河南 焦作 454000)

摘要 提出了一种马赫-曾德尔干涉仪辅助的光纤谐振环新结构, 利用传输矩阵法, 推导了该器件的输出表达式和半峰全宽(FWHM)表达式。进行了数值模拟, 结果显示其具有周期性的窄带带阻滤波特性。分析了马赫-曾德尔干涉仪两臂产生的相差以及耦合器的耦合系数对器件输出谱的影响。研究结果对该器件的实际加工和进一步改善其滤波性能具有参考意义。

关键词 光通信; 马赫-曾德尔干涉仪; 光纤谐振环; 传输矩阵

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093603.0695

Characteristics of Mach-Zehnder Interferometer-Assisted Fiber Ring Resonator

Li Weibin^{1,2} Sun Junqiang¹

(¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optoelectronic Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)
² School of Physics and Chemistry, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

Abstract A novel fiber ring resonator based on Mach-Zehnder (M-Z) interferometer is proposed. Its transmission function is theoretically analyzed using the transfer matrix method. The expression for the full width at half maximum of the transmission spectrum is also derived. Numerical simulations show that transmission spectrum has the periodic narrow stopband filtering characteristic. The influence of phase difference between the two arms of M-Z interferometer and coupling coefficient on the transmission spectrum is also analyzed. The results are of important significance to its actual processing and improvement of filtering characteristic.

Key words optical communication; Mach-Zehnder interferometer; fiber ring resonator; transfer matrix

1 引言

光纤谐振环和马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪是光通信和传感领域中两个重要的器件。光纤谐振环由于具有易于制作、成本低、便于集成、高的相位敏感、波长选择等优点, 广泛用于光开关、光子生物传感、上下路滤波器、光纤陀螺、光谱分析仪、光纤环激光器等领域^[1~5]。马赫-曾德尔干涉仪由于其插入损耗小、与光纤的兼容性好及具有梳状滤波特性、高的相位敏感特性, 在波分复用光纤通信和光纤传感等

领域有着重要的应用。在光通信领域, 可将其作为波长交错滤波器、热光开关以及多波长光纤激光器中的选模器件等^[6,7]; 在光纤传感领域, 将其作为相位滤波器, 可对多点、多参量的光纤光栅传感信号进行检测^[8], 因此, 近年来颇受关注。基于光纤环和马赫-曾德尔干涉仪这些优良的特性, 有许多文献报道了将这两种器件结合起来使用的情况, 但多数是把光纤环作为辅助器件, 加在 M-Z 干涉仪的一臂中, 甚至两臂中, 来提高 M-Z 干涉仪输出谱的精细度、

收稿日期: 2008-09-26; 收到修改稿日期: 2008-12-18

基金项目: 国家自然科学基金(60678020) 资助项目。

作者简介: 李卫彬(1975—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤通信中光有源、无源器件的研究。E-mail: lwbliweib@126.com

导师简介: 孙军强(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要从事非线性光学、光通信技术以及激光技术与器件方面的研究。E-mail: jqsun@mail.hust.edu.cn

隔离度和得到平顶梳状滤波的效果;以及将光纤谐振环和 M-Z 干涉仪串联起来使用,得到可调谐的梳状滤波器或者产生双光子纠缠态^[9~11]。另外有部分文献研究了将 M-Z 干涉仪放于光纤环内部来改善光纤谐振环的输出谱特性^[12,13],但是这些文献都没有对该器件的输出谱特性做详细的分析。本文详细研究了这一器件,利用传输矩阵法,推导了该器件的传递函数表达式,分析了其输出特性,详细讨论了 M-Z 干涉仪和光纤环参数对输出谱的影响。

2 结构与理论分析

马赫-曾德尔干涉仪辅助的光纤谐振环结构如图 1(a)所示,其中使用的 M-Z 干涉仪为单通 M-Z 干涉仪,如图 1(b)所示。光场由 1 端口输入,经过光纤耦合器分成两路,一路由端口 3 输出,一路由端口 4 进入光纤环,进入光纤环中的光场经 M-Z 干涉仪作用后,在 2 端口重新经过耦合器分成两路,一路重新进入光纤环进行循环,另外一路由 3 端口输出,和先前 3 端口输出的光场发生干涉。对于这种器件,可用传输矩阵法进行一般性的理论分析与计算。

光纤耦合器的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} a\sqrt{1-k_i} & ja\sqrt{k_i} \\ ja\sqrt{k_i} & a\sqrt{1-k_i} \end{bmatrix},$$

$$E_3 = \frac{a\sqrt{1-k} - \frac{1}{2}a^2tk \cdot [1 - \exp(j\beta\Delta L)]\exp(j\beta L)}{1 - \frac{1}{2}at\sqrt{1-k} \cdot [1 - \exp(j\beta\Delta L)]\exp(j\beta L)} E_1, \quad (1)$$

其中 k 为 DC1 的耦合系数,DC2 和 DC3 取为 3 dB 耦合器。 L 为光纤环的周长。 ΔL 为 M-Z 干涉仪两臂光纤有效长度之差, $t = \exp(-\alpha L)$ 。由(1)式可得输出光强的表达式为

$$T = \frac{a^2(1-k) - 2a^3t\sqrt{1-k}\sin(\Delta\phi/2)\sin[\beta L + (\Delta\phi/2)] + a^4t^2\sin^2(\Delta\phi/2)}{1 - 2at\sqrt{1-k}\sin(\Delta\phi/2)\sin[\beta L + (\Delta\phi/2)] + a^2t^2(1-k)\sin^2(\Delta\phi/2)}, \quad (2)$$

其中, $\Delta\phi$ 为 M-Z 干涉仪两臂差引起的相位。由(2)式可以看出,M-Z 干涉仪辅助的光纤谐振环的输出光强除了和单个光纤环的参数有关之外,还和 M-Z 干涉仪两臂之差引起的相位有密切的关系。

3 输出谱特性

3.1 $\Delta\phi$ 对输出谱的影响

图 2 是(2)式中 $\Delta\phi = \pi$ 时画出的 MZ 辅助的光纤谐振环的输出谱。其中有效折射率取为 1.45,耦合器损耗 $\gamma_0 = 0.1\%$,光纤吸收损耗 $\alpha = 0.2$ dB/

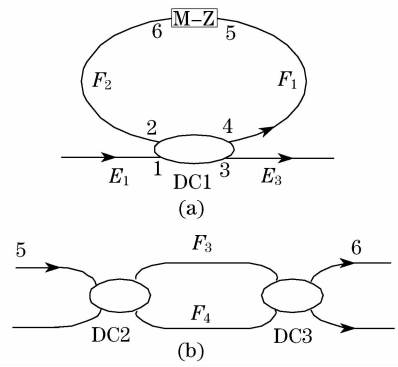


图 1 (a) M-Z 干涉仪辅助的光纤谐振环结构图;
(b) 单通马赫-曾德尔干涉仪结构图

Fig. 1 (a) Schematic diagram of M-Z-assisted fiber ring resonator; (b) configuration of a single-pass M-Z interferometer

其中 $a = \sqrt{1-\gamma_0}$, γ_0 为耦合器的损耗系数。 k_i ($i = 1, 2, 3$) 表示图中三个耦合器的耦合系数。光纤的传输矩阵为

$$\begin{bmatrix} \exp(-\alpha L_i + j\beta L_i) & 0 \\ 0 & \exp(-\alpha L_i + j\beta L_i) \end{bmatrix},$$

其中 L_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 对应图中光纤 F_1, F_2, F_3, F_4 的长度。 α 为光纤的吸收损耗系数。为简便起见,忽略 M-Z 干涉仪上的损耗,假设光纤及耦合器不存在偏振效应,可以得到光纤环的输出振幅为

km,环长取为 3 m,耦合器的耦合比取 0.1。由于 M-Z 干涉仪的振幅输出为 $[1 - \exp(j\Delta\phi)]/2$,当 $\Delta\phi = \pi$ 时,M-Z 干涉仪的输出光强为单位 1,此时相当于光纤环中没有加入 M-Z 干涉仪,图 2 就是普通的光纤谐振环的输出谱。由图中可以看出,输出谱具有周期性的窄带带阻滤波特性^[14]。图 3 是其他参数不变, $\Delta\phi$ 取不同值时谐振环的输出谱。

随着 M-Z 干涉仪两臂产生的相位差 $\Delta\phi$ 的减少,由图 3 可以发现输出谱具有 3 个特点:1)输出谱的切槽深度在减小,这是因为单通 M-Z 干涉仪的输

出光强的表达式为 $[1 - \cos(\Delta\phi)]/2$ ，当 $\Delta\phi$ 由 π 开始减小的时候，M-Z 干涉仪的输出光强在减小，因此使得光纤环的循环场能量下降，反应在光纤环的输出谱上就是切槽深度变浅；2) 输出谱切槽向 βL 增加的方向移动，即向短波长方向移动，这是因为 M-Z 干涉仪的振幅输出为 $[1 - \exp(i\Delta\phi)]/2$ ，产生的相位为 $\arctan \frac{-\sin(\Delta\phi)}{1 - \cos(\Delta\phi)}$ ，此值为负值。随着 $\Delta\phi$ 的减小，M-Z 干涉仪产生的附加相位的绝对值在增加。根据谐振环的谐振条件可知，光纤环自身的相位必须增加才能满足谐振条件。因此，随着 $\Delta\phi$ 的减小，切槽的位置在向 βL 增加的方向移动；3) 谱线的切槽宽度在增加。谐振环的输出场和循环场是一

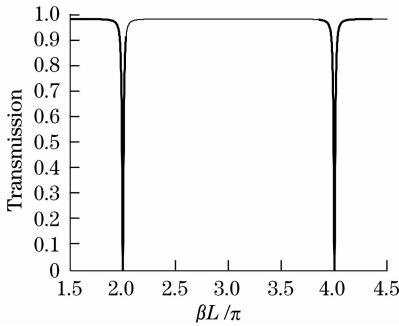


图 2 普通光纤谐振环的输出谱

Fig. 2 Transmission spectrum of ordinary fiber ring resonator

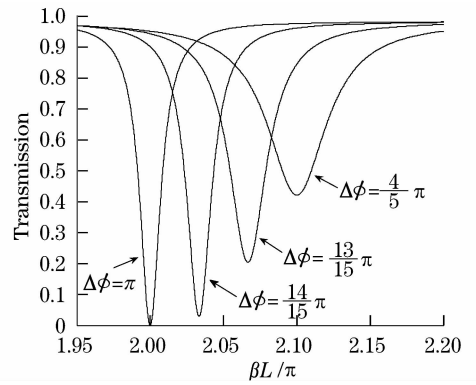


图 3 M-Z 干涉仪辅助的光纤谐振环输出谱

Fig. 3 Transmission spectrum of M-Z-assisted fiber ring resonator

一对应的，对于一定光强的循环场来说，峰值高度降低，其带宽必然会增加^[14]。因此，随着 $\Delta\phi$ 的减小，切槽深度在减小，对应的宽度必然要增加。(2) 式中， $\Delta\phi$ 取固定值时，可得到输出的最大值为

$$T_{\max} = \frac{a^2(1 - k_r)[1 + \sin(\Delta\phi/2)]^2}{[1 + (1 - k_r)\sin(\Delta\phi/2)]^2},$$

其中 $k_r = 1 - a^2 t^2$ ，为普通光纤谐振环谐振时耦合器的耦合系数。由 $T = T_{\max}/2$ ，可以求得输出谱的半峰全宽(FWHM)为

$$\Delta f_{1/2} = \frac{c}{2\pi nL} (\pi - 2\arcsin A), \quad (3)$$

其中， c 是光在真空中的速度， n 为有效折射率，

$$A = \frac{[1 + \sin(\Delta\phi/2)]^2 [1 + (1 - k_r)^2 \sin^2(\Delta\phi/2)] - 2[1 + \sin^2(\Delta\phi/2)][1 + (1 - k_r)\sin(\Delta\phi/2)]^2}{2(\sin\Delta\phi/2) \{ (1 - k_r)[1 + \sin(\Delta\phi/2)]^2 - 2[1 + (1 - k_r)\sin(\Delta\phi/2)]^2 \}}.$$

系统输出谱的半峰全宽随 $\Delta\phi$ 的变化如图 4 所示，其中 $c/nL = 2$ GHz。短划线、点线和实线分别对于 k_r 取 0.1, 0.15 和 0.2。由图可以看出，系统的半峰全宽随着 $\Delta\phi$ 的增加确实在减小，这与前面的定性分析是一致的。

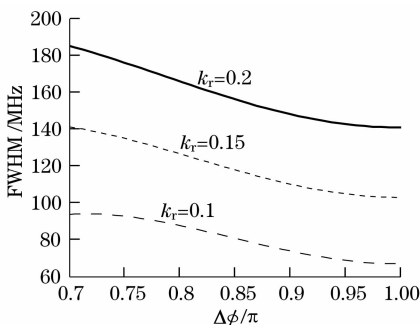


图 4 $\Delta\phi$ 对半峰全宽的影响

Fig. 4 Influence of $\Delta\phi$ on FWHM

3.2 耦合系数对输出谱的影响

由(2)式可以看出，除了 $\Delta\phi$ 对输出谱有影响之外，耦合器的耦合系数也是一个重要的影响因素。众所周知，随着耦合系数的增加，从端口 1 耦合进入光纤环的能量增加，即循环场的能量在增加，对应到输出谱上，就是深度增加，带宽增加。图 5 是根据(2)式画出的输出谱随谐振耦合系数变化的曲线图。

其中 M-Z 干涉仪两臂差引起的相位为 $\Delta\phi = \frac{4}{5}\pi$ ，耦合系数 k_r 分别取 0.05, 0.1, 0.2，其他参数不变。图中可以看出，输出谱的深度和带宽确实随着耦合系数的增加而增加。图 6 是根据(3)式画出的半峰全宽随耦合系数 k_r 变化的曲线图，其中 $\Delta\phi$ 依次取为 π (短划线)， $\frac{4}{5}\pi$ (实线)， $\frac{2}{3}\pi$ (点线)。图中可以看

出,随着耦合系数的增加,系统的半峰全宽也在增加。另外,对于同一个 k_r 值,当 $\Delta\phi$ 增加的时候,半峰全宽在减小,这同图 4 的分析结果也是一致的。

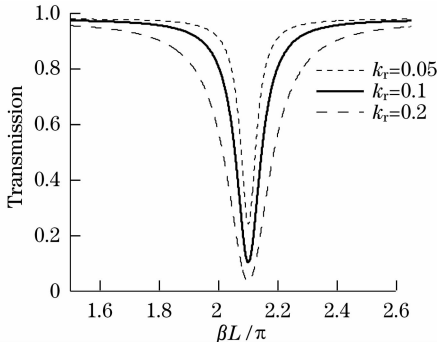


图 5 M-Z 干涉仪辅助的光纤谐振环输出谱

Fig. 5 Transmission spectrum of M-Z-assisted fiber ring resonator

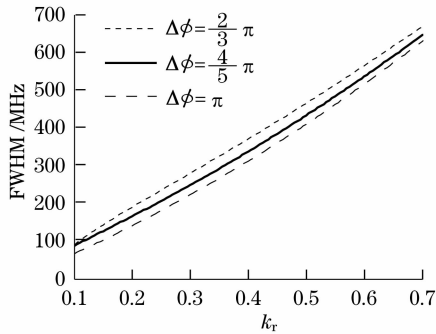


图 6 耦合系数对半峰全宽的影响

Fig. 6 Influence of coupling coefficient on FWHM

4 结 论

研究了一种将马赫-曾德尔干涉仪加入单模光纤谐振环内的新结构。利用传输矩阵法推导了该器件的输出表达式,分析了该器件的滤波特性。分析结果表明该器件的输出谱具有周期性的窄带阻滤波特性。M-Z 干涉仪在光纤谐振环中等效为一个相位及传输(衰减)系数可变的器件,对谐振环输出特性产生很大的影响。调节马赫-曾德尔干涉仪两臂相位差可以改变输出谱的位置、深度和信道带宽。随着相位差的增加,输出谱向长波长方向移动,同时切槽深度增加,带宽减小。另外,耦合器的耦合系数对输出谱也有很大的影响,输出谱的切槽深度和带宽随着耦合系数的增加而增加。本文提出的器件具有信道均匀性好、输出谱峰值和带宽可调、价格低、便于集成等优点,将会在密集波分复用系统以及光

纤传感领域发挥重要的作用,同时也为设计全光纤梳状滤波器、波长交错滤波器等全光纤无源器件提出了一种新的思路。

参 考 文 献

- 1 V. Van, T. A. Ibrahim, K. Prtter *et al.*. All-optical nonlinear switching in GaAs-AlGaAs microring resonators [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(1):74~76
- 2 W. B. Robert, E. H. John. Sensitive disk resonator photonic biosensor[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(31):5742~5747
- 3 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
- 4 Liu Yanlei, Yuan Libo, Zhao Ai. Two-ring-resonator in parallel combined Rayleigh backscattering fiber optic gyroscope [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5):846~851
- 刘艳磊,苑立波,周爱. 双环形腔并联瑞利后向散射式光纤陀螺螺[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5):846~851
- 5 K. Kalli, D. A. Jackson. Ring resonator optical spectrum analyzer with 20-kHz resolution[J]. *Opt. Lett.*, 1992, **17**(15):1090~1092
- 6 Wang Hua, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. Multi-wavelength fiber ring laser with semiconductor optical amplifier [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11):1502~1506
- 王华,姚敏玉,张洪明等. 采用半导体光放大器的多波长光纤环形激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1502~1506
- 7 Yang Di, Yu Jinzhong, Chen Shaowu *et al.*. An novel 2×2 SOI thermo-optic switch [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2007, **18**(11):1280~1285
- 杨笛,余金中,陈少武等. 一种新型 2×2 SOI 热光开关[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(11):1280~1285
- 8 M. H. Song, Yin sh zh, P. B. Ruffin. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature amplifying of a Mach-Zehnder interferometer[J]. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7):1106~1111
- 9 Dong Xiaowei, Pei Li, Xu Ou *et al.*. Study of interleaver based on ring resonator assisted Mach-Zehnder interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4):638~642
- 董小伟,裴丽,许鸥等. 环形谐振器辅助马赫-曾德尔干涉仪型波长交错滤波器的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4):638~642
- 10 C. Vazquez, S. E. Vargas, S. M. S. Pena *et al.*. Demultiplexers for ultranarrow channel spacing based on Mach-Zehnders and ring resonators[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(9):2080~2086
- 11 P. P. Yupapin, S. Suchat. Entangled photon generation using a fiber optic Mach-Zehnder interferometer incorporating the nonlinear effect in a fiber ring resonator[J]. *J. Nanophotonics*, 2007, **1**:013504
- 12 H. L. An, X. Z. Lin, E. Y. B. Pun *et al.*. Multi-wavelength operation of an erbium-doped fiber ring laser using a dual-pass Mach-Zehnder comb filter[J]. *Opt. Commun.*, 1999, **169**:159~165
- 13 Y. H. Chew, F. V. C. Mendis, T. T. Tjhung. An optical filter of adjustable finesse using a Mach-Zehnder interferometer [J]. *Singapore ICCS'94*, 1994, **1**:70~72
- 14 F. Zhang, J. W. Y. Lit. Direct-coupling single-mode fiber ring resonator[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1988, **5**(8):1347~1355