

文章编号: 0253-2239(2003)12-1429-4

高消光比双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器*

黄勇林^{1,2} 李 杰¹ 童嵘嵘¹ 开桂云¹ 董孝义¹

(¹ 南开大学现代光学研究所, 天津 300071)
(² 苏州科技学院电子系, 苏州 215011)

摘要: 提出了一种新颖结构的高消光比双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器, 将常规单通马赫-曾德尔干涉仪的两个输出端与光隔离器连接, 构成一个双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器, 对滤波器的输出特性进行了理论分析和实验研究。数值模拟表明, 与常规的单通马赫-曾德尔干涉仪相比, 在相同参量的情况下该双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器的消光比得到了大大改善, 消光比的提高取决于干涉仪的臂长差, 当干涉仪的臂长差为 0.7366 mm 时, 消光比提高了 20 dB。实验结果表明, 双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器的消光比为 25.8 dB, 消光比提高了 13 dB。

关键词: 光纤通信技术; 消光比; 双通马赫-曾德尔干涉仪; 梳状滤波器

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

马赫-曾德尔(Mach-Zehnder)干涉仪以其插入损耗小, 与光纤的兼容性好, 具有梳状滤波特性等优点, 在光纤通信波分复用系统中有着重要的应用价值。例如上下路复用解复用器、波长交错器(Interleaver)、声光滤波器、多波长光纤激光器^[1~4], 因此近年来倍受关注。然而在光波分复用系统当中, 当马赫-曾德尔干涉仪用于上下路复用解复用器和波长交错器时, 干涉仪的滤光消光比大小对上下路波长隔离度等因素的影响极为重要, 如何提高滤波器的消光比成为亟待解决的课题。通常人们采用调整光的偏振态的方法, 但效果很不明显, 我们用一光环行镜与常规单通马赫-曾德尔干涉仪的一个输出端连接, 获得了高消光比的马赫-曾德尔干涉仪^[5]。

本文提出了一种提高马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器输出谱消光比的新方法, 将马赫-曾德尔干涉仪的两个输出端与光隔离器串接, 构成一个双通马赫-曾德尔干涉仪, 从而大大改善了马赫-曾德尔干涉仪的输出谱特性。与常规的单通马赫-曾德尔干涉仪相比, 消光比得到了很大的提高。

2 原 理

高消光比双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器结构如图 1 所示, 它主要由两个 3 dB 耦合器(C_1 , C_2)和一个光隔离器(Isolator)组成, 其中 C_2 的两个输出端与光隔离器串接在一起形成环路。 E_1 、 E_2 为从端口 1、2 的输入光场, E'_1 、 E'_2 、 E_3 、 E_4 分别为从端口 1、2、3、4 的输出光场。当一束光从端口 1 进入马赫-曾德尔干涉仪, 端口 3、4 的输出光谱为周期性的正余弦函数, E_3 经光隔离器后作为输入光从马赫-曾德尔干涉仪的端口 4 进入, 然后反向传播, 所产生的干涉谱分别从端口 1、2 输出, E_4 由于被光隔离器阻断, 对端口 1、2 的输出光没有贡献, 这样在输出端口 2 输出的谱 E'_2 的消光比比在 3 端口输出的谱 E_3 的消光比得到了大大的提高。

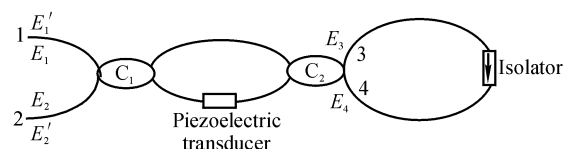


Fig. 1 Schematic diagram of high extinction ratio comb filter based on dual-pass Mach-Zehnder interferometer

假定器件的初始注入条件为 $E_1(0) = 1$, $E_2(0) = 0$, 忽略光纤及耦合器损耗, 且耦合器在梳状滤波器件工作波长范围内具有相同的耦合系数。根据马赫-曾德尔干涉仪的传输特性, 从 3 端和 4 端的输出光 E_3 和 E_4 可写作

* 国家自然科学基金(60077012)、天津市科委基金(013601811)资助课题。

E-mail: huangyonglin@eyou.com

收稿日期: 2002-10-28; 收到修改稿日期: 2002-12-09

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\phi) - 1 & -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] & 1 - \exp(j\Delta\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\phi) - 1 \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \end{bmatrix}, \quad (1)$$

这里 $j = \sqrt{-1}$, $\Delta\phi = 2n_{\text{eff}}\pi\Delta L/\lambda$ 代表马赫-曾德尔干涉仪两个干涉臂的传输相位差, 其中 ΔL 是干涉仪两臂长差, n_{eff} 为光纤有效折射率, λ 是工作波长。

如果输出光 E_3 经光隔离器作为输入光从端口 4 反向传播并在端口 1 和端口 2 处干涉输出, 利用以上关系可计算出 E'_1 、 E'_2 的输出为

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \exp(j\Delta\phi) - 1 & -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] & 1 - \exp(j\Delta\phi) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \begin{bmatrix} -j[1 + \exp(j2\Delta\phi)] \\ -[1 - \exp(j\Delta\phi)]^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

因此, 输出光功率分别为

$$T'_1 = E'_1 E'^*_1 = \frac{1}{8}(1 - \cos 2\Delta\phi), \quad (3)$$

$$T'_2 = E'_2 E'^*_2 = \frac{1}{4}(1 - \cos \Delta\phi)^2. \quad (4)$$

在推导(3)式和(4)式的过程中, 忽略了 3 端到 4 端的长度, 如果考虑长度, 则在(2)式中项 E_3 加一附加相位因子, 此因子对输出光功率没有影响。从(3)式、(4)式可以看出, 双通马赫-曾德尔干涉仪的梳状滤波器特性由相位差决定, 即由干涉仪两臂长差决定, 臂长差不同, 干涉仪将具有不同的输出谱线。两臂差一定, 不同波长对应的输出不同, 峰值波长满足 $\Delta\phi = (2m+1)\pi$, 这里 m 为整数。两相邻峰值波长间隔为

$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_1\lambda_2}{n_{\text{eff}}\Delta L},$$

对 $\Delta\lambda \ll \lambda_1, \lambda_2$

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n_{\text{eff}}\Delta L}. \quad (5)$$

对 $\Delta L = 0.7366$ mm, 取 $n_{\text{eff}} = 1.456$, $\lambda = 1550$ nm, 则 $\Delta\lambda = 2.24$ nm。在此参量下, E'_2 的数值模拟结果如图 2 中虚线 2 所示, 可见其谱线在波长域(频域)是一系列等间距的透射峰组成。为了与单通马赫-曾德尔干涉仪输出谱进行比较, 我们给出了在相同参量情况下输出端口 3 上 E_3 的输出谱, 如图 2 中实线 1 所示。由图 2 可以看出, 新结构的双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器干涉消光比在 1550 nm 附近约 40 dB, 与单通马赫-曾德尔干涉仪干涉消光比 20 dB 比较有相当大的提高, 两者差 20 dB。两臂长差改变, 相位差发生变化, 从而导致谱的移动。通常的方法是用紫外光照射干涉仪的一个臂, 或对其中的一个臂局部加热, 或将其粘在压电陶瓷上拉伸, 大于 π 的相位移动很容易实现, 因此, 这种器件可用作复用解复用器和波长选择开关。

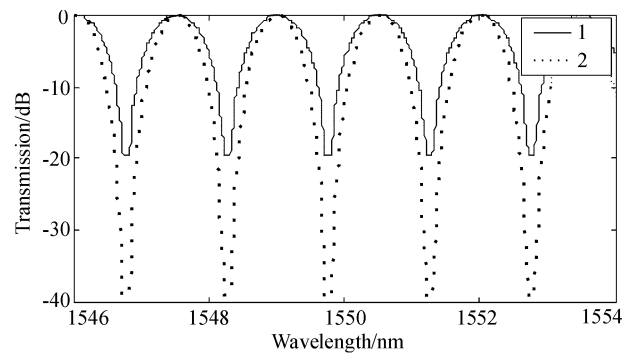


Fig. 2 Numerical transmission spectra of dual-pass Mach-Zehnder interferometer. —, field E_3 ; ···, field E'_2

3 实验结果及讨论

实验所用的马赫-曾德尔干涉仪是由熔融拉锥的方法制作的, 两个 3 dB 耦合器为宽带耦合器, 波长范围(1550±20) nm, 将干涉仪的两个输出端与一个光隔离器(宽带 1550 nm)连接, 构成一个双通马赫-曾德尔干涉仪, 如图 1 所示。宽带光源(掺铒光纤放大器的放大自发辐射谱)发出的光从端口 1 输入, 用光谱分析仪(最小分辨力为 0.1 nm)分别监测端口 3 和端口 2 的输出谱如图 3 所示, 得到的谱周

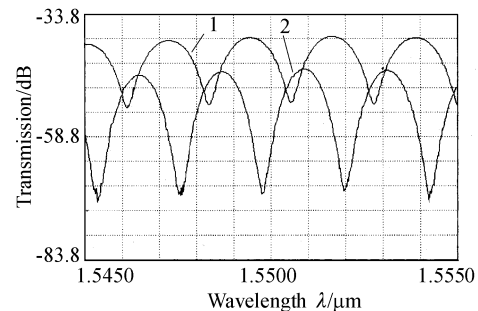


Fig. 3 Measured transmission of field E'_3 (curve 1) and field E'_2 (curve 2) of dual-pass Mach-Zehnder interferometer

期为 2.24 nm。图 3 中曲线 1 对应端口 3 的输出谱,而曲线 2 对应端口 2 的输出谱,3 端得到的输出谱的消光比约为 12.8 dB,2 端输出谱的消光比约为 25.8 dB,两者差 13 dB,两者成 2 倍关系,实验与理论基本吻合。

实验中将马赫-曾德尔干涉仪的一个臂粘贴在压电陶瓷上,通过连续调节电压的方法改变干涉仪的臂长差,增大电压就会看到干涉谱向一个方向移动,图 4 给出了电压在 0~60 V 范围内某一峰值波长移动随电压的关系,波长移动约 1.8 nm,对应的相位移动大于半个周期。本实验中,光隔离器对提高双通马赫-曾德尔干涉仪的干涉消光比起着至关重要的作用,如果没有光隔离器,即为通常的双通马赫-曾德尔干涉仪,此干涉仪与常规的单通马赫-曾德尔干涉仪相比,除了输出谱的周期变为单通马赫-曾德尔干涉仪谱的一半以外,干涉消光比相同^[6,7]。该器件消光比的提高取决于单通马赫-曾德尔干涉仪的消光比,两者之间有两倍关系,因此为了得到更大的消光比,尽可能提高单通马赫-曾德尔干涉仪的消光比。在实际应用中,当马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器用于复用解复用器和波长交错器时,要求干涉仪输出谱相邻峰值波长间隔为 0.8 nm 或 0.4 nm,这可以通过(5)式计算出 ΔL ,按要求对干涉仪的两臂长差进行设计。另外,返回到端口 1 的光 T_1 对光源产生影响,当其积累达到一定程度时,就会引起光源工作不稳定,产生频率漂移、幅度变

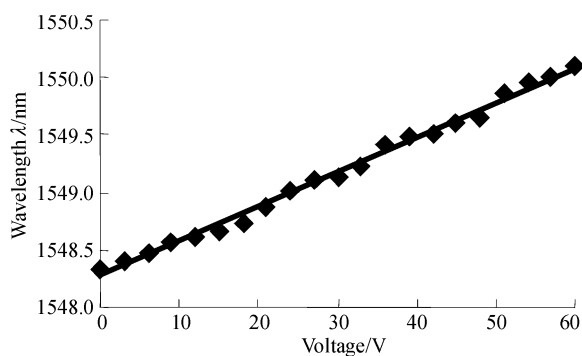


Fig. 4 Relationship between the wavelength and electric voltage

化等问题,从而影响系统的正常工作,为了避免回程光对光源等器件的工作产生的影响,在端口 1 前加一个光隔离器,对回程光进行抑制。

结论 提出并实验研究了一种新颖结构的高消光比双通马赫-曾德尔干涉仪梳状滤波器,输出谱周期为 2.24 nm,消光比 25.8 dB,与单通马赫-曾德尔干涉仪相比,消光比提高了 13 dB。对干涉仪的一个臂长进行电压调谐,电压在 0~60 V 范围内相位漂移大于半个周期。该器件具有结构简单、消光比大、易于调谐等优点,在光纤通信中有着潜在的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Lai Q, Lanker M, Hunziker W *et al.*. Tunable wavelength-selection switch and multiplexer/demultiplexer based on asymmetric silica-on-silica Mach-Zehnder interferometer. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(3):266~267
- 2 Zhao Hao, Qu Ronghui, Cai Haiwen *et al.*. Characteristics adjustment of an all-optical Mach-Zehnder add/drop multiplexer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2001, **21**(5):589~592 (in Chinese)
- 3 Bilodeau F, Johnson D C, Therianlt S *et al.*. An all-fiber dense wavelength division multiplexer/demultiplexer using photoprinting Bragg gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1995, **7**(4):388~390
- 4 Zhou Guang, Zhao Chunliu, Huang Yonglin *et al.*. Improvement of the capability of nonsymmetrical Mach-Zehnder interferometric interleaver using fiber loop. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(6):702~705 (in Chinese)
- 5 Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun *et al.*. High extinction ratio multiplexer/demultiplexer with a Mach-Zehnder interferometer and a fiber loop mirror. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(2):63~64
- 6 An Honglin, Liu Xiangzhi, Liu Hongdu. Multi-wavelength operation of an Er^{3+} -doped fiber laser at room temperature with a novel optical fiber Mach-Zehnder interferometer. *Chin. Phys. Lett.*, 2000, **17**(2):106~108
- 7 Feng Dejun, Kai Guiyun, Liu Zhiguo *et al.*. Study of all-fiber reflected Mach-Zehnder interferometric multi-wavelength filter. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(3):332~335 (in Chinese)

High Extinction Ratio Comb Filters Based on Dual-Pass Mach-Zehnder Interferometer

Huang Yonglin^{1,2} Li Jie¹ Tong Zhengrong¹ Kai Guiyun¹ Dong Xiaoyi¹

(¹ *Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071*

(² *Department of Electronics, Suzhou Institute of Science and Technology, Suzhou 215011*)

(Received 28 October 2002; revised 9 December 2002)

Abstract: A novel structure of high extinction ratio comb filter based on dual-pass Mach-Zehnder interferometer is proposed. The comb filter is structured by adding an optical isolator to the two outputs of the conventional single-pass Mach-Zehnder interferometer. The characteristic of the transmission spectrum is studied theoretically and experimentally. The numerical results show that the extinction ratio can be enhanced greatly in comparison with the conventional single-pass Mach-Zehnder interferometer in the same parameters. The improvement of the extinction ratio mainly depends on the difference between the two arms of the Mach-Zehnder interferometer. When the difference is 0.7366 mm, the extinction ratio is improved 20 dB. The experimental results show that the extinction ratio of the dual-pass Mach-Zehnder interferometer is 25.8 dB, the extinction ratio is improvedly 13 dB.

Key words: fiber communication technology; extinction ratio; dual-pass Mach-Zehnder interferometer; comb filter