

文章编号: 0253-2239(2003)08-0916-4

马赫-曾德尔干涉仪消光比和单通道光开关*

李 杰 黄勇林 开桂云 董孝义
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

摘要: 对马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪的滤光消光比特性进行了研究,提出了一种在其一端加上光纤全反镜的方法,大大改善了马赫-曾德尔干涉仪的输出谱特性,由此提出并设计了一种单通道光开关,实验得到了约 37.4 dB 的开关动态范围。

关键词: 信息光学; 马赫-曾德尔干涉仪; 消光比; 单通道光开关

中图分类号: TN253 文献标识码: A

1 引 言

马赫-曾德尔干涉仪以其独特的性能在全光通信中得到广泛的研究和应用,例如在光分插复用、密集波分复用、隔行扫描(interleaver)及光滤波中^[1-3],另外在波长选择开关的应用中也已得到广泛研究^[4]。

然而在光波分复用系统当中,当马赫-曾德尔干涉仪用于光分插复用和隔行扫描时,干涉仪的滤光消光比和占空比的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和占空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;或采用多个马赫-曾德尔干涉仪级联,但大大增加了马赫-曾德尔干涉仪设计的难度,其臂长差也很难精确控制。

本文提出一种在马赫-曾德尔干涉仪的一端连上光纤全反镜或光纤光栅(FBG)的方法,构成了一种高消光比的滤波器或单通道开关器件,并对这种器件进行了相关方面的理论模拟和实验研究,得到了约37.4 dB的开关动态范围。实验证明,这种器件具有结构简单、容易实现、性能良好等优点。

2 原 理

对于一般的输入光,利用单个马赫-曾德尔干涉

仪进行滤波,其消光效率可能并不高,这是因为在大多数情况下,所滤的是有一定带宽的激光,这就要求滤出的光有一定带宽的透射和一定带宽的消光。本文采用在马赫-曾德尔干涉仪一个输出端加上反射进行二次干涉的方法,大大改善马赫-曾德尔干涉仪的输出谱特性,从而大大提高了它的消光比,实际光路如图 1 所示。它是由光环形器、马赫-曾德尔干涉仪和光纤环形镜构成的。

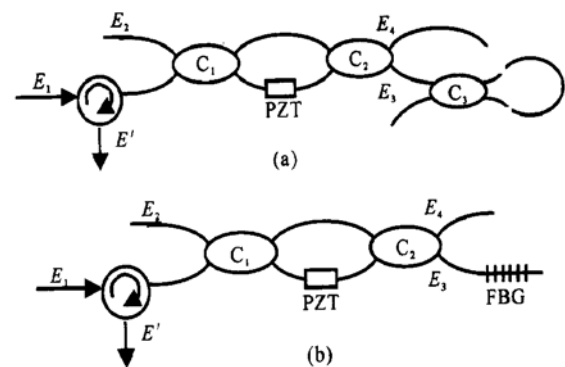


Fig. 1 (a) M-Z filter with loop mirror and (b) single-channel optical switch

如图 1(a) 的滤波效用可以这样来看,当一束宽带光源发出的光经过从输入端 E_1 进入马赫-曾德尔干涉仪,其在 E_3 和 E_4 端的出射谱为周期性的正余弦函数, E_3 端的干涉光经过全反镜全部反射回来,根据对称性,反射端反射回来的光与从入射端入射的光在经过马赫-曾德尔干涉仪时具有相同的干涉性,即光从 E_3 端经马赫-曾德尔干涉仪到 E' 端与光从 E_1 端到 E_3 端的干涉谱图是一样的,于是在输出端 E' 端就会得到性能大大改善的出射谱。

设输入光为 E , 根据马赫-曾德尔干涉仪的传输特性,从 E_3 端和 E_4 端输出的光可写作

* 国家自然科学基金(6077012)、天津市自然科学基金(013601811)资助课题。

E-mail: lje@eyou.com

收稿日期: 2002-05-27; 收到修改稿日期: 2002-09-02

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \exp(j\Delta\phi) & -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] & -[1 - \exp(j\Delta\phi)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{E_1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \exp(j\Delta\phi) \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \end{bmatrix},$$

其中 $\Delta\phi = 2k\pi \cdot \Delta L / \lambda$, 代表马赫-曾德尔干涉仪两个干涉臂的传输相位差, k 为整数, ΔL 为干涉臂程差, λ 为波长。同理, 如果光又从 E_3 端完全反射回来, 利用以上的关系, 可计算出 E' 和 E_2 端的输出为

$$\begin{bmatrix} E' \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \exp(j\Delta\phi) & -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] & -[1 - \exp(j\Delta\phi)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{E_1}{4} \begin{bmatrix} [1 - \exp(j\Delta\phi)]^2 \\ -j[1 - \exp(j2\Delta\phi)] \end{bmatrix}.$$

如果在 E_4 端加上全反镜, E' 和 E_2 端出射为

$$\begin{bmatrix} E' \\ E_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 - \exp(j\Delta\phi) & -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] \\ -j[1 + \exp(j\Delta\phi)] & -[1 - \exp(j\Delta\phi)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ E_4 \end{bmatrix} = \frac{E_1}{4} \begin{bmatrix} -[1 + \exp(j\Delta\phi)]^2 \\ j[1 - \exp(j2\Delta\phi)] \end{bmatrix}.$$

3 数值模拟

在我们用光谱仪检测一束宽带光经单个马赫-曾德尔干涉仪干涉后出来的光谱时, 由于受光谱仪最小分辨率的限制, 因而在光谱仪上我们并不能得到理论计算中所得出的无穷大的消光比。若光谱仪分辨的线宽不同或马赫-曾德尔干涉仪的臂长差不同, 则其输出谱图就不一样。通过理论模拟, 图 2 给出了马赫-曾德尔干涉仪输出谱的消光比 dB 值与干涉仪臂长差及测量分辨率的关系, 计算中取纤芯折射率 $n = 1.457$ 。

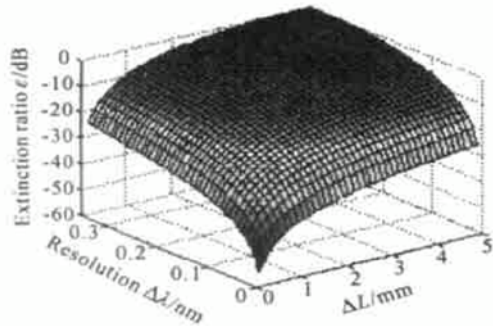


Fig. 2 The relationship between the extinction ratio, the spectrograph resolution and the difference of arm length

由图可以看出光谱仪的分辨最低点随着臂长差和分辨率的增大而迅速升高, 即消光比将迅速减小。如果取干涉臂程差 $\Delta L = 0.329787$ mm, 那么得到

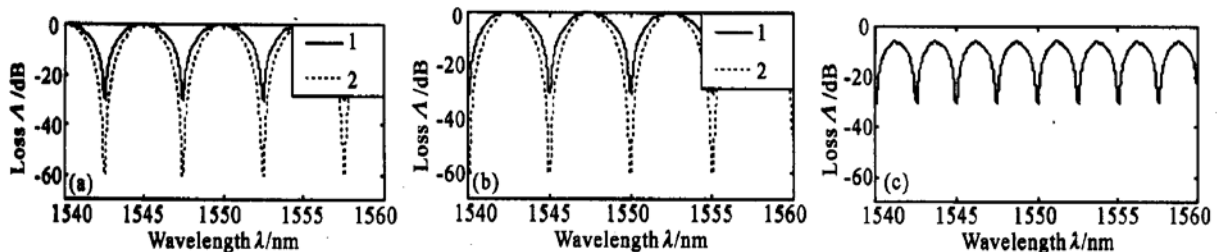


Fig. 3 The analog curve of Mach-Zelnder filter

的谱图周期在 1550 nm 附近约为 5 nm。根据上面的理论计算, 我们亦可以模拟出单个和加上全反镜后的马赫-曾德尔干涉仪在 0.1 nm 分辨率下的出射谱图, 如图 3 所示。

图 3(a) 中实线 1 为 E_3 端的出射谱, 虚线 2 为光在 E_3 端全反后 E' 端的谱图; 图 3(b) 为 E_4 端的出射谱 1 和在 E_4 端全反后 E' 端的出射谱 2 的叠加; 图 3(c) 则为 E_3 或 E_4 端全反后 E_2 端的出射谱。由图 3(a) 和图 3(b) 比较, 干涉曲线对应的相位正好相反, 两个图中的实线为互补关系; 而光经全反后, 在 E_2 端得到的出射谱均为图 3(c) 的形式。由图 3(a) 或图 3(b) 可以看出, 经过反射后, 出射谱图与没有加全反镜相比较, 其干涉峰的带宽更窄即占空比更小; 谱图的消光比更大, 其干涉消光比在 1550 nm 附近约为 60.12 dB, 与没有加反射时的 30.06 dB 相比较提高了 30.06 dB。而从图 3(c) 来看, E_2 端的出射消光比更小, 约为 24.04 dB, 它相当于是图 3(a) 或图 3(b) 中实线与虚线的差值。

如果将全反镜换成光纤光栅连接在马赫-曾德尔干涉仪的一端, 我们设计了一种单通道的光开关, 通过调整马赫-曾德尔干涉仪的臂程差, 如果光栅反射峰处于马赫-曾德尔干涉仪干涉的相长位置, 就会得到反射光, 否则, 若光栅反射峰处在干涉相消位置, 就得不到反射光, 这样就实现了对某个波长光的开关作用。具体光路如图 1(b) 所示。

4 实验研究

如图 1(a) 所示, 实验中将由 3 dB 耦合器制成的光纤全反镜(1550 nm ± 10 nm) 连接到马赫-曾德尔干涉仪的 E_3 端, 经过调整光的偏振, 用光谱分析仪 (Advantest Q8383) 分别测得 E_4 端和 E' 端的出射光谱图如图 4 所示(光谱仪分辨率为 0.1 nm)。得到的谱图周期约为 5.46 nm, 如果不考虑光路插损, E_4 端得到光的消光比约为 22.8 dB, 而在 E' 端得到的消光比约为 40.8 dB。由此可知, 对于 0.1 nm 的谱图分辨率而言, 加上光纤全反镜后, 干涉仪的消光比提高了 18 dB。

主要由于光纤双折射等的影响, 实验数据与理论计算有一定的差异; 为获得较大的消光比, 实验中仍需要对干涉臂中的光的偏振进行调节。然而在同样条件下, 加上光纤全反镜后, 我们均可获得比没有全反镜时大得多的消光比, 实验结果与理论计算吻合。

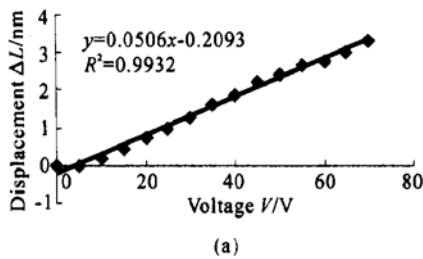


Fig. 5 The displacement of interference curve with voltage. (a) The relation between displacement and voltage; (b) Interference curve shifting half-period: 1: voltage= 0, 2: voltage= 57 V

5 单通道光开关

单通道光开关是由马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅构成的, 如图 1(b) 所示, 光纤光栅的反射谱和透射谱如图 6 所示, 中心波长为 1550.94 nm, 透射深度为 21.75 dB, 3 dB 带宽为 0.348 nm。

调节加在压电陶瓷上的电压, 可以从端口 E' 的光谱明显看到器件的“开”和“关”二种状态, 图 7 是对应压电陶瓷两端的电压分别为 11 V 和 63.7 V 的情况下, 从 E' 端测得的开状态和关状态的光谱。在光纤光栅的峰值波长上, 实验得到了 37.4 dB 的开关动态范围, 开关状态具有较好的稳定性和重复性。由于光纤光栅的反射谱带宽远小于干涉仪的谱线宽度, 所以开状态时光谱的线宽大致不变。在开状态, 实验测得的信号附加损耗约为 8.81 dB, 这主要来

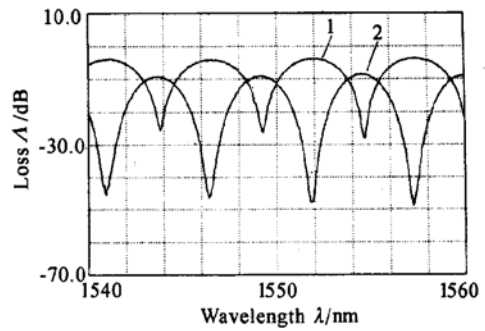


Fig. 4 The output spectrum of interferometer

实验中将马赫-曾德尔干涉仪的一个干涉臂粘贴在压电陶瓷上, 用连续增大电压的方法来调节微量马赫-曾德尔干涉仪的干涉臂程差, 就会看到干涉谱图向一个方向的连续移动, 我们测量了电压在 0~70 V 范围内变化时干涉光谱的移动情况, 干涉曲线的位移与所加电压的关系如图 5(a) 所示, 图 5(b) 所示的是电压为 0 和电压为 57 V 谱图的叠加, 可见电压从 0 变到 57 V, 干涉曲线大约移动了半个周期。

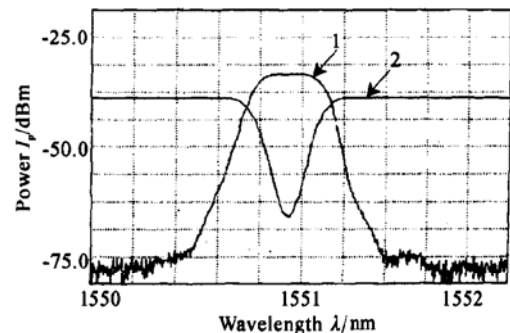
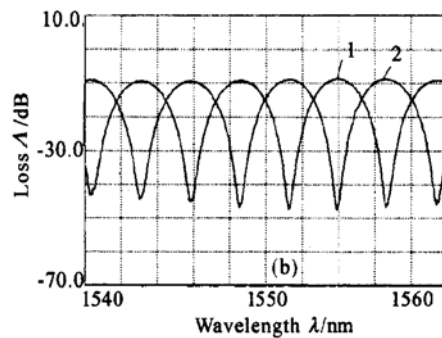


Fig. 6 The reflection and transmission of FBG. 1: reflection; 2: transmission

源于光环形器的插入损耗、马赫-曾德尔干涉仪的光纤双折射和光纤光栅反射率的影响, 另外还包括光路中的熔接损耗、接头损耗和耦合损耗等。所以除了减小构成器件的损耗外, 还可通过调节马赫-曾德尔干涉臂的光偏振态和选用高反射率的光栅等来降

低系统损耗。该器件具有结构简单、开关动态范围大和偏振不灵敏等特性。

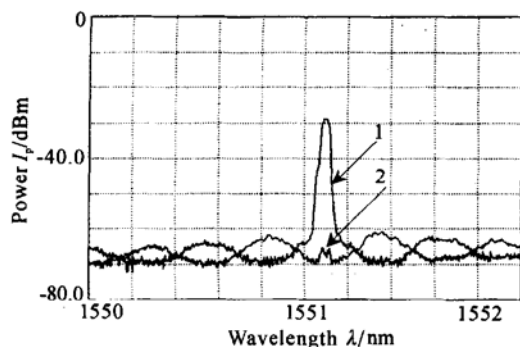


Fig. 7 The output spectrums at E' port of two different states. 1: on; 2: off

结论 本文对马赫-曾德尔干涉仪的消光比进行了研究,提出了一种在马赫-曾德尔干涉仪一端加入反射镜的方法,这种方法大大改善了马赫-曾德尔干涉

仪输出光谱的消光比和占空比特性,并由此设计了一种基于马赫-曾德尔干涉仪和光纤光栅的单通道光开关,这一器件具有结构简单、消光比大的优点,在光通信中将具有很大的应用价值。

参 考 文 献

- 1 Qin Zixiong, Zeng Qingke, Feng Dejun *et al.*. Grating based wavelength add drop multiplexers in optical net works. *Progress in Physics* (物理学进展), 2000, **20**(2): 182~ 197 (in Chinese)
- 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 Kwang No Park, Yong Tak Lee, Min Hyung *et al.*. All-fiber drop-pass filters with Fiber Bragg Gratings. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(4): 555~ 557
- 4 Zhao Hao, Qu Ronghui, Fang Zujie. A wavelength-selective switch based on fiber Bragg grating and fiber loop mirror. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20**(10): 1425~ 1428 (in Chinese)

Study of Extinction Ratio of Mach-Zehnder interferometer and Implementation of Single-Channel Optical Switch

Li Jie Huang Yonglin Kai Guiyun Dong Xiaoyi
(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)
(Received 27 May 2002; revised 2 September 2002)

Abstract: The extinction ratio of Mach-Zehnder interferometer is studied. A new structure based on Mach-Zehnder interferometer and fiber loop mirror is presented. The characteristic of the transmission spectrum of Mach-Zehnder interferometer is greatly improved. And a single-channel optical switch is proposed and designed accordingly. The dynamic range of 37.4 dB is obtained in the switch.

Key words: information optics; Mach-Zehnder interferometer; extinction ratio; single-channel optical switch