

文章编号: 0253-2239(2003)01-41-04

# 级联马赫-曾德尔干涉仪光学梳状滤波的理论研究\*

李 杰 童峥嵘 蒙红云 张伟刚 开桂云 袁树忠 董孝义  
(南开大学现代光学研究所, 天津 300071)

**摘要:** 提出一种级联马赫-曾德尔光纤干涉仪,它是采用多个 3 dB 耦合器串联而成的。模拟与分析表明,当光纤干涉臂长度差  $\Delta L$  按顺序取一系列定值时,将得到性能良好的梳状出射谱图。其干涉峰的边模抑制比随干涉臂数目的增多而变大。

**关键词:** 应用光学; 马赫-曾德尔干涉仪; 级联; 数值模拟  
中图分类号: TH744.3 文献标识码: A

## 1 引 言

光学梳状滤波器在光电子以及光纤通信领域中具有许多重要的应用,例如,在半导体激光器或光纤激光器中,可以利用其作为反馈谐振腔来实现多波长输出,并可作为密集波分复用系统中理想的标准通道光源<sup>[1]</sup>;在具有超连续特性的宽带光源中,利用梳状滤波器可引出所需个数的窄带光源,经进一步光放大后可获取波分复用系统的多波长信号源;此外,在光通信系统中,使用梳状滤波器既可滤除非标准波长噪声,还用以削减展宽了的信号带宽,从而使标准通道的信号得以恢复<sup>[2,3]</sup>。

采用多个 3 dB 耦合器串联而成的级联马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪具有光学滤波的优良性能,在光传感和光通信领域中均具有很重要的应用,例如在光传感领域,将其用作相位滤波器可对多点、多参数的光纤光栅传感信号进行检测<sup>[4~6]</sup>;在光通信领域中,将其用于分插复用器、波长交错器、声光滤波器及多波长光纤激光器中的选模器件等<sup>[7,8]</sup>。因而近年来得到了科研人员的广泛关注。

本文运用多光束干涉原理,对级联马赫-曾德尔干涉仪(M-ZI)的干涉问题进行了理论分析和数值模拟,得出当光纤干涉臂长度差  $\Delta L$  按顺序取一组值时,其透射谱为性能较好的梳状谱图,本文的结果对这类器件在未来的光通信领域中的应用具有一定的指导意义。

## 2 理论分析

级联马赫-曾德尔干涉仪主要是由多个 3 dB 单模光纤耦合器通过干涉臂级联而成的,如图 1 所示。这是一个多光束干涉问题,从图中可以看出,当级联干涉臂的数目  $N$  为 2 时,从  $E_1$  端入射、从  $E_3$  端出射的光就被分为四束:  $E_1-A_1-A_2-E_3$ ,  $E_1-A_1-B_2-E_3$ ,  $E_1-B_1-A_2-E_3$ ,  $E_1-B_1-B_2-E_3$ 。级联的干涉臂越多,分开的光束数就越多,二者之间是  $2^N$  倍的关系。下面对多级干涉进行分析。

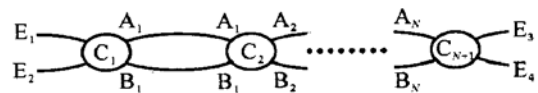


Fig. 1 Schematic diagram of Cascaded MZI

对于一个熔锥型光纤耦合器,其散射矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} \cos(\kappa z) & -j\sin(\kappa z) \\ -j\sin(\kappa z) & \cos(\kappa z) \end{bmatrix},$$

其中  $j = \sqrt{-1}$ ,  $\kappa$  为耦合器的耦合系数,  $z$  为器件的有效耦合长度。对特定波长的光,在单模传输时,  $\kappa z$  可用  $\int_0^z \kappa dz'$  来代替,令  $\Phi = \int_0^z \kappa dz'$ 。在理想情况下,对特定的工作波长尽量满足  $\Phi = \pi/4$ ,这就是 3 dB 耦合器,它的散射矩阵为

$$S = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \\ -j & 1 \end{bmatrix}.$$

在图 1 中,假设输入  $E_2 = 0$ ,则对于输入  $E_1$ ,经过耦合器  $C_1$ ,有

$$\begin{bmatrix} A'_1 \\ B'_1 \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 \cos(\kappa z) \\ -jE_1 \sin(\kappa z) \end{bmatrix}.$$

如图 2 所示,第  $i$  个干涉臂的传输矩阵可表示

\* 国家自然科学基金(6077012)和天津市自然科学基金(013601811,003600811)资助课题。

E-mail: lje@eyou.com

收稿日期: 2001-12-24; 收到修改稿日期: 2002-03-13

为

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp(j\Delta\Phi_i) \end{bmatrix},$$

其中,

$$\Delta\Phi_i = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L_i,$$

$\Delta L_i$  为第  $i$  个干涉臂的臂长差(臂长  $B$  减去臂长  $A$ )。

设矩阵  $C_i = ST_i$ , 则有

$$\begin{bmatrix} A'_{i+1} \\ B'_{i+1} \end{bmatrix} = C_i \begin{bmatrix} A'_i \\ B'_i \end{bmatrix},$$

其中  $C_i$  体现了级联马赫-曾德尔干涉仪从第  $i$  级到第  $i+1$  级的递推关系。若耦合器为 3 dB 耦合器, 则有

$$C_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & -j \exp(j\Delta\Phi_i) \\ -j & \exp(j\Delta\Phi_i) \end{bmatrix}.$$

由散射矩阵  $S$  和矩阵  $C_i$ , 可以求出由任意多个单模光纤耦合器级联马赫-曾德尔干涉仪的输出光的光强关系式。

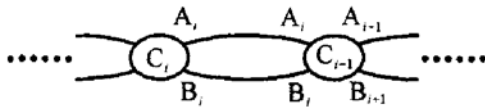


Fig. 2 Schematic diagram of  $i$ th MZI

### 3 数值模拟

利用以上的推导结果, 经计算机模拟, 即可得到用 3 dB 耦合器级联干涉仪的干涉谱图。设干涉臂个数为  $N$ , 那么 3 dB 耦合器的个数为  $(N+1)$ 。一般情况下, 由这种干涉形成的光谱图是各种各样的。但是当干涉臂取一系列定值时, 就会得到我们所需要的干涉谱图。

在计算中, 假设光纤的纤芯折射率  $n = 1.457$ , 常量  $K = 0.514756$ , 图 3 为  $N = 3$ , 臂长差  $\Delta L$  取几个不同序列值时从  $E_3$  端所输出的光强出射率模拟谱图。

计算发现, 当干涉臂的臂长差取  $[\Delta L_1, \Delta L_2, \Delta L_3]_{B-A} \approx K[1, 4, -1]$  mm 时, 就得到了如图 4 所示的周期谱图, 这是一种梳状谱, 其谱图周期  $\Delta\nu = 200$  GHz, 边模抑制比  $\eta_{SSR}$  约为 92.59%, 半强宽度间隔  $\delta\nu = 46$  GHz。其边模抑制比明显高于图 3 中曲线 a~c 的情况。

当增加干涉臂的个数  $N$  时, 由数值计算显示, 在干涉臂长差取一定的数列时, 仍可以得到类似的梳状谱; 而且随着干涉臂数目的增加, 其边模抑制比还可以得到进一步改善。如图 5 和图 6 所示分别为  $N = 5$  和  $N = 7$  时较好的干涉谱图。计算所得最大的

峰值隔离度写成 dB 形式分别为  $I_{N=3} \approx 11.30$  dB,  $I_{N=5} \approx 13.87$  dB,  $I_{N=7} \approx 22.60$  dB。

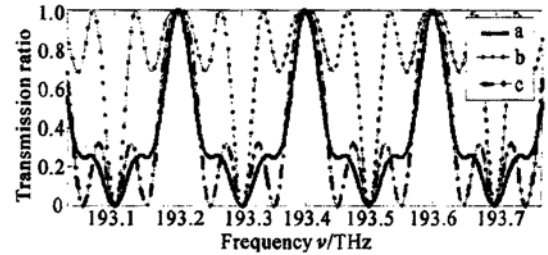


Fig. 3 Transmission variation with frequency at  $E_3$  port of Cascaded MZI,  $N = 3$ . a:  $\Delta L = K[1, 2, -3]$  mm,  $\Delta\nu = 200$  GHz,  $\eta_{SSR} \approx 74.07\%$ ,  $\delta\nu \approx 55$  GHz; b:  $\Delta L = K[1, 6, 1]$  mm,  $\Delta\nu = 200$  GHz,  $\eta_{SSR} \approx 68.36\%$ ,  $\delta\nu \approx 33$  GHz; c:  $\Delta L = K[1, 4, 3]$  mm,  $\Delta\nu = 200$  GHz,  $\eta_{SSR} \approx 67.66\%$ ,  $\delta\nu \approx 60$  GHz

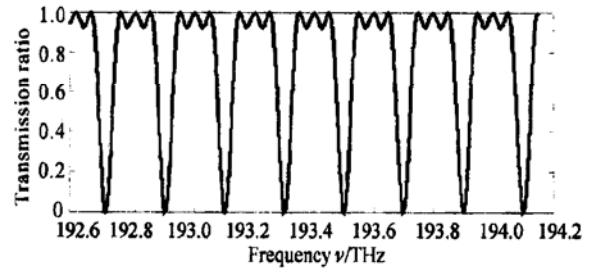


Fig. 4 Transmission variation with frequency at  $E_3$  port of united MZI,  $N = 3$ ,  $\Delta L = K[1, 4, -1]$  mm

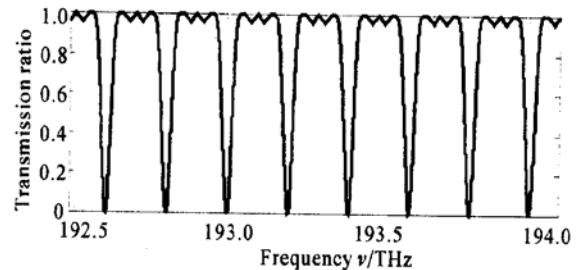


Fig. 5 Transmission variation with frequency at  $E_3$  port of united MZI,  $N = 5$ ,  $\Delta L = 2K[1, 1, -1, 1, 1]$  mm,  $\Delta\nu = 200$  GHz,  $\eta_{SSR} \approx 95.90\%$ ,  $\delta\nu \approx 35$  GHz

计算显示, 当干涉臂的级联个数为偶数时, 未能发现边模抑制比较高的类似的特征谱图。这种梳状出射率谱图具有如下几个特征:

1) 在该干涉仪中有两个输出端, 如图 1 所示的  $E_3$  和  $E_4$  端, 由能量守恒原理及理论计算可知, 这两个输出端的输出能量是互补的, 图 7 中曲线 a 是  $N = 7$  时对应  $E_4$  端的谱图。

2) 上面得到的出射率梳状谱图具有峰值平坦的特性, 峰值大小均为 1; 而且, 当干涉臂的级联个数为奇数时, 出射峰的最大边模抑制比只随着干涉臂数目的增加而得到提高。

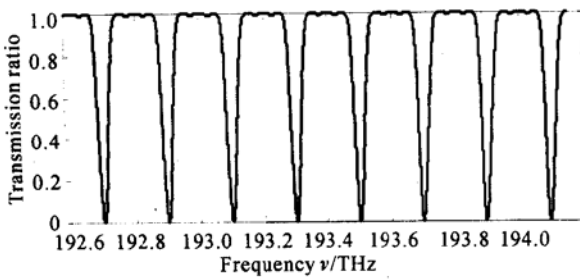


Fig. 6 Transmission variation with frequency at  $E_3$  port of united-MZI,  $N=7$ ,  $\Delta L=K[1, -2, -2, -2, -2, -2, -2]$  mm,  $\Delta\nu=200$  GHz,  $\eta_{SSR}\approx 99.45\%$ ,  $\delta\nu\approx 33.3$  GHz

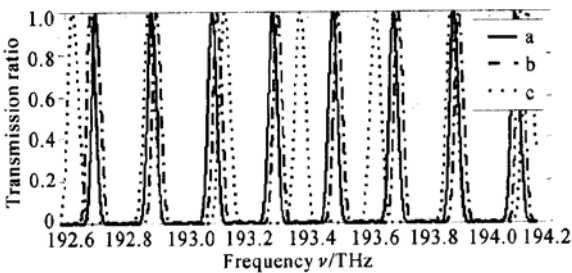


Fig. 7 Transmission variation with frequency at  $E_4$  port of united-MZI,  $N=7$ . a:  $\Delta L=K[1, -2, -2, -2, -2, -2, -2, 1]$  mm,  $\Delta\nu=200$  GHz; b:  $\Delta L=0.5148\times [1, -2, -2, -2, -2, -2, -2, 1]$  mm,  $\Delta\nu\approx 200$  GHz; c:  $\Delta L=0.411805\times [1, -2, -2, -2, -2, -2, -2, 1]$  mm,  $\Delta\nu=250$  GHz (about 2 nm)

3) 当保持各个干涉臂的臂长差比例不变, 调节其大小时, 其出射峰间隔会得到相应调节。由于相位差  $\Delta\Phi$  与臂长差  $\Delta L$  有如下关系:

$$\Delta\Phi = \frac{2\pi n}{\lambda} \Delta L = \frac{2\pi n\nu}{c} \Delta L,$$

可见对于一个干涉臂的情况, 出射谱的峰值间隔  $\Delta\nu$  与干涉仪的臂长差的大小是成反比关系的, 对于级联情况同样如此, 即如果维持各个干涉臂的臂长差比例关系不变而增大其大小, 则梳状谱的峰值间隔将会相应变小, 反之增大。例如, 对于臂长差为  $K[1, -2, -2, -2, -2, -2, -2, 1]$  mm 的情况, 有,  $K\Delta\nu = \text{常量}$ , 通过计算机检验计算, 臂长差常量  $K$  与峰值间隔  $\Delta\nu$  的数值关系式可归纳为

$$K\Delta\nu = \frac{c}{2n} \times 10^{-6} \approx \frac{150}{n} = \frac{150}{1.457} \approx 102.95127,$$

式中  $\Delta\nu$  的单位为 GHz,  $c$  代表真空中的光速,  $n$  为干涉臂的折射率。由于干涉臂的比例关系不变, 此过程中边模抑制比不变。另外, 如果调节臂长差的大小, 峰值位置与峰值间隔将同时得到调节, 如图 7。

4) 由峰值间隔  $\Delta\nu$  和半强宽  $\delta\nu$ , 可以计算出梳状出射谱的精细度  $F$ , 计算发现, 当改变峰值间隔

时, 梳状谱精细度保持不变。如图 7 所示,  $N=7$  时的精细度保持为  $F = \delta\nu/\Delta\nu \approx 16.7\%$ 。

5) 对于某一级联数目  $N$  的谱图, 对应干涉臂长差的比例关系可能并不唯一。例如对于  $N=7$  的情况, 当比例关系取  $[-1, -2, -2, 2, -2, -2, -1]$  或  $[-1, 2, -2, -2, -2, 2, -1]$  等值时, 均可得到相同边模抑制比的谱图。

6) 在一个梳状出射谱中, 微弱改变任一传输臂长差或者改变任一耦合器的耦合输出比, 都会导致梳状出射谱的边模抑制比的变化, 也可能导致输出峰的漂移; 而且, 变化的大小随传输臂长差或耦合输出比改变的增大而增加。图 8 所示的是干涉臂长差的微小变化对出射谱影响的典型情况, 其中曲线 a 的情况同图 7 中曲线 a; 曲线 b 是第 2 干涉臂臂长差增大 100 nm 的出射率谱图, 其峰值约降低 0.7%, 峰值频率约漂移了 5.7 GHz, 边模抑制比约为 94.1%; 曲线 c 是第 4 干涉臂臂长差增大 100 nm 的出射率谱图, 峰值约降低 0.8%, 峰值频率漂移约 5.7 GHz, 边模抑制比约为 87.3%。图 9 所示是耦合器耦合比的变化对出射谱影响的典型情况, 其中曲线 a 的情况同图 7 中曲线 a; 曲线 b 是将第 8 个耦合器输出耦合改为 3:7 的出射率谱图, 峰值约降低 0.4%, 频率漂移约 1 GHz, 边模抑制比约为 92.5%; 曲线 c 是将第 3 个耦合器输出耦合比改为 3:7 所得的谱图, 峰值大小不变, 频率也不漂移, 边模抑制比约变为 92.9%。

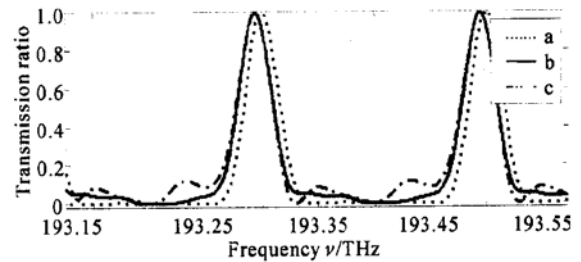


Fig. 8 The change of transmission with a little variety of the difference of the interference arms. a: The same to Fig. 7a; b:  $\Delta L_2$  enhances 100 nm; c:  $\Delta L_4$  enhances 100 nm

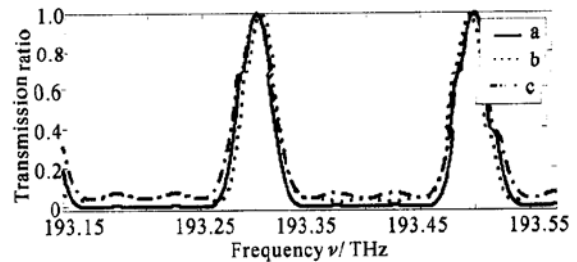


Fig. 9 The change of transmission with the variety of coupling ratio of a coupler. a: The same to Fig. 7a; b: The coupling ratio of the last coupler is changed to 3:7; c: The coupling ratio of the third coupler is changed to 3:7

**结论** 本文所示的器件是采用多级马赫-曾德尔干涉仪串联而成的, 利用干涉原理对其进行了模拟和分析, 表明当光纤干涉臂长差  $\Delta L$  取一定比例关系时, 将得到精细度一定的梳状出射谱图, 其边模抑制比随干涉臂数目的增加而提高。

实际制取这种干涉仪存在较大的难度, 文献[9]提出了一种控制臂长差制取多级马赫-曾德尔干涉仪方法; 同时, 利用平面波导技术也可实现这种干涉仪的制作, 而且, 平面波导型马赫-曾德尔干涉仪可以在干涉臂上加入相位控制器或移相器, 较容易调节其臂长差。在如何控制臂长差, 制取级联干涉仪方面有待进一步探索。

图 10 为其在光纤激光器中的应用实例。这种干涉仪具有插损小、偏振不灵敏、峰值平坦、信道均匀性好、带宽窄和透射峰间隔连续可调等优点, 故具有巨大的应用前景。相信在不久的将来, 这种全光纤干涉仪将以其独特的优点在全光网络中得到广泛的应用。

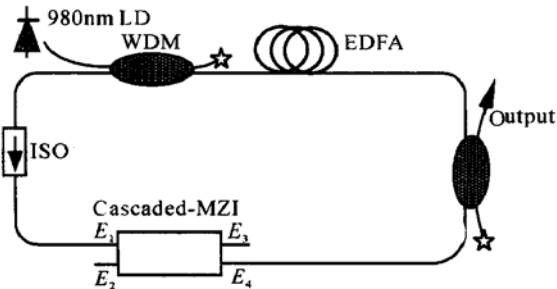


Fig. 10 A application of the cascaded MZI in fiber laser

## 参 考 文 献

- 1 Ortegta B, Capmany J, Pastor D *et al.*. Full characterization of long periodic superstructure fiber Bragg grating in multichannel devices. LEOS' 98 Laser and Electro-Optical Society Conference, Orlando, Florida (USA), 1998
- 2 Eggleton B J, Krug P A, Poladian L *et al.*. Long periodic superstructure Bragg gratings in optical fibres. *Elect. Lett.*, 1994, **30**(19): 1620
- 3 Ibsen M, Durkin M K, Cole M J *et al.*. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(16): 842~ 844
- 4 Weis R S, Kersey A D, Berkoff T A. A four-element fiber grating sensor array with phase-sensitive detection. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1469~ 1472
- 5 Kersey A D, Berkoff T A, Morey W W. High-resolution fiber grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3): 236~ 238
- 6 Song Minh, Yin Shizhuo, Ruffin P B. Fiber Bragg grating strain sensor demodulation with quadrature sampling of a Mach-Zehnder interferometer. *Appl. Opt.*, 2000, **39**(7): 1106~ 1111
- 7 Bethuys S, Lablonde L, Rivoallan L *et al.*. Optical add/drop multiplexer based on UV-written Bragg grating in twin-core fiber Mach-Zehnder interferometer. *Electron. Lett.*, 1998, **34**(12): 1250~ 1252
- 8 Feng Dejun, Kai Guiyun, Liu Heliang *et al.*. Theoretical study on integrated fiber Add/Drop multiplexer. *APCC/OECC '99*. Beijing (China), 1999
- 9 Yao Shouquan, Chen Kaixuan. A 8-channel fiber Mach-Zehnder interferometric super narrow spacing wavelength-division-multiplexer. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1998, **18**(8): 1113~ 1118 (in Chinese)

## Theoretical Study on Optical Comb Filter of Cascaded M-Z Interferometer

Li Jie Tong Zhengrong Meng Hongyun Zhang Weigang Kai Guiyun Dong Xiaoyi  
(Institute of Modern Optics, Nankai University, Tianjin 300071)

(Received 24 December 2001; revised 13 March 2002)

**Abstract:** A cascaded M-Z fiber interferometer has been analyzed, which is made of several 3 dB couplers in series. Theoretical analysis and numerical simulation indicate that a good comb-like curve will be obtained when the length difference  $\Delta L$  of interference arms is given by a certain value in order. SSR will increase as adding of the number of interference arms.

**Key words:** applied optics; Mach-Zehnder interferometer; cascade; numerical simulation