

光纤干涉型波分复用器件的研究*

吴 芳 黄肇明 姚寿铃

(上海大学通信与信息工程学院电子工程系, 上海 201800)

摘 要 利用耦合模理论, 分析了马赫-陈德尔(Mach-Zehnder)干涉型波分复用器的复用间隔, 波长隔离度及输出功率等特性, 讨论了它的温度稳定性, 并对其波长调谐性进行了分析与实验。

关键词 波分复用, 干涉仪, 滤波器。

1 引 言

波分复用耦合器是光纤波分复用系统的一个基本器件。它将两路不同波长的光合于一路(合波)或将一束包含不同波长的光分开为两路输出(分波)。在常规的波分复用中, 利用耦合系数随波长不同而不同达到此功能, 但通常波长间隔较宽。为将复用间隔压缩, 已提出多种方法: 利用传播常数变化率不同的两根光纤制作耦合器^[1]; 超长耦合区的光纤耦合器等^[2]。1994年 Bures 等人提出马赫-陈德尔干涉滤波器形成的波分复用器件, 其波长间隔可小至 1.39 nm^{-3} , 为窄间隔波分复用提供了一条新路。由于它使用了双光束干涉的原理, 随着干涉级数的增大, 器件具有越来越高的波长分辨率, 也就使波分复用间隔越来越小, 但同时也就对外界的扰动更加敏感。本文利用耦合模方程分析了这种器件的工作特性及其温度稳定性, 器件的温度稳定性将成为它实用化的一个关键问题, 同时也对器件的调谐特性进行了分析。初步的实验证实了理论分析的正确性。

2 马赫-陈德尔干涉型波分复用器件的工作原理

马赫-陈德尔干涉型波分复用器的结构如图1所示。它是由两个 3 dB 耦合器级联而成。假设所用的两根光纤是相同的, 其传播常数为 β , 耦合器(CP_1)的两个输入臂的电场振幅分别为 a_1, a_2 , 其输出分光比为 $\alpha_1^2(\lambda)$, 光束从臂 1 进入器件($|a_1|^2 = 1, |a_2|^2 = 0$), 则耦合器 1 的输出电场振幅 b_1, b_2 满足:

$$|b_1/b_2|^2 = \alpha_1^2(\lambda) \quad (1)$$

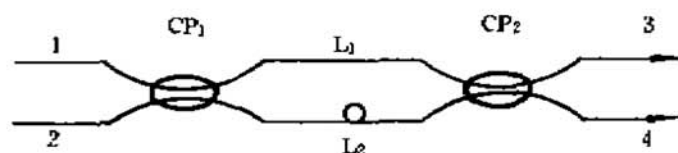


Fig. 1 Diagram of Mach-Zehnder interferometric WDM
CP₁, CP₂; Coupler, $\Delta L = L_2 - L_1$

* 国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1995年9月29日; 收到修改稿日期: 1995年11月26日

若两耦合器间的两干涉臂长差为 ΔL , 耦合器 2 (CP₂) 的分光比为 $\alpha_2^2(\lambda)$, 由耦合模方程, 耦合器 2 的输出振幅 a_3, a_4 由下式给出^[4]:

$$a_3 = \frac{b_1 + j\alpha_2 b_2 \exp(j\phi_1)}{\sqrt{1 + \alpha_2^2}}, \quad a_4 = \frac{b_2 \exp(j\phi_1) + j\alpha_2 b_1}{\sqrt{1 + \alpha_2^2}}, \quad (2)$$

式中 $\phi_1(\lambda) = \beta(\lambda)\Delta L$ 为两干涉臂的相位差, $\beta = nk = 2\pi n/\lambda$, n 为光纤有效折射率, λ 为波长。耦合器 2 输出臂的功率为:

$$P_3 = |a_3|^2 = \frac{\alpha_1^2 + \alpha_2^2 - 2\alpha_1\alpha_2 \sin \phi_1}{(1 + \alpha_1^2)(1 + \alpha_2^2)}, \quad P_4 = |a_4|^2 = \frac{1 + \alpha_1^2\alpha_2^2 + 2\alpha_1\alpha_2 \sin \phi_1}{(1 + \alpha_1^2)(1 + \alpha_2^2)}, \quad (3)$$

由(3)式知干涉仪中前置和后置耦合器的作用是完全等效的, 整个器件波长性能由 $\alpha_1, \alpha_2, \phi_1$ 三参量的波长特性组合而成。由于耦合器固有的宽带宽, 首先考虑两干涉臂的波长效应。假定 α_1, α_2 为常数, 当波长为 λ_1 时, 若 $\sin \phi_1(\lambda_1) = 1$, 即相应于

$$\beta(\lambda_1) \Delta L = \pi/2 + 2N\pi, \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

则臂 3 输出功率为谷值

$$P_{3\min} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)^2}{(1 + \alpha_1^2)(1 + \alpha_2^2)} \quad (5)$$

而波长为 λ_2 时, 若 $\sin \phi_1(\lambda_2) = -1$, 相应于

$$\beta(\lambda_2) \Delta L = 3\pi/2 + 2N\pi, \quad N = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

臂 3 输出功率为峰值:

$$P_{3\max} = \frac{(\alpha_1 + \alpha_2)^2}{(1 + \alpha_1^2)(1 + \alpha_2^2)} \quad (7)$$

则波分复用间隔 $\Delta\lambda = |\lambda_2 - \lambda_1|$, 由 $|\beta(\lambda_2) - \beta(\lambda_1)| = \pi/\Delta L$ 所决定, 将其按泰勒级数展开, 得

$$\beta(\lambda_2) = \beta(\lambda_1) + (d\beta/d\lambda)|_{\lambda_1}(\lambda_2 - \lambda_1) + \dots \quad (8)$$

故有

$$\Delta\lambda = \frac{\pi}{\Delta L |d\beta/d\lambda|_{\lambda_1}} \quad (9)$$

其中 $d\beta/d\lambda$ 可以从特征方程解出 β 后进行数值微分获得, 也可以由下面的公式作出近似的估算, 因为 $\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left(\frac{2\pi n}{\lambda} \right) = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{dn}{d\lambda} - \frac{2\pi n}{\lambda^2}$, 若色散 $dn/d\lambda$ 变化很小而略去不计且弱导条件 $n \approx n_1 \approx n_2$ 成立, 则有:

$$\Delta\lambda \approx \frac{\lambda_1^2}{2n \Delta L} \quad (10)$$

亦即马赫-陈德尔干涉波分耦合器的复用间隔直接与干涉臂长之差成反比。譬如零级干涉时 ($N = 0, \lambda_1 = 1.5 \mu\text{m}, n = 1.465$), $\Delta L \approx 0.26 \mu\text{m}$, 此时器件波长间隔 $\Delta\lambda \approx 3 \mu\text{m}$, 而当 $N = 200, \Delta L = 208 \mu\text{m}$ 时, 复用间隔锐减至 4nm , 若取 $N = 2000$, 干涉臂长差也仅有 $\Delta L \approx 2 \text{mm}$, 复用间隔达到 0.4nm 。这个复用间隔远远小于耦合器的复用间隔, 因此整个器件的复用特性依赖于干涉臂长差, 而其波长隔离度则由两个耦合器的分光比所决定:

$$P_{3\max}/P_{3\min} = 20 \log [(a_2 + a_1)/(a_2 - a_1)] \quad (11)$$

注意 α_1, α_2 为耦合器的分光电场振幅比。如果要求波长隔离度大于 20dB , 那么两个耦合器功率分光比的比值需在 $(40\%/60\%) \sim (60\%/40\%)$ 之间, 即当耦合器 1 的分光比 $\alpha_1^2 = 1 (3 \text{dB})$ 耦合器时, 耦合器 2 的分光比要求为 $(40\%/60\%) < \alpha_2^2 < (60\%/40\%)$, 臂 3 及臂 4 输出功率以 $1/2$ 为中心线起伏。而耦合器 1 的分光比为 $\alpha_1^2 = 2$ 时, 耦合器 2 的分光比要求为 $(40\%/30\%) < \alpha_2^2 < (60\%/20\%)$, 但此时臂 3 及臂 4 输出功率不以同一中心线起伏, 如图 2

所示，此时器件可用作调制器或带通、带阻滤波器。由(3)式知 P_3 的中心功率线为 $(\alpha_1^2 + \alpha_2^2)/(1 + \alpha_1^2)(1 + \alpha_2^2)$ ，而 P_4 的中心功率线为 $(1 + \alpha_1^2\alpha_2^2)/(1 + \alpha_1^2)(1 + \alpha_2^2)$ ，只有当 α_1^2 或 α_2^2 为 1 时，两中心线才合二为一。

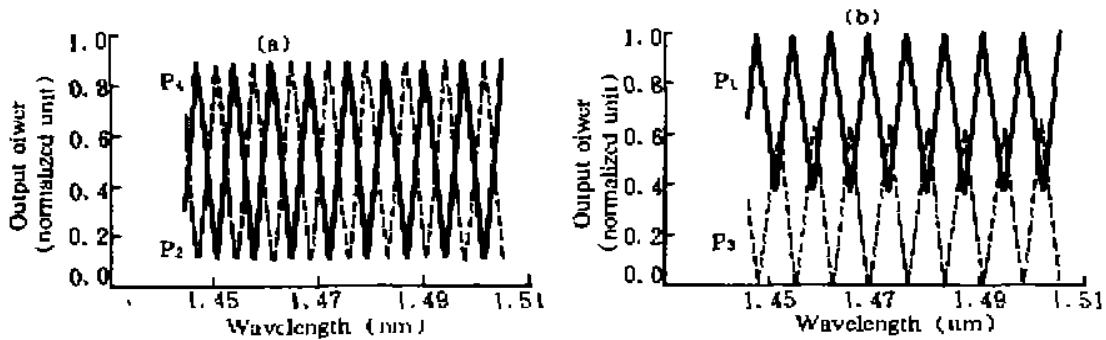


Fig. 2 Output power of M-Z interferometric WDM

(a) $\alpha_1^2 = 1, \alpha_2^2 = 1$ (b) $\alpha_1^2 = 2, \alpha_2^2 = 2$ (Dashed line, P_3 , Solid line, P_1)

3 器件的温度稳定性

因为该器件利用了光的相位干涉，故具有极高的波长灵敏性，可完成密集型波分复用的要求。但与此同时，它也具有外界干扰不稳定性，如对温度等的高度灵敏。下面将分析器件对外界干扰的敏感程度。在(3)式中 $\phi_i(\lambda) = \beta(\lambda)\Delta L$ ，假定外界微扰引起干涉臂长差 ΔL 变化 δL ，则相位变化为 $\delta\phi = (2\pi n/\lambda) \delta L$ ，故使相位变化 π 的长度微扰为 $\delta L = \lambda/2n$ 。设波长 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ ， $n = 1.465$ ，则 $\delta L \approx 0.5 \mu\text{m}$ 即会使器件输出功率从峰值降至谷值。现在考虑器件的温度稳定性。光纤具有热胀冷缩的特性，且其有效折射率也随温度而变化。相位 ϕ 的变化与长度变化和折射率变化的关系为 $\delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (\delta n\Delta L + n\delta L)$ ，转化为随温度的变化率则有^[5]：

$$\frac{\delta\phi}{\delta t\Delta L} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{dn}{dt} + \frac{n(d\Delta L)}{\Delta L dt} \right) \tag{12}$$

对石英光纤， $[d(\Delta L)/\Delta L dt] \approx 5 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-1}$ ， $\frac{dn}{dt} \approx 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，代入(10)式得

$$\delta\phi/\delta t\Delta L \approx 45.2 \text{ rad } ^\circ\text{C}^{-1}\text{m}^{-1} \tag{13}$$

如图 3 所示为计算的不同波分间隔器件中相位及输出功率随温度的变化曲线，波分越密则温度影响越大。

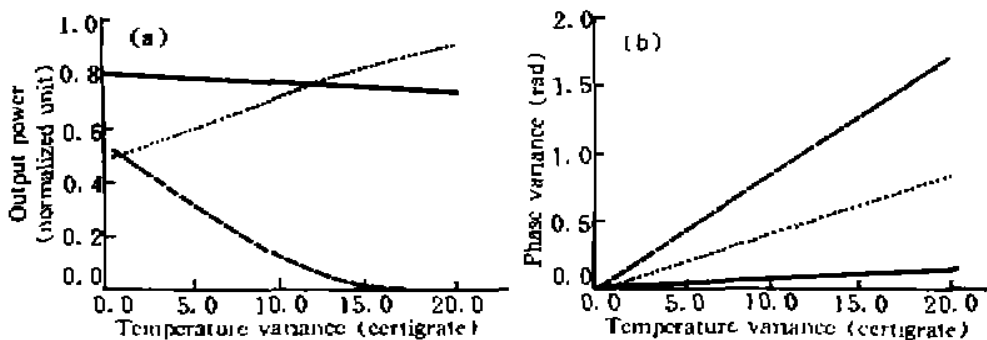


Fig. 3 Phase (b) and output power (a) vary with temperature

Solid line, $\Delta L = 208 \mu\text{m}$, Short dashed line, $\Delta L = 1040 \mu\text{m}$, Long dashed line, $\Delta L = 2080 \mu\text{m}$

4 器件的波长可调谐性

干涉器件对外界扰动的灵敏性使设计可调谐的波分复用器成为可能。另一方面由于器件制作过程不可避免的误差,在器件制作完成后也需略作调整。通过对调谐特性的研究,可以提供—个量化的依据。将干涉臂之一安装在一块 PZT 上,因为波长复用间隔与两干涉臂长差值直接成反比,利用 PZT 的伸缩特性改变臂长差,可以方便地对复用间隔进行微调,也可以对复用波长进行微调。这在不能确定复用激光器波长的场合十分有用,如在掺铒光纤放大器中对不同泵浦波长的选择。作者对图 1 所示的马赫-陈德尔干涉仪进行了实际测量,图 4(a)为 PZT 上未加电压时器件的复用特性,该器件是针对 $1.3 \mu\text{m}$ 波长而设计的。从图中可看出,从左至右,中心功率点逐渐由低向高移动,以 $1.3 \mu\text{m}$ 附近为中心,这正是耦合器分光比波长特性相互作用的结果。此时峰-谷波长间隔约 40 nm 。图 4(b)为在 PZT 上加 100 V 直流电压时器件的复用特性。因为 PZT 安装在较短的干涉臂上,故当 PZT 的伸展拉伸了光纤后,减小了两干涉臂长差值,器件峰-谷波长间隔增加至 60 nm 。从图 4(a)及图 4(b)可注意到峰值及谷值波长均略有移动,由前面分析知,峰值与谷值波长由(4)式及(6)式决定,其中 N 必须为整数。这就决定了要保证某一波长 λ_1 为峰值或谷值,两干涉臂长差 ΔL 是跳跃的,增加步长

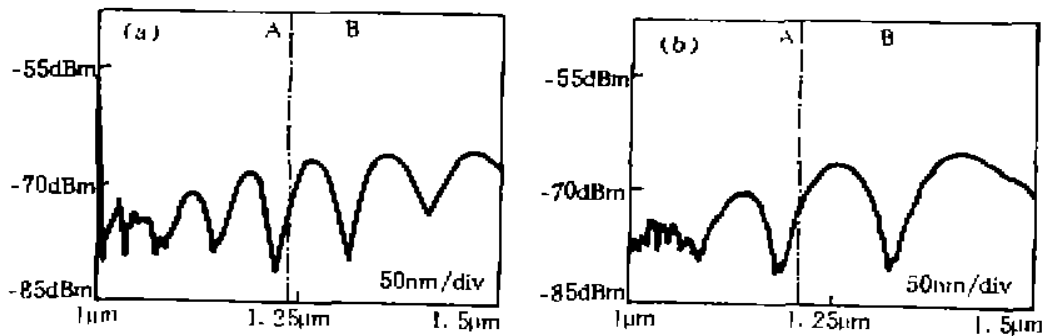


Fig. 4 Spectral Characteristic of M-Z interferometric WDM

(a) without voltage on PZT, (b) with voltage (100 V) on PZT

SL 需满足:

$$SL = 2\pi / \beta(\lambda_1) \approx \lambda_1 / n \quad (14)$$

换句话说,假设器件相邻的两个峰值功率波长分别为 λ_1 、 λ_2 ,则当两干涉臂长度差值在 SL 长度之内变化时,可将功率峰值移动到 λ_1 、 λ_2 之间的任意波长上。

结 论 马赫-陈德尔干涉型波分复用器是一很有希望的密集型波分复用器件,它的波长间隔与其两干涉臂长差直接成反比,因而容易获得很高的波分密度。它的波长隔离度则由两耦合器的相对特性所决定。由于干涉仪特有的灵敏性,此类器件的温度稳定性略差,波分越密则稳定性越差。文中对器件的波长可调谐性进行了讨论和实验。

参 考 文 献

- [1] C. J. Chung, A. Safaai-Jazi, Narrow-band spectral filter made of W-index and step index fiber. *J. Lightwave Technology*, 1992, 10(1): 42~45
- [2] O. Parriaux, F. Bernoux, G. Chartier, Wavelength selective distribution coupling between single-mode optical fibers for multiplexing. *J. Opt. Commun.*, 1981, 2(2): 105~109
- [3] J. Burns, All-fiber dense wavelength division multiplexers. *Proc. SPIE*, 1994, 2321: 455~459
- [4] 赵仲刚, 光纤通信与光纤传感. 上海科学技术文献出版社, 1993: 199~201
- [5] 张国顺, 光纤传感器技术, 北京水利电力出版社, 1988: 206~208

The Characteristic Study of Fiber Mach-Zehnder Wavelength-Division-Multiplexer

Wu Fang Huang Zhaoming Yao Shouquan

*(Department of Electronics Engineering, School of Communication and Information Engineering,
Shanghai University, Shanghai 201800)*

(Received 27 September 1995; revised 26 November 1995)

Abstract Using coupling-mode equations, the characteristics of Mach-Zehnder Wavelength-Division-Multiplexer (WDM), such as wavelength multiplexing interval, isolation ratio and output power, are analysed. The temperature stabilization is discussed. The analysis and experiment of its wavelength tunability are presented.

Key words WDM, interferometer, filter.