

带有反馈稳定控制的全光纤可调光滤波器

李京辉 郭奕理 高以智
(清华大学电子工程系, 北京 100084)

提 要

本文研制了带有反馈稳定控制的全光纤可调光滤波器, 并从理论上进行了推导和分析。实验结果与理论分析完全相符。最后, 讨论了该器件的一些可能的应用。

关键词: 光滤波器、光纤、反馈。

随着光通信中密集频分复用技术及相关技术的发展, 窄带宽的可调光滤波器越来越受到人们的重视。本文所研制的全光纤可调光滤波器, 采用单模光纤制成, 具有结构简单, 制作方便, 便于与光纤系统结合的优点。此外由于采用了反馈稳定控制的方法, 减小了外界因素的干扰, 提高了器件的稳定性。

一、结构与原理

全光纤可调光滤波器采用的是马赫-陈德尔 (Mach-Zehnder) 干涉仪的结构^[1], 其结构框图如图 1 所示。它由两个 3 dB 光纤方向耦合器, 一个压电陶瓷移相器及反馈控制电路构成的。其特性可由传输矩阵描述*。设方向耦合器的耦合长度为 d , 耦合系数为 δ , 则其传输矩阵为^[2]:

$$M_{\text{coupler}} = \begin{bmatrix} \cos(\delta d) & i \sin(\delta d) \\ i \sin(\delta d) & \cos(\delta d) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

对于 3 dB 方向耦合器, $\delta d = (\pi/4)$ 。

设马赫-陈德尔干涉滤波器两参考臂的长度差为 ΔL , 当光波经过其两臂传输后产生了 $k\Delta L$ 的相位差 ($k = 2\pi n/\lambda = 2\pi n f/c$) 其中 λ 为真空中光波长, c 为真空中光速, f 为真空中光的频率, n 为光纤芯的折射率), 其传输矩阵为

$$M_{\text{phase shift}} = \begin{bmatrix} \exp(ik\Delta L/2) & 0 \\ 0 & \exp(-ik\Delta L/2) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

设滤波器端口 1 输入光场的复振幅为 E_1 , 端口 2 输入光为 0, 则从端口 3, 4 输出光场的复振幅 E_3, E_4 为

$$\begin{bmatrix} E_3 \\ E_4 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中 $M = M_{\text{coupler 2}} \times P_{\text{phase shift}} \times M_{\text{coupler 1}}$, 对于两个 3 dB 光纤方向耦合器, 可得

收稿日期: 1990年12月5日; 收到修改稿日期: 1991年4月11日

* 为简化起见, 忽略耦合器的插入损耗。

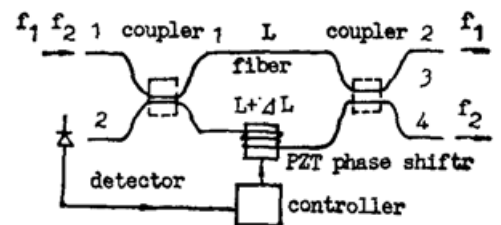


Fig. 1 Configuration of all-fiber tunable filter

$$M = \begin{bmatrix} i \sin(k\Delta L/2) & i \cos(k\Delta L/2) \\ i \cos(k\Delta L/2) & -i \sin(k\Delta L/2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

设光滤波器端口 1 输入的光功率为 P_1 , 则端口 3, 4 输出的光功率 P_3, P_4 分别为

$$P_3 = P_1 \sin^2(\pi n f \Delta L / c), \quad P_4 = P_1 \cos^2(\pi n f \Delta L / c) \quad (5)$$

当以光频为 f_1, f_2 的两光波同时从滤波器端口 1 注入时, 若 f_1, f_2 满足下列关系时

$$(\pi n f_1 \Delta L / c) = [m + (1/2)]\pi, \quad (\pi n f_2 \Delta L / c) = m\pi, \quad (6)$$

式中 m 为整数。则由 (5) 式可知, 频率 f_1 的光波全部从滤波器端口 3 输出, 频率 f_2 的光波全部从端口 4 输出, 从而实现光频滤波。

光滤波器的滤波频道间隔 f_s 为

$$f_s = |f_1 - f_2| = (c/2n\Delta L), \quad (7)$$

为实现可调谐光滤波, 实验在马赫-陈德尔干涉滤波器的一个光纤臂上引入一个压电陶瓷移相器。当在压电陶瓷移相器上加不同的电压时, 则在干涉滤波器两臂长之差就会不同, 由 (5) 式可知, 滤波器输出端口输出最大光强的光波的频率 f 就会不同, 从而实现可调谐滤波。

引入压电陶瓷移相器的另一个作用, 即利用滤波器端口 2 的反馈光强来调整移相器上的电压, 以抵消外界因素变化 (如温度、机械振动等) 引起的程差 ΔL 的变化, 提高滤波器的稳定性。

前面已得到了光在滤波器中的正向传输矩阵 M , 同理可得其反向传输矩阵:

$$M' = \begin{bmatrix} -i \sin(k\Delta L/2) & i \cos(k\Delta L/2) \\ i \cos(k\Delta L/2) & i \sin(k\Delta L/2) \end{bmatrix} \quad (8)$$

设端口 3, 4 的反射率为 r , 反馈回端口 1, 2 的光场的复振幅为 E'_1, E'_2 , 则

$$\begin{bmatrix} E'_1 \\ E'_2 \end{bmatrix} = M' \times r \times M \begin{bmatrix} E_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r E_1 \cos(k\Delta L) \\ -r E_1 \sin(k\Delta L) \end{bmatrix} \quad (9)$$

故反馈回滤波器端口 2 的光功率 P'_2 为

$$P'_2 = P_1 R \sin^2(2\pi n f \Delta L / c) \quad (10)$$

式中 $R = r^2$ 。将 (10) 式与 (5) 式比较可知, 滤波器端口 2 的反馈光强与端口 3, 4 的输出光强之间存在一定的对应关系, 即当端口 3 (或端口 4) 输出光强为最大或最小时, 端口 2 的反馈光强皆为最小值, 如图 2 所示。因此可以用端口 2 的反馈光强来控制移相器, 使得端口 2 的反馈光强恒为最小值, 这样就可以保证一个光频的光波全部从端口 3 出射, 另一个光频的光波全部从端口 4 出射, 从而提高了稳定性, 减小了串扰。

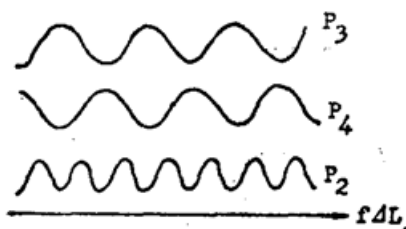


Fig. 2 Characteristic of output power and feedback power of the filter

二、实验结果

实验装置的框图如图 3 所示。所研制的全光纤可调光滤波器由普通单模光纤制成, 包括两个 3 dB 光纤方向耦合器, 一个压电陶瓷移相器*及用于选择波长和提高稳定性的反馈控

* 直径为 5 cm 的压电陶瓷环, 光纤在其上绕了 8 匝。

制电路(由 Z-80 微处理器构成)。实验使用波长为 $1.514 \mu\text{m}$ 的外腔半导体激光器,其线宽在 10 MHz 以下。激光器正向发出的光耦合到单模光纤中去,从端口 1 进入全光纤可调光滤波器,其背向输出的光入射到一只装有压电陶瓷的共焦腔型法布里-珀罗干涉仪中(其自由频谱区为 11 GHz),以监测激光器的输出模式。激光器的调谐可以通过用压电陶瓷改变腔长的方法实现,也可以靠改变温度的方法实现。

实验首先观察了全光纤可调光滤波器的滤波现象,并测试了其滤波频道间隔。具体方法是:在滤波器移相器上加锯齿波扫描电压,观察在某一单纵模光波输入时,滤波器的输出光波形;然后改变外腔激光器的腔长,使其光频移动,再观察滤波器输出的光波形。结果如图 4 所示。



(a) (b) (c) (d)

Fig. 4

- (a) The single mode waveform of the external cavity LD
- (b) Output power of the Filter
- (c) The single mode waveform after changing the optical frequency of the external cavity LD
- (d) Output power of the filter corresponding to the changed optical frequency

由图 4 可以看出,对应于滤波器移相器上的同一电压值,当输入光频变化时,滤波器输出光强也随着变化——光频滤波现象。当输入光波频率变化 f_s 时,滤波器输出光强将从最小(或最大)值变为最大(或最小)值,此 f_s 即为滤波器的频道间隔。已知法布里-珀罗腔的自由频谱区为 11 GHz,对应于图 4(a)、(c)中两输出峰间距 6.9 div。可以看到图 4(c)中的峰值位置相对于(a)移动了 0.6 div,即光频移动了 $0.6 \times 11 / 6.9 = 0.956 \text{ GHz}$ 。图 4(b)、(d)所示为光频移动前后光滤波器一个输出端的输出光强波形。可以看到图 4(d)中输出光强最大值的位置相对(b)中移动了 0.3 格,而输出光强最大值与最小值的间距为 1.5 格,其频道间隔 $f_s = 0.956 \times 1.5 / 0.3 = 4.8 \text{ GHz}$ 。

其次实验还观察了滤波器输出光强与反馈光强的对应关系。实验中观察到的现象完全与理论上推出的结论相符,如图 2 所示,从而验证了理论推导的正确性。这说明可以通过检测滤波器反馈光强来微调移相器上的电压,以减小外界因素影响,提高其稳定性。实验中观察到,在不加反馈稳定控制时,实验室中的机械振动可以使得光滤波器一个输出端的输出光强从最大值变为最小值,由式(5)可知,其相位变化在 90° 以上;加上反馈稳定控制后,同样振动所造成的输出光强的变化减小了 5 倍以上,即相位变化在 26° 以下。

此滤波器插入损耗较小,约 0.5 dB 左右。

三、结 论

本文所研制的窄频道间隔 (4.8 GHz) 的全光纤可调光滤波器可用于频分复用传输中的直接检测。若采用 n 级这种光滤波器,可滤出 2^n 个不同频率的光波(各光波频率间隔为 f_s)。

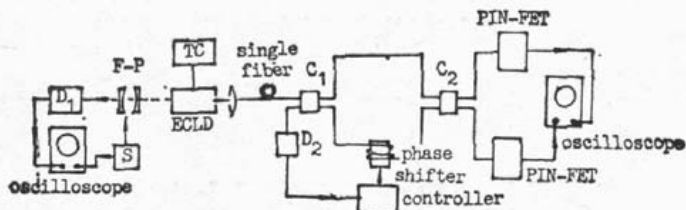


Fig. 3 Schematic setup of experiment

C_1, C_2 : coupler D_1, D_2 : detector S : sawtooth wave generator ECLD: external cavity LD
TC: temperature controller

这种滤波器加上交换控制电路后还可作为频分光交换系统的光频交换器件。此外,还可用它作鉴频器,直接检测光调频信号。所以全光纤可调光滤波器是一种很有应用前景的器件。

本实验完成过程中得到了上海交通大学茅仲明、本教研组张汉一、霍玉晶以及本科生王希勤、马晓红等同志的帮助,仅此一并致谢。

参 考 文 献

- [1] H. Toba *et al.*, *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, 1986, SAC-4, No. 9 (Dec), 1458~1467.
[2] B. H. Verbeek *et al.*; *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1988, 6, No. 6 (Jun), 1011~1015.

All-fiber tunable optical filter with stability feedback-control

LI JINGHUI, GUO YILI AND GAO YIZHI

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

(Received 5 December 1990; revised 11 April 1991)

Abstract

The design and implementation of an all-fiber tunable optical filter have been discussed in this paper. In order to enhance its stability, a feedback-control technique has been used here. Using propagation matrix, the characteristics of the filter are analysed. The experimental results, presented in the paper, coincide with theoretical analysis. Some possible applications of this device have been discussed.

Key words: optical filter; optical fiber; feedback.