

文章编号: 0258-7025(2004)07-0865-05

一种新的光纤布拉格光栅波长移位检测技术

梁 明, 钱景仁, 孙 箭

(中国科学技术大学电子工程与信息科学系光纤实验室, 安徽 合肥 230027)

摘要 提出了一种利用全光纤非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪作为边缘滤波器进行光纤布拉格光栅 (FBG) 波长移位检测的方案。这种边沿滤波器具有梳状的滤波特性, 且其两输出臂滤波特性互补。利用其一对滤波边沿, 可以将被测光栅的波长信息转化为功率信息进行检测。在制作时, 通过适当改变干涉臂长差可方便地调整测量范围和检测分辨率, 具有较大的灵活性。以两种不同的比较运算的方法消除系统功率起伏对测量结果的影响, 都得到了较好的结果。采用该检测方案进行了光纤布拉格光栅温度传感实验, 得到了 ± 10 pm 的波长测量精度。

关键词 光电子学; 光纤光栅传感; 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪; 边沿滤波器

中图分类号 TN 247 **文献标识码** A

A Novel Fiber Bragg Grating Wavelength Detection Technique

LIANG Ming, QIAN Jing-ren, SUN Jian

(Optical Fiber Laboratory, Department of Electronic Engineering and Information Science,
University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230027, China)

Abstract A method of fiber Bragg grating (FBG) wavelength detection based on an all fiber Mach-Zehnder edge filter is proposed. Each output port of the edge filter shows comb-like transmission characteristics, and its spectrum is opposite to the other port. Wavelength message of FBG sensors is transformed into power message by a pair of the filtering edges of the filter. The wavelength measurement range and resolution are tunable in fabrication by adjusting the length difference of the two interference arms of the filter. And the affection of power variation of the system can be eliminated through two types of comparing calculation. FBG temperature sensing with this wavelength detection method gives a wavelength accuracy of about ± 10 pm.

Key words optoelectronics; optical fiber grating sensors; all fiber Mach-Zehnder interferometer; edge filter

1 引 言

目前, 应用于光纤布拉格光栅 (FBG) 谐振波长移位检测的方案主要有边沿滤波器、可调滤波器和干涉型波长扫描仪等^[1~3]。传统的用于光纤布拉格光栅波长检测的边沿滤波器主要是利用一个熔锥型光纤波分复用 (WDM) 器件^[3], 需要制作超长熔锥区的耦合器件, 不但工艺难度增加, 损耗增大, 此时光纤熔锥的腰区直径非常细 (约 $11 \mu\text{m}$), 使得光纤更易折断, 并且由于其太细, 腰部的振动稳定性较差, 降低了波长稳定性; 另外, 在制作时波长范围不能任意连续调节^[4], 所以在实际应用中许多困难。

另一种用于光纤布拉格光栅波长检测的边沿滤波器方案采用一个 3 dB 耦合器加上一个光滤波器^[5]。这种方法成本往往很高, 参数也不易调整。

本文提出了一种利用全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪作为边沿滤波器的波长移位的检测方案。通过 Mach-Zehnder 干涉仪调整臂长差, 得到具有较陡峭边沿的滤波器, 这样克服了单个熔锥耦合器件所遇到的拉锥太长、容易折断、波长范围无法任意调节等缺点, 成本也很低。由于近年来全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪研制技术不断进步, 其稳定性大大提高, 已有被用于窄带波分复用器的报道^[4,6], 完全可用于实现光纤布拉格光栅波长移位较高精度的低

收稿日期: 2003-04-07; 收到修改稿日期: 2003-06-02

作者简介: 梁 明 (1975—), 男, 中国科学技术大学电子工程与信息科学系博士研究生, 主要从事光纤光栅及其在传感领域的应用研究。E-mail: mliang@ustc.edu.cn

成本功率无关检测。

2 检测原理

全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪由两个 3 dB 熔锥耦合器构成,如图 1 所示:1 端输入的光由第一个 3 dB 耦合器分配到两根光纤中,经过不同长度的光纤 L_1 和 L_2 后,在第二个 3 dB 耦合器中发生干涉,使输出到 2,3 两端的光具有相反的光谱分布。两输出臂的光功率可表达为

$$P_2(\lambda) = \frac{1}{2} \left[1 + \cos \frac{2\pi n}{\lambda} (L_1 - L_2) \right] P_1 \quad (1)$$

$$P_3(\lambda) = \frac{1}{2} \left[1 - \cos \frac{2\pi n}{\lambda} (L_1 - L_2) \right] P_1 \quad (2)$$

其中, P_1 为输入光功率,而 P_2, P_3 分别为两输出臂的输出光功率; n 为光纤的等效折射率, L_1 和 L_2 分别为两臂光纤的长度, λ 为光波长。由(1),(2)式可知, Mach-Zehnder 干涉仪具有梳状滤波特性,如图 2 所示。在输出光谱的上升或下降沿,两输出臂的功率比值随波长变化很快。利用这一特性,可以进行较高精度的波长检测。这就是边沿滤波的波长检测原理。

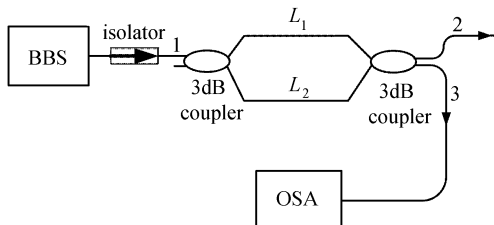


图 1 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪及其滤波特性测试装置

Fig. 1 All fiber Mach-Zehnder interferometer and its filtering characteristics testing setup

BBS: broadband source; OSA: optical spectrum analyzer

由于干涉仪梳状传输特性的峰值间距与两臂长度差的大小密切相关

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{n\Delta L} \quad (3)$$

其中, $\Delta L = L_1 - L_2$ 。当 ΔL 增大时, $\Delta\lambda$ 变小,滤波器边沿就更加陡峭,相应的测量精度提高,测量范围变小。因此,适当调整干涉仪的两臂长度差可以改变测量精度和测量范围。

由(1)式和(2)式容易发现,输出光功率与输入光功率及波长都有关系。由于输入光功率容易因光路弯曲、光源波动而发生起伏,影响测量精度,因此,

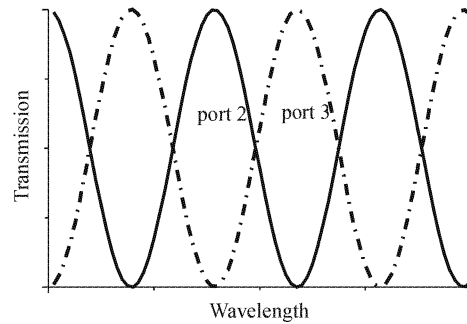


图 2 全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的理论传输特性
Fig. 2 Theoretical power transmission characteristics of all fiber Mach-Zehnder interferometer

边沿滤波的光纤布拉格光栅波长移位检测方法通常需要消除输入光功率的影响。

文献[3]中采用的比较方法是通过运算求取 $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$,由式(1),(2)可得

$$\frac{P_2 - P_3}{P_2 + P_3} = \cos \left[\frac{2\pi n}{\lambda} (L_1 - L_2) \right] \quad (4)$$

另一种常用的方法是直接将两路输出光功率进行求比运算,从而得到系统输出-波长特性^[4]

$$\frac{P_2}{P_3} = \tan^2 \left[\frac{\pi n}{\lambda} (L_1 - L_2) \right] \quad (5)$$

由式(4),(5)可以看出,经过相应处理,系统的输出只与输入光的波长、干涉仪两臂的光程差有关,而与输入光的功率已没有关系。这是由于通过求比,分子分母中 P_1 的影响已被约去。并且,在一个周期内, $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ 或 P_2/P_3 的结果与输入光的波长有一一对应的关系。这两种处理都可以实现光纤布拉格光栅波长移位的功率无关检测。

3 实验

3.1 采用 $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ 比较法进行光纤布拉格光栅波长检测和温度传感实验

实验中所用的光源为自行研制的掺铒光纤超荧光宽带光源(BBS),采用简单的单级后向输出结构。全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪采用在两根光纤上连续熔拉两个 3 dB 耦合器而成;两臂长度约为 0.1 ± 0.05 mm。整个边沿滤波器放在塑料泡沫盒中,以减小外界温度变化等因素的影响。

首先利用图 1 所示装置测试全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪边沿滤波器的滤波特性。宽带光源输出的光送入干涉仪,利用光谱分析仪(OSA)测量其两输出臂的输出光谱,如图 3 所示。滤波器的 $\Delta\lambda$

约为 23 nm,干涉仪的干涉条纹可见度超过 0.99。图 4 中同时显示了掺铒光纤放大器(EDFA)的输出光谱特性。图中明显可以看出光源的起伏对滤波器的输出功率有较大的影响。将光谱仪测得的两输出臂的光谱数据输入计算机,计算出 $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ 的波长关系曲线,如图 4 中的实线部分所示。显然,滤波器两输出臂功率经 $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ 运算后,结果只与输入光的波长有关,而与输入光的功率无关,即功率起伏对测量的影响已经消除。

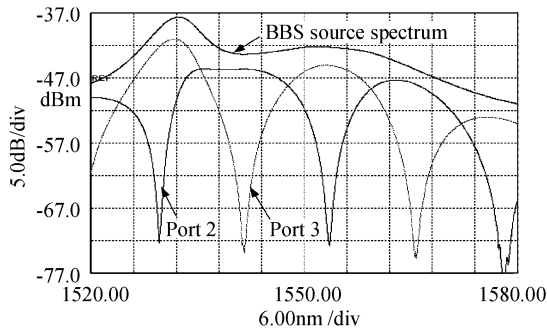


图 3 全光纤 Mach-Zehnder 边沿滤波器在宽带光源输入条件下的输出特性

Fig. 3 Spectra of edge filter output with broadband source

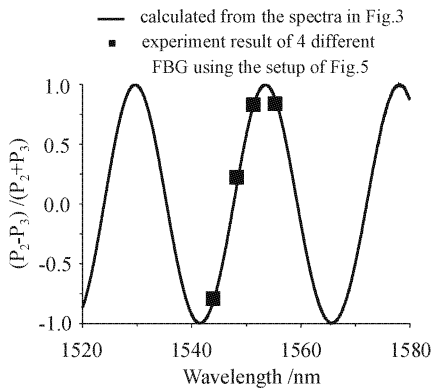


图 4 滤波器输出光谱的 $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ 处理及 4 只光栅的波长检测结果

Fig. 4 Result of $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ processing

利用全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪边沿滤波器进行光纤布拉格光栅波长检测的实验装置如图 5 所示。宽带光源输出的光经由一个 3 dB 耦合器送入被测光纤布拉格光栅,满足谐振条件的光被反射回来,并经由 3 dB 耦合器进入边沿滤波器。检测滤波器两输出臂的输出光强,并进行(4)式的运算处理,得到波长解调输出。

用该结构对 4 个波长分别为: 1543.92 nm, 1548.2 nm, 1551.3 nm 和 1555.28 nm 的光纤布拉

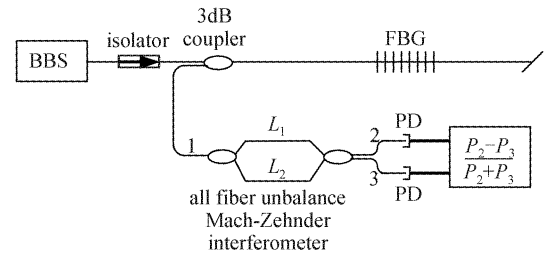


图 5 基于全光纤 Mach-Zehnder 边沿滤波器的光纤布拉格光栅波长检测实验装置

PD: 光检测器

Fig. 5 Experiment setup of FBG wavelength detection using a Mach-Zehnder edge filter

PD: photonic detector

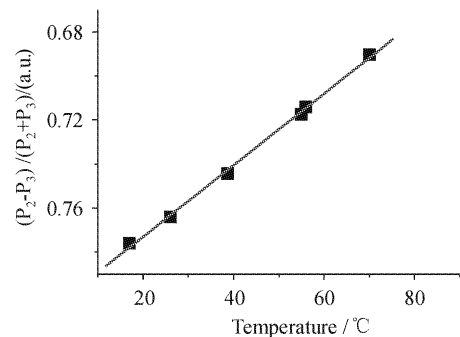


图 6 光纤布拉格光栅温度传感实验测试结果及其线性拟合

Fig. 6 Experiment result of FBG temperature sensing

$$Y = -0.80548 + 0.00162X, R = 0.999, SD = 0.0016$$

格光栅进行测试,测试结果也在图 4 中标出,与波长关系曲线吻合得很好。从图中可以看出,曲线线性度较好的有效边沿约有 8 nm。当进行光纤布拉格光栅传感时,应当选择这样的线性区间进行实验;当波长超出了这一范围而处于非线性区时,则需采用预先标定的办法。检测波长为 1555.28 nm 的光纤布拉格光栅与波长为 1551.3 nm 的光纤布拉格光栅时,系统输出结果基本一致,这表明当测量范围超出了滤波器梳状光谱周期的一半时,测量会发生模糊。系统的无模糊检测范围为 11.5 nm。

选择其中一个波长为 1543.92 nm 的光纤布拉格光栅进行温度传感实验。将被测光纤布拉格光栅浸入热水中,用温度计测量水温的变化,同时记录波长检测系统的输出结果,测量光纤布拉格光栅在 17~70℃时的系统输出,并对测量结果进行线性拟合,如图 6 所示。显然,测试结果的线性度很好,与其线性拟合有很好的一致性。测量结果的标准偏差为 0.0016,相当于 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的温度测量精度。由于光纤布

拉格光栅的温度敏感性在 1550 nm 处约为 $10 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ ^[1], 由此可计算得光纤布拉格光栅波长检测精度约为 $\pm 10 \text{ pm}$ 。

3.2 采用 P_2/P_3 比较法进行光纤布拉格光栅应变传感实验

采用 P_2/P_3 比较法处理进行光纤布拉格光栅波长移位检测的实验装置如图 7 所示。相对于图 5, 该装置的主要修改在于, 探测器输出的光功率通过对数运算和减法运算实现求比处理, 然后进行信号放大和数字输出, 所得的结果即对应了一定的波长移位。

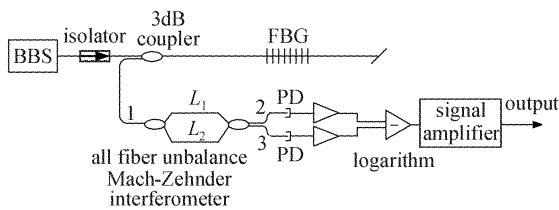


图 7 采用 P_2/P_3 处理的光纤布拉格光栅波长移位检测装置

Fig. 7 Experiment setup of FBG wavelength detection with P_2/P_3 processing

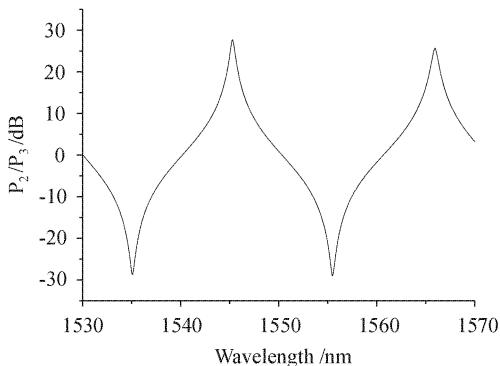


图 8 对图 3 光谱进行 P_2/P_3 处理的结果

Fig. 8 Result of P_2/P_3 processing for Fig. 3

利用计算机对图 3 干涉仪输出光谱进行 P_2/P_3 处理, 如图 8 所示。该图反映了图 7 装置的波长响应特性。可以看出, 输入光功率波动的影响已经有效消除。该系统的线性区间较小, 约为 $3\sim 4 \text{ nm}$, 而无模糊区间仍为 11.5 nm 。

选用一个中心波长为 1549.04 nm 的光纤布拉格光栅进行应变传感实验。该光纤布拉格光栅落在系统波长响应的线性度较好、两臂输出功率都较大的腰部。将该光栅均匀粘贴于应变产生系统上。测量中, 应变系统产生的应变范围为 $-230\sim 1140 \mu\epsilon$ 。

实验结果及其线性拟合显示于图 9 中。拟合函

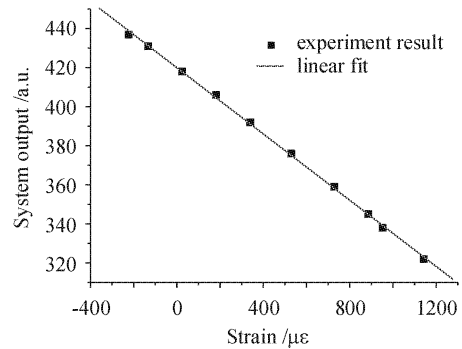


图 9 光纤布拉格光栅应变传感结果

Fig. 9 Experiment result of FBG strain sensing

$$Y = 420 - 0.0849X, R = 0.9996, SD = 0.87$$

数为 $Y = 420 - 0.0849X$, 而表示拟合度的相关系数 $R = 0.9996$; 测量的标准偏差为 0.87 , 表明检测分辨率达到 $\pm 10 \mu\epsilon$, 对应的波长移位检测精度达到 $\pm 12 \text{ pm}$ ^[1]。这一结果与前面温度传感实验的结果相当。

两个实验的结果证明, 全光纤非平衡 Mach-Zehnder 干涉仪可以作为边沿滤波器应用于光纤布拉格光栅波长移位检测。

采用 $(P_2 - P_3)/(P_2 + P_3)$ 处理方法的系统比采用 P_2/P_3 的处理方法的系统具有更宽的线性波长响应区间, 其线性测量的范围更大。但两种系统的无模糊测量范围相同, 都为 11.5 nm , 这一范围由干涉仪的两臂光程差 $n(L_1 - L_2)$ 决定。当被测光栅超出测量的线性范围而未超过无模糊范围时, 可以采取预先标定的办法实现非线性测量。

测量精度与系统波长响应的斜率有关, 也与后级的探测和处理电路的噪声水平有关。通过增大干涉仪的光程差提高系统相应的斜率, 可以在一定程度上提高测量精度, 但此时测量范围会相应降低。

采用 P_2/P_3 处理方法, 在一个测量范围的两端区域, 其波长相应的斜率较大, 但此时干涉仪两输出功率差别非常大, 有一端的功率接近 0 值, 因此, 探测电路的相对精度降低。将传感光纤布拉格光栅工作点设定于这一区域无助于测量精度的提高。

4 结 论

利用全光纤 Mach-Zehnder 干涉仪作为边沿滤波器进行光纤布拉格光栅波长检测是一种有效的波长测量方案。本实验系统可以实现 8 nm 线性范围内精度达到 10 pm 的光纤布拉格光栅波长移位的

功率无关检测。与其他边沿滤波器相比, Mach-Zehnder 干涉仪具有检测精度高, 成本低, 无模糊检测范围大, 参数调整容易的优点。通过调整光路参数和改进电路设计, 有望进一步提高波长检测精度。这字方案在光纤布拉格光栅传感领域有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 A. D. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensors [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1442~1463
- 2 Y. J. Rao. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1999, **31**:297~324
- 3 M. A. Davis, A. D. Kersey. All-fibre Bragg grating strain-sensor demodulation technique using a wavelength division coupler [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(1):75~77
- 4 Yao Shouquan, Chen Kaixuan. A 8-channel fiber Mach-Zehnder interferometric super narrow spacing wavelength-division-multiplexer [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(8):1113~1118
姚寿铨, 陈凯旋. 光纤马赫-陈德尔干涉型 8 波分超窄波分复用器的研制[J]. *光学学报*, 1998, **18**(8):1113~1118
- 5 S. M. Melle, K. Liu, R. M. Measures. A passive wavelength demodulation system for guided-wave Bragg grating sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1992, **4**(6):516~518
- 6 Chi-Hung Huang, Huali Luo, Senlu Xu *et al.*. Ultra-low loss, temperature-insensitive 16-channel 100-GHz dense wavelength division multiplexers based on cascaded all-fiber unbalanced Mach-Zehnder structure [C]. *OFC/IOOC'99, Technical Digest*, 1999, **1**:79~81



《中国激光》关键词推荐表

为了使作者在撰写论文时更准确地选择第一关键词, 本刊特推荐以下学科名称, 供作者选用:

大气与海洋光学(atmospheric and ocean optics)
 衍射与光栅(diffraction and gratings)
 光纤光学(fiber optics)
 光通信(optical communication)
 傅里叶光学与光信号处理(fourier optics and optical signal processing)
 几何光学(geometrical optics)
 导波光学(集成光学)(guided wave optics(integrated optics))
 全息(holography)
 图像处理(image processing)
 成像系统(imaging systems)
 仪器, 测量与计量(instrumentation, measurement and metrology)
 激光器(lasers)
 激光物理(laser physics)
 激光技术(laser technique)
 激光光学(laser optics)
 材料 (materials)
 医用光学与生物技术(medical optics and biotechnology)
 显微 (microscopy)
 非线性光学 (nonlinear optics)
 光数据存储(optical data storage)
 光学设计与制造(optical design and fabrication)
 光学器件(optical devices)
 光电子学 (optoelectronics)
 量子光学 (quantum optics)
 遥感 (remote sensing)
 散射 (scattering)
 光谱学 (spectroscopy)
 薄膜(thin films)
 超快光学(ultrafast optics)
 X 射线光学 (X-ray optics)