

测量光纤外腔 Fabry-Perot 干涉仪的白光干涉术*

江 毅

(北京理工大学信息学院光电工程系, 北京 100081)

摘 要 提出了一种基于白光干涉术测量低锐度光纤外腔 Fabry-Perot 干涉仪(EFPI)的方法. 用宽带光源注入 F-P 腔, 在接收端用一高锐度的可调谐光纤 F-P 滤波器对 EFPI 的反射光谱进行扫描, 获得了周期性变化的光谱输出. 为了测量出 EFPI 的腔长, 对光谱信号进行傅里叶变换, 得到光谱的周期, 由此求出 EFPI 的绝对腔长. 证明了用低锐度 EFPI 的测量准确度由腔长决定. F-P 腔越长, 测量准确度越高. 在腔长分别是 200 μm , 400 μm 和 600 μm 时, 测量的腔长与实际腔长相同.

关键词 波导与纤维光学; 光纤传感器; 光纤外腔 Fabry-Perot 干涉仪; 傅里叶变换

中图分类号 TP212.1

文献标识码

A

0 引言

光纤外腔 Fabry-Perot 干涉仪(EFPI)是将端面垂直的两根光纤从两端插入石英毛细管中, 在毛细管中利用光纤的端面形成 Fabry-Perot 腔(F-P 腔)制成干涉仪. 光纤端面可以镀高反射膜^[1,2], 这样输出可以形成锐度很大的干涉条纹, 从而提高测量分辨率^[3]. 但在光纤端面镀膜并非一件易事, 会大大增加传感器的成本. 另一个简单的技术是利用光纤端面约 4% 的 Fresnel 反射, 光纤 2 个端面的反射光干涉形成双光束干涉^[4,5]. 这一技术避免了在光纤端面镀膜, 制作简单、成本低廉.

EFPI 可以测量动态量(如振动、声), 也可以测量静态量(如应变、温度). 测量动态量一般是注入激光(相干长度应大于 2 倍 F-P 腔长), 用 2×2 耦合器从 EFPI 的反射光中取出干涉信息. 但实际上不能这样直接测量动态量, 因为 F-P 腔长决定了干涉仪的静态干涉点. 若两干涉光束相差 90°, 干涉仪处于正交状态, 能够把外界的微小振动引起的干涉仪相位变化变成光强变化. 但若振动信号超出线性区间, 就不能得到线性输出. 而若两干涉光束相差 180°, 干涉仪始终不能获得线性输出. 由于 EFPI 受环境的影响, 不可能有一个稳定的工作点, 因此 EFPI 输出信号随外界环境的变化有很大的不同. 为了解决这个问题, 目前主要提出了双 F-P 腔法, 双波长测量法^[6], 目的是获得 2 路正交的输出信号, 从而可以获得稳定的输出.

EFPI 测量静态量使用了白光干涉的原理, 用宽

带光源注入, 用光谱仪测量 EFPI 的谱线, 从而绝对测量出 F-P 腔的长度. 本文使用光纤可调谐 Fabry-Perot 滤波器(FFP-TF)作为波长扫描器件, 实现了对低锐度的 EFPI 腔长的绝对测量, 与文献[7]得到了相同的测量结果. 与文献[7]不同在于, 本方法避免了使用光谱仪, 因此该技术可以仪器化. 对光谱的波长进行傅里叶变换(FFT), 得到以 Hz 为单位的光谱频谱, 并以之来计算腔长. 另外也没有使用高反射膜, 降低了传感器成本.

1 测量原理

扫描 EFPI 白光干涉测量原理如图 1. 宽带 ASE 光源通过 2×2 耦合器注入 EFPI, 反射光进入 FFP-TF. 这里的白光干涉测量系统由宽带光源, 参考干涉仪 FFP-TF 和传感干涉仪 EFPI 串联而成, 参考干涉仪工作在扫描状态. 当传感干涉仪的光程差是参考干涉仪光程差的整数倍时, 输出光强有最大值. FFP-TF 也可以理解为一光谱仪, 对 EFPI 反射光的光谱进行扫描. 输出经光电转换、放大、数据采集后进入计算机. FFP-TF 上加有一锯齿波扫描电压, 驱动 FFP-TF 对透射光的波长进行扫描.

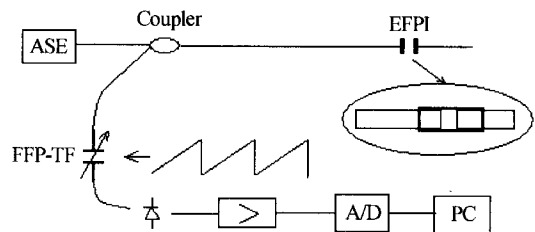


图 1 扫描 EFPI 白光干涉测量原理
Fig. 1 The principle of scanning white light interferometry
FFP 的驱动电压已经过校正, 可以由此直接获得 FFP-TF 的透射光波长. 设 EFPI 的腔长为 d , 两干涉光束由于 F-P 腔产生的相位延时为

*国家自然科学基金(60277015), 国家高技术研究发展计划(2004AA616020)和教育部回国人员留学基金(2004527)资助项目
Tel: 010-68913586 Email: bitjy@bit.edu.cn
收稿日期: 2005-07-22

$$\varphi = kL = \frac{2\pi}{\lambda} \times 2d = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (1)$$

因此,由于光源波长变化引起 EFPI 产生的相位差变化为

$$\Delta\varphi = -\frac{4\pi d}{\lambda^2} \times \Delta\lambda \quad (2)$$

$\Delta\varphi$ 每变化 2π , 对应一个干涉条纹. 干涉条纹相邻的峰峰(或谷谷)的波长间隔就是一个 2π 周期. 由此,可以求出 F-P 腔的腔长.

$$|d| = \frac{\lambda^2}{2\Delta\lambda_{MM}} \quad (3)$$

式中 $\Delta\lambda_{MM}$ 表示干涉条纹相邻峰峰值间的波长间隔. 通过 FFP-TF 测量出 $\Delta\lambda_{MM}$, 就可以求出腔长 d .

2 实验

图 2 是 EFPI 在不同腔长时扫描 FFP-TF 测量得到的输出.

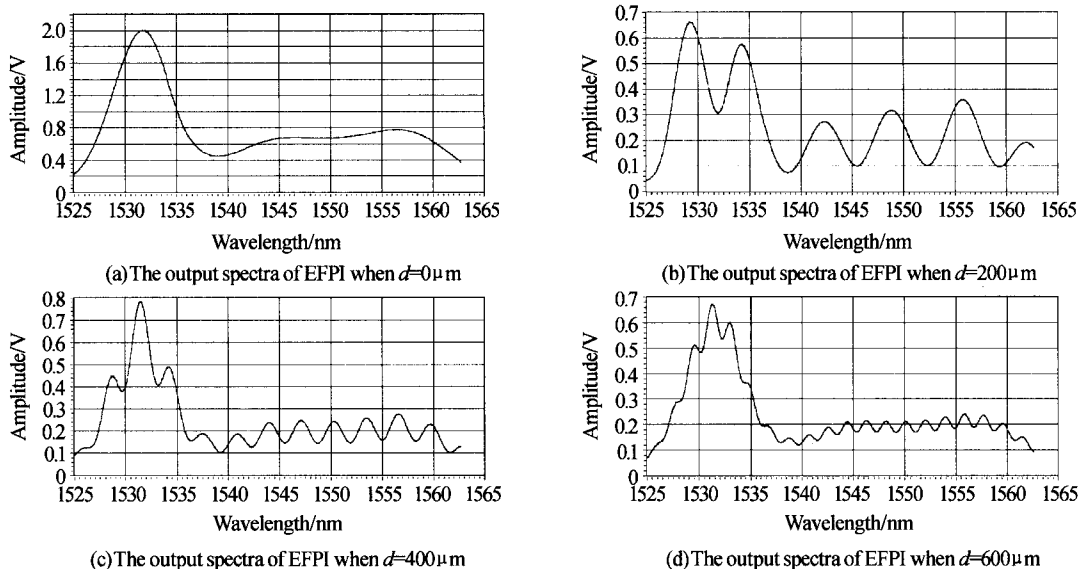


图 2 扫描 FFP-TF 得到的 EFPI 输出光谱图

Fig. 2 The output spectra of EFPI when scanning FFP-TF

图 2(a)是在形成 F-P 腔的两光纤端面接触、F-P 腔长为 0 时测量得到的输出. 由于没有形成双光束干涉,所以看不到干涉条纹,只有光纤端面交接处的端面反射,其强度轮廓曲线与 ASE 光谱相同. 在调节准确度为 $5 \mu\text{m}$ 的精密微调架上调节 F-P 腔长,将 F-P 腔拉开 $200 \mu\text{m}$,得到 FFP-TF 的扫描输出如图 2(b),估测图 2(b)中相邻峰峰的波长间隔为 6 nm ,由式(3)可以计算出此时腔长为 $200.2 \mu\text{m}$,与实际腔长吻合. 同样,继续拉伸 F-P 腔,在 F-P 腔长为 $400 \mu\text{m}$ 和 $600 \mu\text{m}$ 时,扫描 FFP-TF 测量得到的输出曲线分别如图 2(c)和(d). 估测相邻峰峰值的波长间隔分别为 3 nm 和 2 nm ,用式(3)计算测量的腔长分别为 $400 \mu\text{m}$ 和 $600 \mu\text{m}$,与实际腔长吻合.

随着腔长的增加,可以看到白光干涉的输出条纹对比度明显降低,这是由于腔长增加后,第二个光纤端面离出射端面的距离增加. 由于光纤出射光呈发散状,使得反射回光纤的光功率降低,因此,使干涉条纹的对比度降低.

从图 2 中看到,腔长增加会造成白光干涉条纹对比度降低,这是由于腔长增加后,第二个端面反射回光纤的光强远小于第一个端面反射的光强. 在

F-P 腔较长时,一个增加条纹对比度的方法是提高第二个端面的反射率^[8],如在第二个光纤反射端面镀上有一定反射率的反射膜,如约 10% 的反射膜,可以在腔长增大后,保持高对比度条纹输出.

3 傅里叶变换干涉测量法

实验中,测量条纹间的间隔是直接从图中估测出的. 由于 EFPI 传感器的反射率低,F-P 腔输出实际是双光束干涉的正弦信号,条纹的峰值位置平坦,在测量条纹间隔 $\Delta\lambda_{MM}$ 时,不能准确地定位峰值处的位置. 另外,在自动测量时,由于光源功率不平稳,机器很难自动判断峰峰值之间的波长间隔. 但从图 2 可见,干涉条纹输出的光谱图成正弦分布,因此,可以用傅里叶变换的方法获得正弦信号的信号频率(周期),从而获得干涉条纹的准确间隔. 文献[9]中对这一技术进行了理论分析,本文利用傅里叶变换法结合白光干涉技术对 F-P 腔长进行了实验测试.

分别对图 2 中的(b)、(c)、(d)三个波形进行傅里叶变换. 由于用 FFP-TF 对 EFPI 进行扫描时,FFP-TF 上加的是锯齿波电压,因此,采集到的信号数据是随时间变化的一维数组. 对图 2 进行 FFT 变

换后的频谱分别如图 3. 图 3 中的低频信号是由于 ASE 光源强度不均匀造成的, 特别是在信号低频时 (图 3 (a) 中), 背景光的频率更靠近信号光. 由软件自动判断出正弦信号的中心频率分别是 10 Hz、19 Hz 和 31 Hz. 由于采样频率 $f_s = 50$ kHz, 因此每个周期 (即每个干涉条纹) 内的采样点数目分别为 5000、2631 和 1612 (即 $50000/31$). FFP-TF 经校准

后每个采样点对应 1.2 μm 波长, 即校正因子 $R = 1.2 \mu\text{m}$. 因此每个周期的波长间隔 $\Delta\lambda_{\text{MM}}$ 分别是 6.0 nm、3.157 nm 和 1.934 nm (即 $1612 \times 1.2 \mu\text{m}$), 与直接从频谱中测量的波长间隔吻合. 因此由式 (3) 知, 图 2 中光谱所对应的 F-P 腔实际长度分别是: 200 μm 、380 μm 和 621 μm .

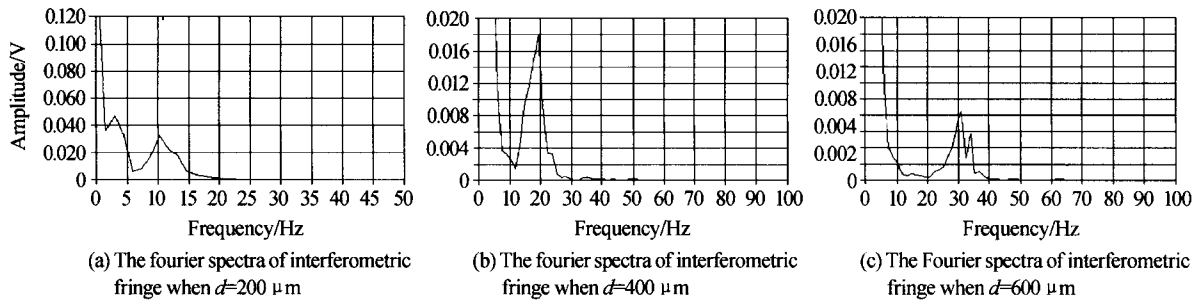


图 3 白光干涉输出的 FFT 变换后的频谱图

Fig. 3 The Fourier spectra of white light interferometer

图 3 中的频谱较宽, 不便于分辨, 因此实验中取峰值位置. 这是由于在光源有限的宽度 (约 40 nm) 范围内, 正弦信号的数目较少, 采用较长的 F-P 腔, 可以增加条纹数目, 使图 3 中的谱线变窄, 同时频谱向高频方向移动. 如果不增加第二个反射端面的反射率, 又会降低条纹对比度. 另外一个方法是使用 C+L 波段的宽带光源, 数据量更大, 条纹数目增多, 同样也使频谱变窄.

设白光干涉光谱的正弦信号的频率为 f_s , 信号采样频率 f_s , 则相邻条纹的波长间隔

$$\Delta\lambda_{\text{MM}} = R \frac{f_s}{f} \quad (4)$$

这里 R 是波长校正因子, 即每个采样点对应的波长间隔. 因此腔长

$$|d| = \frac{\lambda^2}{2Rf_s} f \quad (5)$$

对于一定的采样频率 f_s 、工作波长 λ 和每一个采样点对应的波长系数 R , EFPI 的腔长与 EFPI 白光干涉信号的频率成线性关系.

由式 (5) 有

$$\Delta d = \frac{\lambda^2}{2Rf_s} \times \Delta f \quad (6)$$

可见, 频率的测量分辨率决定了 F-P 腔长的测量分辨率. 假设由于测量上的原因, 造成 f 的测量误差是 Δf , 对应的腔长 d 误差是 Δd , 则测量准确度为 $\Delta d/d$. 若 f 的测量准确度一定, 则腔长越大, 腔长的测量准确度就越高. 假使 f 的测量准确度为 1 Hz, 从式 6 中可以看到, 在 1550 nm 波长上, 1 Hz 对应的腔长变化 $\Delta d \approx 20 \mu\text{m}$, 因此, 若腔长为 200 μm 、400 μm 和 600 μm 时, 测量准确度分别为 10%、5%

和 3.3%. 因此为了提高测量准确度, EFPI 的腔应尽可能长.

4 结论

本文提出了一种基于白光干涉术测量低锐度光纤外腔 Fabry-Perot 干涉仪的方法. 用宽带光源注入 F-P 腔, 在接收端用一高锐度的可调谐光纤 F-P 滤波器对 EFPI 的反射光谱进行扫描, 获得了周期性变化的光谱输出. 对光谱信号进行傅里叶变换, 得到光谱的周期, 由此求出 EFPI 的绝对腔长. 证明了用低锐度 EFPI 的测量准确度由腔长决定. F-P 腔越长, 测量准确度越高. 在 F-P 腔长分别为 200 μm 、400 μm 和 600 μm 时进行了实验, 测量结果与实际腔长吻合.

参考文献

- 1 Bhatia V, Sen M B, Murphy K A, *et al.* Wavelength-tracked light interferometry for highly sensitive strain and temperature measurements. *Electronics Letters*, 1996, **32**(3): 247~249
- 2 吕涛, 刘德森, 刘志麟, 等. 基于敏感 Fabry-Perot 腔光纤角位移传感器的原理与设计. *光子学报*, 2005, **34**(7): 1049~1052
- 3 Lv T, Liu D S, Liu Z L, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(7): 1049~1052
- 3 康崇, 王政平, 黄宗军, 等. 光纤 Fabry-Perot 谐振腔的精细度对相位灵敏度的影响. *光子学报*, 2005, **34**(3): 428~430
- 4 Kang C, Wang Z P, Huang Z J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3): 428~430
- 4 Murphy K A, Gunther M F, Vengsarkar A M, *et al.* Quadrature phase shifted, extrinsic Fabry-Perot optical

- fiber sensors. *Optics Letters*, 1991, **16**(4):273~275
- 5 江毅, 刘莉. 光纤 F-P 腔振动传感器. *光子学报*, 2003, **32**(9):1059~1062
Jiang Y, Liu L. *Acta Photonica Sinica*, 2003, **32**(9):1059~1062
- 6 Bhatia V, Murphy K A, Claus R O, *et al.* Recent developments in optical-fiber-based extrinsic Fabry-Perot interferometric strain sensing technology. *Smart Mater Struct*, 1995, **4**(2):246~251
- 7 江建, 饶云江, 周昌学, 等. 基于光放大的光纤 Fizeau 应变传感器频分复用系统. *物理学报*, 2004, **53**(7):2221~2225
- Jiang J, Rao Y J, Zhou C X, *et al.* *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(7):2221~2225
- 8 朱永, 张洁, 陈伟民, 等. 提高光纤 F-P 应变传感器输出信号质量的方法研究. *光子学报*, 2004, **33**(5):544~548
Zhu Y, Zhang J, Chen W M, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(5):544~548
- 9 陈伟民, 朱永, 唐晓初, 等. 光纤法布里-泊罗传感器串联复用的傅里叶变换解调方法初探. *光学学报*, 2004, **24**(11):1481~1486
Chen W M, Zhu Y, Tang X C, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(11):1481~1486

White Light Interferometry for the Measurement of Extrinsic Fabry-Perot Interferometer

Jiang Yi

*Department of Optical Engineering, School of Information Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081*

Received date: 2005-07-22

Abstract The white light interferometry for the measurement of low-finesse extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) is reported. A broadband light is injected into EFPI, and the reflected light is scanned by another high-finesse tunable Fabry-Perot filter, the periodic spectra of EFPI can be obtained. To measure the cavity length, the spectra are fast Fourier transformed, the absolute length of cavity can be calculated by using the periodic spectra. The measuring accuracy is limited by the length of cavity. The longer cavity has higher measuring accuracy. When the length of cavity are 200 μm , 400 μm , and 600 μm respectively, the measured results are agree with the actual length of the cavity.

Keywords Guiding wave and fiber optics; Optical fiber sensor; Fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer; FFT



Jiang Yi received MS degree in 1993 and Ph. D. in 1996 from Chongqing University. Now He is an associate professor in Beijing Institute of Technology. He has published 40 research papers. His research interests include fiber optical sensors and smart structure.