

光纤 Fabry-Perot 谐振腔的精细度对相位灵敏度的影响*

康崇¹ 王政平¹ 黄宗军¹ 吴强¹ 韩占国²

(1 哈尔滨工程大学理学院, 哈尔滨 150001)

(2 石家庄宝石集团电视机厂, 石家庄 050035)

摘要 分析了光纤 Fabry-Perot 谐振腔的工作原理及其工作点的选择问题, 推导了谐振腔的相位灵敏度与精细度的关系, 给出了理论公式及曲线, 并与光纤 Math-Zehnder 干涉进行了对比, 指出了在相位灵敏度上两者的巨大差距, 证明了光纤 Fabry-Perot 干涉的独特优点. 介绍了光纤 Fabry-Perot 干涉的实验系统, 提出了检测及计算 Fabry-Perot 谐振腔有效精细度的方法, 实验结果与理论仿真基本吻合.

关键词 光学干涉; 光纤传感器; 精细度; 灵敏度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

干涉式光纤传感器因其具有超高的灵敏度和微小信号的传感能力而倍受青睐, 在许多领域可以轻易地突破传统传感器的工作极限, 因而有其广阔的研究和应用前景. Fabry-Perot 干涉^[1-6]是典型的多光束干涉, 其干涉花样是细而锐利的环纹, 可用于高精度的光谱分析中. 其分辨本领^[7]可用精细度来描述, 精细度的大小将直接影响到用其构成的传感器的灵敏度, 本文对此进行了分析, 提出了传感器工作点的选择依据, 给出了工作点相位灵敏度与精细度的相互关系, 为选择不同精细度的 Fabry-Perot 谐振腔构成光纤传感器提供了参考.

1 理论分析

1.1 光纤 Fabry-Perot 谐振腔的工作理论

光纤 Fabry-Perot 谐振腔是在一根单模光纤两端加以具有高反射特性的端面, 使光线在其内往返传播而产生的多光束干涉装置.

如图 1, 激光器发射一束单色光通过光纤 Fabry-Perot 谐振腔, 腔端的两个反射镜面 M1、M2 必须垂直于光轴, M1、M2 的透射系数及反射系数各为 t_1 、 t_2 和 r_1 、 r_2 . 令人射光的振幅为 A_i , 经 M2 镜 p 次透射后所有透射光叠加而成的光振幅为 $A_i(p)$, 再令透

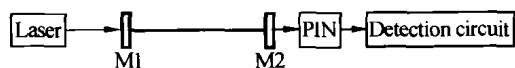


图 1 光纤 Fabry-Perot 谐振腔原理框图

Fig. 1 The theoretical chart of fiber Fabry-Perot resonant cavity

射光功率系数为 T , 则 $T = \left| \frac{A_i(p)}{A_i} \right|^2$. 而第一次透射后的

振幅 $A_i(1) = t_1 t_2 \sqrt{a} A_i$, \sqrt{a} 为传播损耗因子. 显然

$$A_i(p) = t_1 t_2 a^{1/2} [1 + Ra e^{i\delta} + \dots + R^{(p-1)} a^{(p-1)} e^{i(p-1)\delta}] A_i \quad (1)$$

式中 $R = r_1 r_2$ (两个反射系数之积), $\delta = 4\pi \lambda^{-1} n' l$, n' 为光纤的折射率, l 为光纤长度, 于是透光系数

$$T = \frac{t_1^2 t_2^2 a}{(1 - Ra)^2 \left[1 + \frac{4aR \sin^2(\delta/2)}{(1 - Ra)^2} \right]} \quad (2)$$

定义 $F = \frac{4aR}{(1 - aR)^2}$ 为光纤 Fabry-Perot 腔的精细度^[7]. 令 $T_{\max} = \frac{t_1^2 t_2^2 a}{(1 - Ra)^2}$ 为最大透射系数, 当损耗

较小时, $\sqrt{a} \approx 1$, 由斯托克斯定律^[8], $t_1 t_2 + R = 1$, 得

$$T_{\max} = 1, \text{ 令 } \Phi = \frac{\delta}{2}, \text{ 则}$$

$$T(\Phi) = (1 + F \sin^2 \Phi)^{-1} \quad (3)$$

1.2 工作点的选择

我们关心 Φ 为何值时, $\frac{dT}{d\Phi}$ 达到最大, 因为在此点, 传感器的相位灵敏度最大, 这就是工作点的位置, 由 $\left[\frac{dT}{d\Phi^2} \right]_{\Phi=\Phi_0} = 0$ 给出, 即

$$\left[\frac{2F \cos 2\Phi \times (1 + F \sin^2 \Phi) - 2F^2 \sin^2 2\Phi}{(1 + F \sin^2 \Phi)^3} \right] = 0$$

由此得到工作点的位置

$$\Phi_0 = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \sqrt{9 + \frac{4}{F} + \frac{4}{F^2} - \frac{1}{F} - \frac{1}{2}} \right\}, \text{ 当 } F$$

很大时, 略去 F^{-2} 项, 得

$$\cos 2\Phi_0 \approx 1 - 2/3F \quad (4)$$

1.3 工作点相位灵敏度与谐振腔精细度的关系

设在工作点 Φ_0 处相位灵敏度为 G , 则:

$$G = \left. \frac{dT}{d\Phi} \right|_{\max} = \frac{\cos^2 2\Phi_0}{F \sin^3 2\Phi_0}$$
, 将式(4)代入, 并略去

F^{-2} 项, 得

$$G \approx 0.65 \sqrt{F} \tag{5}$$

图2是 G 与 F 的曲线, 可见, 随着 F 的增加, G 也单调地增加. 因而在传感器的设计中, 通过增大 Fabry-Perot 腔的 F 值就可以增加系统的灵敏度. 但 F 也并非越大越好, 因为 F 无限增加, 意味着 $R \rightarrow 1$, 这会减小谐振腔的透射光强, 降低光源的利用率, 同时给后续检测带来困难. 实验指出, $F \leq 1520$, 对光电检测系统保持高效性是适宜的.

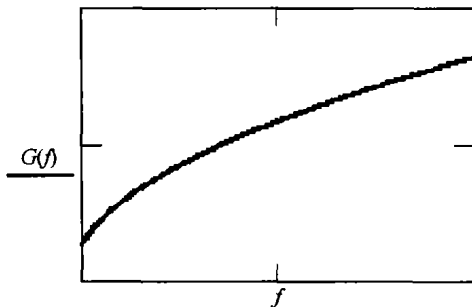


图2 G 与 F 的曲线图
Fig.2 G & F 's chart

1.4 Fabry-Perot 与 Math-Zehnder 干涉相位灵敏度的比较

对于 Math-Zehnder 型光纤干涉仪^[9], 其透光系数 $T_{M-Z} = (1 + \cos \Phi) / 2$, 所以 $\frac{d^2 T_{M-Z}}{d\Phi^2} = 0$ 对应的工作点 $\Phi_{o(M-Z)} = \pi/2$, 因此灵敏度

$$G_{M-Z} = \left. \frac{dT_{M-Z}}{d\Phi} \right|_{\max} = \frac{1}{2}$$
, 将 Fabry-Perot 与 Math-

Zehnder 干涉在各自工作点处的相位灵敏度相比较, 可得

$$G/G_{M-Z} \approx 1.3 \sqrt{F} \tag{6}$$

可见, 光纤 Fabry-Perot 腔的相位灵敏度是 Math-Zehnder 型的 $1.3 \sqrt{F}$ 倍. 当 $R = 0.9$ 时, $F = 360$, $G/G_{M-Z} \approx 25$, 即相位灵敏度相差 25 倍.

2 仿真与实验结果

2.1 实验装置介绍

图3是实验装置的方框图, 单纵模稳频激光器的出射光经光隔离器耦合至 Fabry-Perot 腔, 在腔内进行多光束干涉, 待测信号通过改变干涉相位调制出射光强, 经 PIN、检测电路送至示波器, 同时将分频后的噪声信号送至反馈信号源, 经反相、积分放大等处理, 将产生的调制信号推动 PZT, 使绕在 PZT 上的部分光纤产生伸缩, 抵消噪声的干扰, 稳定

Fabry-Perot 腔的工作点.

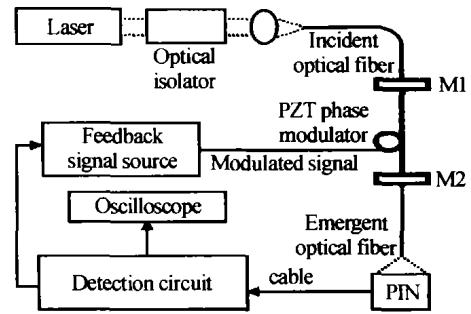


图3 实验装置图
Fig.3 Experimental instrument scheme

2.2 MachCAD 仿真结果

图4是式(3)对应的 MathCAD 曲线, 其中 $F = 360$. 可见 F 很大时, Fabry-Perot 谐振腔的透射率曲线非常陡峭, 这表示其相位灵敏度很高.

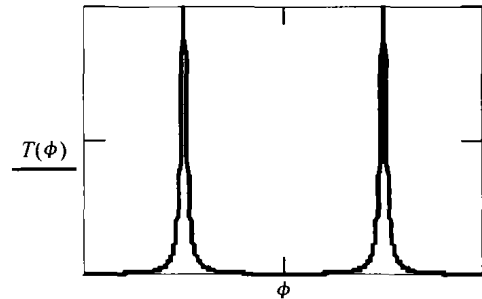


图4 T 与 Φ 的曲线图
Fig.4 T & Φ 's chart

图5是 Math-Zehnder 谐振腔的透射率曲线, 曲线最大斜率值为 0.5, 相位灵敏度较低.

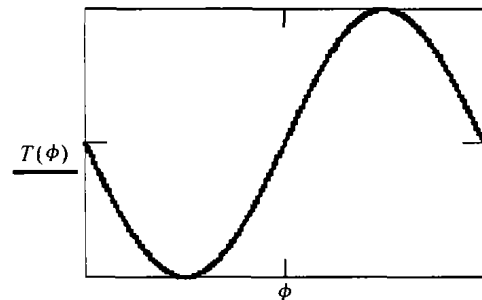


图5 T_{M-Z} 与 Φ 的曲线图
Fig.5 T_{M-Z} & Φ 's chart

2.3 实验与仿真结果对比

图6是透射率曲线的实验照片, 实验中(参考装置图3), 用交流功率信号源替代反馈信号源, 发出有一定幅值的单频交流信号调制 PZT, 使 Fabry-Perot 腔产生谐振, 这样, 在示波器上就拍摄到图6



图6 透射率曲线的示波器照片
Fig.6 Oscillogram of F-P resonance

所示的曲线,该腔由单模光纤端面真空蒸镀单层铝膜制成,腔长 $l=1\text{ m}$, $R=0.9$,示波器的 CH1 通道的电压单位:5 mV,扫描周期单位:0.2 ms. 可以看出,实验照片图 6 与 MathCAD 绘制的图 4 基本吻合.

在实验测量和实验研究中,可能先拍摄到透射率曲线照片,如图 6,而后计算其 F 值,这需要借助有效精细度的概念,定义有效精细度(也称为 Fabry-Perot 腔的锐度^[7])为 f_e ,它是相邻条纹的间隔 2π 与半宽度 ε 之比,即 $f_e = 2\pi/\varepsilon = \pi \sqrt{aR}/(1-aR)$,精细度 F 与锐度 f_e 的关系为: $F = (2f_e/\pi)^2$,为便于测量条纹间隔与半宽度,可用 AutoCAD 软件把透射率曲线照片展宽,利用峰值点、半峰值点在 AutoCAD 中坐标位置,方便地计算出 f_e ,再计算 F 、 G 值.

3 结 论

光纤 Fabry-Perot 谐振腔的工作方式属于典型的多光束干涉,相对于其它光学干涉类型, Fabry-Perot 系统具有更高的灵敏度和探测能力. 文中研究了光纤 Fabry-Perot 干涉系统工作点的位置、工作点相位灵敏度的计算方法、光纤 Fabry-Perot 谐振腔精细度与相位灵敏度的关系,提出了用 AutoCAD 软件测量有效精细度的方法,为干涉式光纤传感方案的选择及设计提供了参考.

参考文献

- 1 阮驰,高应俊,刘志麟,等. 光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot) 液位传感器. 光子学报, 2003, 32(10): 1170 ~ 1174
Ruan C, Gao Y J, Lin Z L et al. *Acta Photonica Sinica*,

- 2003, 32(10): 1170 ~ 1174
- 2 姜毅,刘莉. 光纤 Fabry-Perot 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
- 3 Hsu K, Miller C M. Fiber Fabry-Perot interferometers with very low polarization Sensitivity. *Applied Optics*, 1986, 33(28): 6617 ~ 6619
- 4 战元令,路明哲. 多模光纤 Fabry-Perot 干涉仪的分析. 光学学报, 1989, 9(9): 803 ~ 809
Zhan Y L, Lu M Z. *Acta Optica Sinica*, 1989, 9(9): 803 ~ 809
- 5 饶云江,曾祥楷,朱永,等. 非本征型法布里-珀罗干涉仪光纤布拉格光栅应变温度传感器及其应用. 光学学报, 2002, 22(1): 85 ~ 87
Rao Y J, Zeng X K, Zhu Y, et al. *Acta Optica Sinica*, 2002, 22(1): 85 ~ 87
- 6 方家美,梁志毅,王体辉. 基于图像亮度分布的环形干涉条纹判读法. 光子学报, 2003, 32(9): 1130 ~ 1132
Fang J M, Liang Z Y, Wang T H. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(9): 1130 ~ 1132
- 7 易明. 光学. 北京: 高等教育出版社, 1999. 87 ~ 93
Yi M. *Optics*. Beijing: Higher Education Press, 1999. 87 ~ 93
- 8 母国光, 战元令. 北京: 光学. 人民教育出版社, 1978. 216 ~ 217
Mu G G, Zhan Y L. *Optics*. Beijing: People's Education Press, 1978. 216 ~ 217
- 9 张少先,曾雪飞,刘永智,等. 调谐腔马赫-曾德尔干涉集成光波导陀螺. 光学学报, 2003, 23(1): 117 ~ 120
Zhang S X, Zeng X F, Lin Y Z, et al. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(1): 117 ~ 120

Influence of the Fineness of Optical Fiber Fabry-Perot Resonant Cavity on the Phase Sensitivity

Kang Chong¹, Wang Zhengping¹, Huang Zongjun¹, Wu Qiang¹, Han Zhanguo²

1 College of science, Harbin Engineering University, Harbin 150001

2 Shijiazhuang Baoshi Group TV Factory, Shijiazhuang 050035

Received date: 2004-02-09

Abstract The operational principle for resonant cavity of fiber optic Farby-Perot is analyzed, in addition to the selection for its operating point. The relationship of optical phase sensitivity of resonant cavity and its fineness was deduced. The theoretical formula and curve are presented. The above system is compared with the interference system of fiber optic Math-Zehnder, the great difference of the two interference system is pointed out as phase sensitivity considered. The unique advantages of fiber optic Fabry-Perot interference system are demonstrated. The transmittance curve of fiber optic Fabry-Perot interference and fiber optic Math-Zehnder interference were calculated and plotted with Mathcad software. The experimental system of fiber optic Fabry-Perot interference as well as the transmittance curve pictures taken in experiment is introduced. A method was given, with which the effective fineness calculation can be achieved. The experimental pictures was well in accordance with theoretical cures.

Keywords Optical interference; Fiber optic sensor; Fineness; Sensitivity



Kang Chong The vice-director and associated professor in Photoelectricity Department of Harbin Engineering University, born in 1970. In 1992, He graduated from Applied Physics Department of Peking Science and Engineering University. He is Studying for doctoral degree of materials science in Harbin Engineering University at present, and working on the special optical materials and fiber optic sensor mainly.