

文章编号: 0253-2239(2004)03-337-4

# 光源谱宽对法布里-珀罗干涉式光纤传感器 工作灵敏度的影响

康 崇<sup>1</sup> 刘芙蓉<sup>2</sup> 黄宗军<sup>1</sup> 于 鑫<sup>1</sup> 王政平<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 哈尔滨工程大学物理系, 哈尔滨 150001  
<sup>2</sup> 中国电子科技集团公司中国电波传播研究所, 新乡 453700)

**摘要:** 对干涉式光纤传感器来说,光源的谱宽直接影响着传感器的工作特性。从法布里-珀罗干涉式光纤传感器出发,推导其灵敏度的理论表达式,并用 MathCAD 软件进行了数学分析,讨论了光源谱宽对传感器灵敏度的影响。介绍了具有温度反馈功能的法布里-珀罗光纤干涉实验系统,给出了用该实验系统拍摄的谐振曲线照片。从该系统进行的两个重要的实验(不同干涉腔长的灵敏度对比实验和不同干涉长度的光源实验)表明,法布里-珀罗干涉式光纤传感器的灵敏度与光源谱宽的理论表达式是正确的,理论公式与实验结论能很好地吻合。最后指出了该方法可以用于分析其他类型的干涉式光纤传感器的灵敏度问题,为光源的选择提供了参考。

**关键词:** 光学干涉; 传感器; 光纤; 灵敏度; 光谱宽度

中图分类号: TN253 文献标识码: A

## The Influence of Spectrum Width of Optical Source on the Sensitivity of Fabry-Perot Optical Fiber Sensor

Kang Chong<sup>1</sup> Liu Furong<sup>2</sup> Huang Zongjun<sup>1</sup> Yu Xin<sup>1</sup> Wang Zhengping<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Harbin Engineering University, Harbin 150001  
<sup>2</sup> China Research Institute of Radio-Wave Propagation, Chinese Electronics Group Company, Xinxiang 453700)

(Received 28 December 2002; revised 13 May 2003)

**Abstract:** As for an interference optic fiber sensor, the characteristics of its performance are directly influenced by the spectrum width of light source. Based on the research of Fabry-Perot interference optic fiber sensor, its sensitivity is theoretically formulated. Futhermore, with the application of the mathematical analysis of the result by software MathCAD, the problem of how sensor sensitivity being influenced by the spectrum width of light souce is discussed. An experimental system of optic fiber interference with feedback function is introduced and is applied to the display of a resonance curve. Two important experiments with the application of the above system (one is a comparison experiment on the sensitivity of interference cavities of different lengths; the other is a light source experiment on different interference lengths) present; the theoretical formula on the sensitivity of Fabry-Perot interference optic fiber sensor and the spectrum width of light source is valid, which is quite in agreement with the results of the experiments. Therefore, this method can be applied to the study of the sensitivity of other of interference optic fiber sensor, and to the choice of light source.

**Key words:** optic interference; sensor; optic fiber; sensitivity; spectrum width

### 1 引 言

干涉式光纤传感器由于灵敏度高、抗电磁干扰、

体积小、保密性强等优点而具有广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。干涉式光纤水听器<sup>[1,2]</sup>和光纤陀螺<sup>[3]</sup>是目前具有代表性的两大应用方向。干涉式光纤传感器的核心器件是光纤谐振腔,而光源的谱宽决定了光纤谐振腔的干涉性能,因此,光源谱宽就成为设计干涉式光纤

E-mail: kangchong@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2002-12-28; 收到修改稿日期: 2003-05-12

传感器需要考虑的首要问题。

## 2 光纤法布里-珀罗谐振腔的工作原理

传统的光学法布里-珀罗谐振腔<sup>[4,5]</sup>是利用多光束的干涉得到锐利的干涉环纹。它通常是由一对相对放置的高反射镜面所组成,要求这两个镜面严格平行,如果稍有偏离就会引起输入能量的损耗,而且随着光腔长度的增加,损耗将急剧增大,使得长腔的法布里-珀罗干涉难于实现。用光纤制成的法布里-珀罗谐振腔将光线限制在光纤内传播,构成了闭腔,克服了这种缺点,同时又抛弃了严格平行的高反射镜面的苛刻限制,因而有其独特的优越性。

图 1 所示为光纤法布里-珀罗环形谐振腔的光路示意图。它是由一个  $2 \times 2$  光纤耦合器<sup>[6]</sup>和一段光纤环路构成。激光器的输出光  $E_1$  从 1 端入射,通过耦合器分为  $E_3$ 、 $E_4$  两束光, $E_3$  沿环形光纤行进到 2 端,通过耦合器后,一部分从 4 端输出,另一部分耦合进入 3 端并沿光纤环路再次返回到 2 端,如此形成循环。多次循环的结果,便在环形光纤内形成了多光束法布里-珀罗干涉。

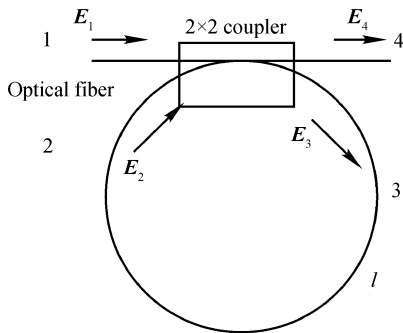


Fig. 1 The optical pathway of Fabry-Perot ring resonant-cavity

如将耦合器的损耗用  $\alpha_c$  表示,单位长度上的光纤损耗用  $\alpha_f$  表示,耦合系数用  $K$  表示,又设环形腔长为  $l$ ,则光在光纤环中传输一周的时间  $\tau = l/c$ ,式中是光线在光纤中的传播速度。设入射光频率  $\nu_0$ ,再设入射光的电矢量为  $E_1(t)$ ,则

$$E_1(t) = E_0 \exp\{-i[2\pi\nu_0 t + \varphi(t)]\}, \quad (1)$$

于是有

$$E_2(t) = \exp(-\alpha_f l/2) E_3(t + \tau), \quad (2)$$

$$E_3(t) = \exp(-\alpha_c/2) \times [(1 - K^2)^{1/2} E_1(t) + iK E_2(t)], \quad (3)$$

$$E_4(t) = \exp(-\alpha_c/2) \times [iK E_1(t) + (1 - K^2)^{1/2} E_2(t)], \quad (4)$$

由于光纤环路长度  $l$  不长,故光纤损耗因子  $\alpha_f \cdot l$  与

耦合器损耗  $\alpha_c$  相比小得多,可在(2)式中略去不计,则(2)式为

$$E_2(t) = E_3(t + \tau), \quad (5)$$

利用(1)式~(5)式进行递推,得

$$\frac{E_4(t)}{E_1(t)} = A [B + A(1 - K^2)^2] \sum_{n=1}^{\infty} (AB)^{n-1} \times \exp\{-i2\pi n\nu_0 \tau + i[\varphi(t) - \varphi(t + n\tau)]\}, \quad (6)$$

式中  $A = \exp(-\alpha_c/2)$ ,  $B = iK$ 。

时间平均的光强比为

$$\left| \frac{E_4(t)}{E_1(t)} \right|^2 = A^2 \left[ 1 - \frac{P}{1 - H \sin^2(\theta/2)} \right], \quad (7)$$

式中

$$P = \frac{(1 - K^2)(1 - A^2 K^2 C^2)(1 - A^2)}{(1 + AKC)(1 - A^2 K^2)}, \quad (8)$$

$$H = 4AKC / (1 + AKC)^2, \quad (9)$$

$$C = \exp(-2\pi\Delta\nu\tau), \quad (10)$$

$$\theta = 2\pi\nu_0 \tau - \pi/2, \quad (11)$$

(7) 式即光纤法布里-珀罗环形谐振腔的输出光强比。

假设制作  $2 \times 2$  耦合器时,要求耦合与损耗相匹配,即  $K^2 = A^2$ ,同时假设光源为单色光,即光源谱宽是零,这时由(7)式可得

$$y(K^2, \theta) = |E_4(t)/E_1(t)|^2 = K^2 \left[ 1 - \frac{(1 - K^2)^2}{(1 + K^2)^2 - 4K^2 \sin^2(\theta/2)} \right]. \quad (12)$$

这是最理想的情况,其谐振曲线如图 2 所示。这时的耦合系数被称为谐振耦合系数。图中两条曲线分别代表  $K^2 = 0.95$  和  $K^2 = 0.85$  时的谐振曲线。

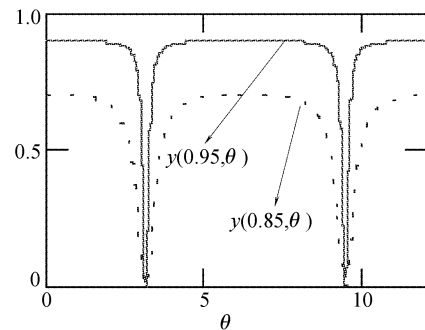


Fig. 2 Resonance curve

## 3 光源谱宽对法布里-珀罗谐振腔工作灵敏度的影响

在耦合匹配情况下,即  $K^2 = A^2$ ,将下列式子

$$\tau = \frac{l}{c}, \Delta\nu = \nu \cdot \frac{\Delta\lambda}{\lambda}, L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

代入(7)式,得

$$\begin{cases} y(g, \theta) = \left| \frac{E_4(t)}{E_1(t)} \right|^2, \\ y(g, \theta) = K^2 \left\{ 1 - \frac{(1 - K^2)[1 + K^2 \exp(-2\pi l/L_c)]/(1 + K^2)}{1 - 4K^2 \exp(-2\pi l/L_c) \sin^2(\theta/2)/[1 + K^2 \exp(-2\pi l/L_c)]^2} \right\}, \\ y(g, \theta) = K^2 - \frac{K^2(1 - K^2)(1 + K^2 g)}{(1 + K^2)[1 - 4K^2 g \cdot \sin^2(\theta/2)/(1 + K^2 g)^2]}, \end{cases} \quad (13)$$

其中  $g = \exp(-2\pi l/L_c)$ 。

对于干涉式光纤传感器来说,其工作点一般选在谐振曲线的斜率最大点,这样传感器的灵敏度达到最大,也就是满足条件  $d^2 y/d\theta^2 = 0$  成立。令

$$A = (1 - K^2) \frac{1 + K^2 \exp(-2\pi l/L_c)}{1 + K^2},$$

再令  $B = 4K^2 g/(1 + K^2 g)^2$ , 可得

$$\frac{dy}{d\theta} = -\frac{AB \sin \theta}{2[1 - B \sin^2(\theta/2)]^2}, \quad (14)$$

$$\frac{d^2 y}{d^2 \theta} = -\frac{AB[\cos \theta - B \sin^2(\theta/2) \cos \theta + B \sin^2 \theta]}{2[1 - B \sin^2(\theta/2)]^3}, \quad (15)$$

$$\cos \theta = \frac{[(2 - B) \pm \sqrt{4 - 4B + 9B^2}]}{2B}.$$

又因为  $g \leq 1, K \leq 1$ , 所以  $B \leq 1$ , 因而  $\cos \theta$  只能取  $[(2 - B) - \sqrt{4 - 4B + 9B^2}]/2B$ 。对于干涉式光纤传感器来说,传感器光学灵敏度  $G$  可以用  $dy/d\theta$  表示。为讨论方便,  $G$  一般取绝对值。将  $\cos \theta$  值代入(14) 式得

$$G(\Delta\lambda) = \frac{4\sqrt{2}A[6B^2 - (2 - B)^2 + (2 - B)\sqrt{4 - 4B + 9B^2}]^{1/2}}{[3(2 - B) - \sqrt{4 - 4B + 9B^2}]^2}, \quad (16)$$

(16)式表明了法布里-珀罗干涉式光纤传感器灵敏度函数  $G$  随着光源谱宽  $\Delta\lambda$  变化的关系。为了了解函数的变化规律,利用 MathCAD 软件计算(16) 式,并作  $G-\Delta\lambda$  曲线图(图 3),从曲线上可以看出两者的变化规律。

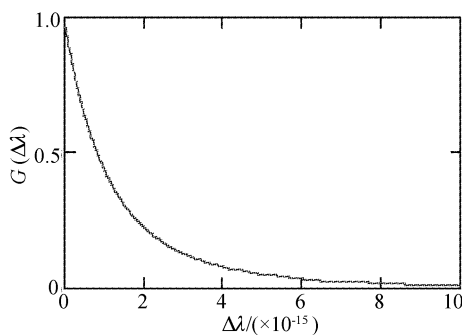


Fig. 3 Diagram of  $G$  and  $\Delta\lambda$

图 3 中计算的光纤谐振腔的耦合系数  $K = 0.9$ , 光纤环路长度  $l = 10$  m, 光源波长  $\lambda = 0.6328 \times 10^{-6}$  m, 并且  $G$  已经针对  $\Delta\lambda = 0$  这一理想情况做了归一化处理。从图中可以看出,随着  $\Delta\lambda$  的增加,  $G$  很快地减小。当光源谱宽  $\Delta\lambda = 10^{-15}$  m 时,  $G$  幅度已经减小了一半。

图 4 中三条曲线分别代表法布里-珀罗干涉式

光纤传感器输出光强比  $y(g, \theta)$  与  $\theta$  之间的关系,三条曲线分别对应了干涉长度因子是 0.5、0.6、0.65 时的干涉曲线形状(即对应  $l = 10$  m 时,  $L_c$  分别等于 90 m、123 m、146 m 的情况)。可以看出,随光源干涉长度  $L_c$  的增加,干涉曲线光强比的幅度明显加深。曲线的最大斜率值即灵敏度也随之加大。

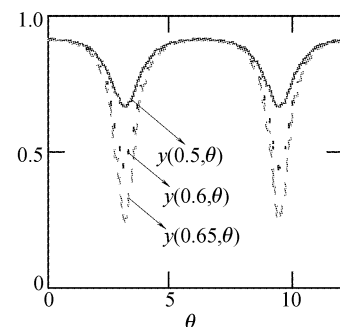


Fig. 4 Resonance curves of different  $L_c$

此外我们还可以考虑光源谱宽对不同长度环形光纤谐振腔工作灵敏度的影响。对比光纤长度分别是 10 m 和 1 m 两种情况,归一化后的  $G$  减小到 0.5 时所对应的谱宽分别是  $8.07 \times 10^{-16}$  m 和  $8.07 \times 10^{-15}$  m, 相差 10 倍。

图 5 是在示波器的 CH1 通道的电压单位等于

5 mV,扫描周期单位  $T$  等于 0.2 ms 的状态下拍摄的法布里-珀罗谐振腔的谐振曲线。该腔的腔长  $l=1$  m,  $K=0.9$ 。从谐振曲线的形状可以看出,与 MathCAD 绘制的图 2 基本吻合。

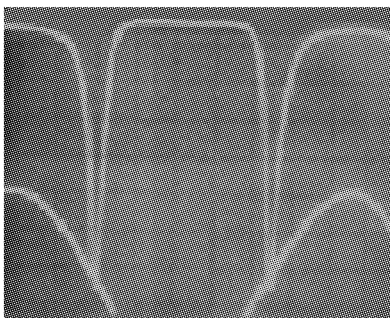


Fig. 5 Oscillogram of F-P resonance curve

图 6 是实验装置的方框图,单纵模稳频激光器的出射光经由偏振器和旋光器组成的光隔离器耦合至环形腔,在环形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,经高速半导体二极管(PIN)光电转换,送入检测电路,再经分频放大,将待测信号送至示波器,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压电陶瓷,使绕在压电陶瓷上环形腔的部分光纤产生伸缩,抵消噪声的干扰,稳定环形腔的工作点,这样环形腔就可以稳定的接收待测信号了。本实验中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压电陶瓷,使环形腔产生谐振,这样,在示波器上就观察到图 5 所示的曲线。

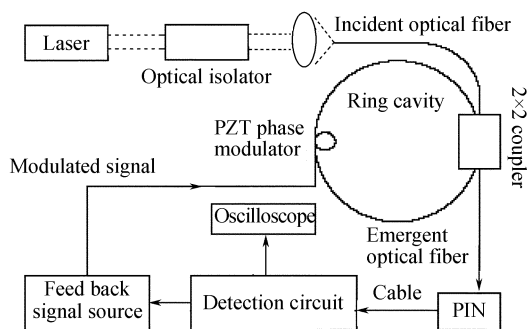


Fig. 6 Experimental instrument scheme

当换用 1 m、50 cm、25 cm 等腔长的 He-Ne 激光光源时,由于谱宽增加、频率不稳、模间耦合变换、多

模式输出使能量分散等原因,使谐振曲线的波形畸变且曲线幅值极小,在示波器上很难同步观察。当换用激光二极管(670 nm)后,由于谱线太宽,已不能形成干涉。

**结论** 从以上的讨论可知,光源谱宽对法布里-珀罗腔的谐振特性影响是显著的。其实,从实验中我们还会看到光源输出光功率的稳定性也直接影响到传感器的灵敏度。因此这种形式的光纤传感器要求有一个谱宽窄、频率稳定性和输出光功率稳定性高的激光器作为光源。实验中我们选用的是波长为  $\lambda=0.6328$   $\mu\text{m}$  的 He-Ne 激光光源,采用热调谐技术控制激光器腔长,将激光频率锁定在激光增益曲线上特定点,从而获得稳定的激光输出。其技术指标达到:

功率稳定度:功率漂移在 1% 以内。谱宽:  $\Delta\lambda \leq 0.4 \times 10^{-15}$  m, 对应  $\Delta\nu \leq 300$  kHz。

本文提出的方法还可以分析其它形式的干涉光纤传感器的灵敏度问题,为其传感系统的设计提供依据。

## 参 考 文 献

- 1 Yan Yongzhi. The application perspective of fibre-optic sensing systems in naval ship and U-boat. *Piezoelectrics & Acousto-optics* (压电与声光), 1992, **14**(6):21~25 (in Chinese)
- 2 Cui Sanlie, Zhou Fuhong Xu Yande. Investigation on the acoustonotive pressure sensitivity of a single mode fiber hydrophone. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 1995, **24**(1):72~76 (in Chinese)
- 3 Zhang Shaoxian, Zeng Xuefei, Liu Yongzhi. A kind of optical gyroscope structure based on ring resonator and Mach-Zehnder interference. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1):117~120 (in Chinese)
- 4 Chen Haixing Li Haifeng, Gu Peifu *et al.*. Interleaver design based on phase characteristics of Fabry-Perot cavity. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2003, **23**(1):37~40 (in Chinese)
- 5 Zhu Ruogu. Experimental research on sinusoidal phase modulating double F-P interferometry. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 1994, **14**(5):508~512 (in Chinese)
- 6 Koo K P. Passive stablization scheme for fiber interferometers using fiber directional couplers. *Appl. Phys. Lett.*, 1982, **41**(7):616~619