

文章编号: 1001-3806(2004)04-0359-04

# 基于高斯光束耦合模型的 FFP 性能分析

巩宪峰<sup>1</sup>, 王长松<sup>1</sup>, 陈胜平<sup>2</sup>, 李家方<sup>2</sup>

(1. 北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2. 南开大学 物理学院, 天津 300071)

摘要: 反衬度、反射率、自由光谱带宽是 FFP 干涉仪的重要性能指标, 而 FFP 腔光波几何衰减因子、端面反射率及腔长 3 个参数又是影响这些指标的主要因素。针对以均匀光束耦合模型为基础的 FFP 几何衰减因子的不足, 提出了以高斯光束耦合为基础的衰减因子模型, 得到了与实际值接近的衰减因子公式; 分析了 FFP 腔长和两端面反射率对反射谱反衬度及反射率的影响; 根据以上分析设计了光纤光栅 FFP 波长解调器。

关键词: 光纤式法布里 珀罗干涉仪; 几何衰减因子; 反衬度; 反射率

中图分类号: TN253; O435 文献标识码: A

## Analysis of FFP characteristics based on Gaussian beam coupling model

GONG Xianfeng<sup>1</sup>, WANG Chang-song<sup>1</sup>, CHEN Sheng-ping<sup>2</sup>, LI Jia-fang<sup>2</sup>

(1. Mechanical Engineering School, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. Institute of Physics, Nankai University, Tianjin 300071, China)

**Abstract:** Discrimination, reflectivity and FSW (free spectrum width), which are determined by the geometric attenuation factor of optic field and reflectivity of two ends greatly, are the important factors of FFP (fiber Fabry-Perot). Because of the imprecision of the old attenuation factor, which is based on identical beam model, a new model based on Gaussian beams is provided, and the equation of which is found. Then the influence of cavity length and reflectivity of ends to discrimination and reflectivity of FFP is analysed deeply. Conclusively, a FFP wavelength demodulator is designed for optic fiber grating.

**Key words:** fiber Fabry Perot (FFP); geometric attenuation factor; discrimination; reflectivity

### 引 言

光纤式 F-P 干涉仪 (fiber Fabry-Perot, FFP) 体积小、重量轻、不受电磁干扰, 可作为传感器测量应变<sup>[1]</sup>、温度<sup>[2]</sup>、振动<sup>[3]</sup>、声发射<sup>[4]</sup>等物理量, 同时也可以作为波长解调器<sup>[5]</sup>实现光纤光栅波长解调。FFP 无论作为传感器还是作为波长解调器使用, 都要尽可能地提高其反衬度和反射率, 而这两项指标又受到 FFP 腔的腔长、波场几何衰减因子以及 FFP 腔两端面反射率 3 个参数的影响。下面将分析以上参数对 FFP 性能的影响, 同时对几何衰减因子的衰减模型进行改进, 使其更接近于实际实验值。

### 1 FFP 原理

FFP 的结构如图 1 所示, 在毛细管的两端分别

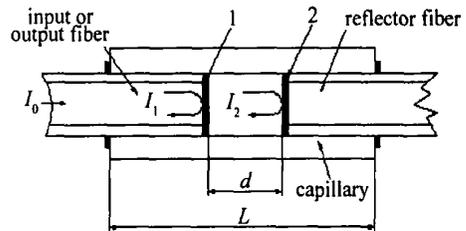


Fig. 1 Construction of FFP

插入端面镀膜的单模光纤, 并在两边用环氧胶把光纤固定。光纤的两个端面 1, 2 在毛细管内形成 FFP 腔, 当光束  $I_0$  从输入输出光纤的左端注入时, 一部分光在端面 1 形成反射光束  $I_1$ , 另一部分透过镀膜面 1 进入 FFP 腔, 在 FFP 腔内传输后遇到端面 2 发生反射形成  $I_2$  回到 FFP 腔, 在 FFP 腔再次传播并通过端面 1 与  $I_1$  相遇形成干涉。

可以认为 FFP 是双光束干涉仪, 在输入输出光纤中产生干涉的除端面 1, 2 第 1 次反射的  $I_1, I_2$  光外, 后来的多次反射光由于能量很小都可以忽略。干涉后归一化的光强分布函数为<sup>[6]</sup>:

$$R = R_1 + K^2 R_2 (1 - R_1)^2 +$$

作者简介: 巩宪峰(1971), 男, 工程师, 博士, 现主要从事光纤传感与信息处理技术研究。

E-mail: xianfengong@sina.com

收稿日期: 2003-10-30; 收到修改稿日期: 2003-11-14

$$2K \sqrt{R_1 R_2} (1 - R_1) \cos(4\pi d/\lambda) \quad (1)$$

式中,  $R_1, R_2$  为端面1、端面2的反射率,  $K$  为光波在 FFP 腔从端面1到端面2又回到端面1的几何衰减因子(是波场,而不是光强),  $d$  为 FFP 腔腔长。

由(1)式, FFP 腔的反衬度可以表示为<sup>[7]</sup>:

$$V = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} + R_{\min}} = \frac{2 \sqrt{R_1 K} \sqrt{R_2} (1 - R_1)}{R_1 + K^2 R_2 (1 - R_1)^2} \quad (2)$$

由(1)式、(2)式可知, 反射率  $R$  体现了 FFP 反射光强的大小, 而  $V$  决定着 FFP 输出的动态范围, 二者都是 FFP 的重要性能指标, 并且都与波场几何衰减因子  $K$ 、端面反射率  $R_1, R_2$  有关。

## 2 FFP 腔波场几何衰减因子 $K$ 的改进

目前, 对 FFP 的几何衰减因子的计算都是采用均匀光束耦合模型<sup>[6,8]</sup>, 见图2, 光波被限制在光纤的孔径角内沿 FFP 腔轴线均匀递减, 在垂直于 FFP 腔轴线的横断面上光场呈均匀分布, 则 FFP 腔的光波几何衰减因子表示为:

$$K = [r/(r + d \tan \theta)]^2 \quad (3)$$

式中,  $r$  为光纤芯层半径,  $d$  为 FFP 腔长,  $\theta$  为光纤的孔径角。

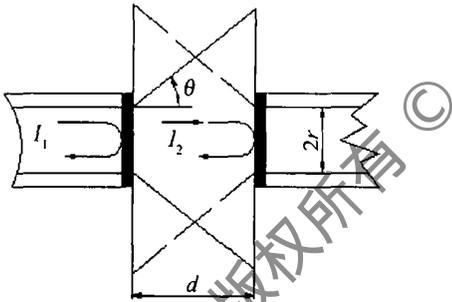


Fig. 2 Identical beam coupling model of FFP

在对 FFP 的研究中发现, 用(3)式计算的几何衰减因子与实际值相比误差较大, 针对以上情况采用高斯光束耦合模型对 FFP 几何衰减因子进行了改进, 使理论值与实际值十分接近。图3中是 FFP 腔的高斯光束耦合模型, 它认为光束在 FFP 腔内呈高斯束传播即在垂直于腔轴的横断面上光束呈高斯分布, 在  $z$  向按双曲线传播, 其波场可表式为<sup>[9]</sup>:

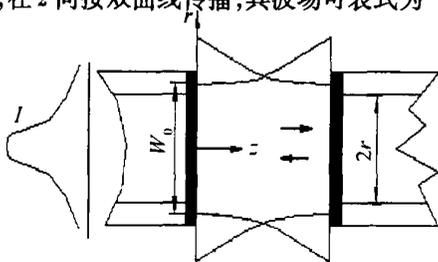


Fig. 3 Gaussian beam coupling model of FFP

$$E(r, z) = \left\{ E_0 \frac{W_0}{W(z)} \exp \left[ \frac{-r^2}{W^2(z)} \right] \right\} \exp(-j\beta z) \quad (4)$$

式中,  $E_0$  为光波在  $z=0$  时的振幅,  $W_0$  为光纤的模斑尺寸即模场直径,  $W(z)$  为光斑在  $z$  处的模斑尺寸,

且  $W^2(z) = W_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi W_0^2 n} \right)^2 \right]$ ,  $r$  为在以光纤的轴心为原点的柱坐标中的半径,  $\beta$  为光波的传播常数,  $n=1$  为 FFP 腔折射率。

根据(4)式, 光波在 FFP 腔中传播到  $z$  处时在半径为  $r$  的横截面上的能量为:

$$I(z) = \iint E(r, z) E(r, z)^* ds = E_0^2 \frac{W_0^2}{W^2(z)} \times \int_0^{2\pi} \int_0^r \exp[-2r^2/W^2(z)] r dr d\theta = E_0^2 \frac{\pi W_0^2}{2} \{1 - \exp[-2r^2/W^2(z)]\} \quad (5)$$

把  $W(z)$  代入得:

$$I(z) = E_0^2 \frac{\pi W_0^2}{2} \left[ 1 - \exp \left( \frac{-2r^2 \pi^2 W_0^2}{\pi^2 W_0^4 + \lambda^2 z^2} \right) \right] \quad (6)$$

对上式中的  $\exp(x)$  函数进行一阶近似即  $\exp(x) = 1 + x$  得:

$$I(z) = E_0^2 \frac{r^2 \pi^3 W_0^4}{\pi^2 W_0^4 + \lambda^2 z^2} \quad (7)$$

取  $r$  为光纤的模斑半径即  $r = W_0/2$ , 则在  $z=0, z=d$  时在光纤的端面上的光斑能量分别为:

$$I(0) = E_0^2 \pi W_0^2 / 4 \quad (8)$$

$$I(d) = E_0^2 \pi^3 W_0^6 / [4(\pi^2 W_0^4 + \lambda^2 d^2)] \quad (9)$$

由(8)式和(9)式得 FFP 腔的几何衰减因子为:

$$K = \sqrt{\frac{I(d)}{I(0)}} = \frac{\pi^2 W_0^4}{\pi^2 W_0^4 + \lambda^2 d^2} \quad (10)$$

通过(10)式与(3)式比较可见, (10)式的衰减因子中增加了模场直径而不是光纤直径的影响; 另外, 几何衰减因子  $K$  与腔长  $d$  的关系也不再是简单的一阶关系, 而是二阶关系并且考虑了工作波长的影响, 使其更接近于 FFP 腔光波耦合的实际情况。

由(10)式可见, 如果在光纤类型与工作波长选定的情况下, 几何衰减因子就唯一的受 FFP 腔长的影响, 图4是对光场几何衰减因子分别采用均匀光束耦合模型、高斯光束耦合模型与实验所得的数据的比较。实验中所选用的输入输出光纤和反射光纤都为单模光纤, 光纤芯径  $r = 4.5 \mu\text{m}$ , 模场直径  $W_0 = 9.9 \mu\text{m}$ , 光纤孔径角  $\theta = \arcsin \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = 0.147 \text{rad}$ , 工作波长  $\lambda = 1550 \text{nm}$ , 实验对 FFP 腔腔长在  $0 \sim 400 \mu\text{m}$  范围内的 FFP 腔几何衰减因子  $K$  进行了标

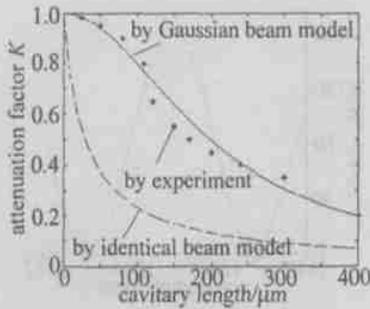


Fig.4 The comparison of attenuation factors of experiment and different models

定,标定后的数据采用高斯函数拟和为:

$$K = K_0 + \frac{A}{W \sqrt{\pi/2}} \exp \left[ -\frac{2(d-d_c)^2}{W^2} \right] \quad (11)$$

$K_0 = 0.25592, d_c = -10.47741, W = 249.82468, A = 243.02284$ .

拟和曲线与以高斯光束耦合模型为基础的几何衰减因子间的最大误差为 0.06,而与以均匀光束耦合模型为基础的几何衰减因子间的最大误差为 0.6,是高斯光束耦合模型的 10 倍。可见,高斯光束耦合模型比均匀光束耦合模型更接近于 FFP 光波的实际衰减形式。

### 3 FFP 腔端面反射率与反衬度的关系

对 FFP 干涉仪来说,无论作为传感器测量还是作为光纤光栅波长解调器,反衬度是衡量其性能的重要指标。由(2)式,反衬度  $V$  是端面 1,2 的反射率  $R_1, R_2$  及波场几何衰减因子  $K$  的函数,另外由(10)式高斯光束模型结果, $K$  与腔长  $d$  有关,所以  $R_1, R_2, d$  决定了  $V$  的大小。又据反射谱的自由光谱区长度  $\Delta\lambda$  是腔长  $d$  的函数,即:  $\Delta\lambda = \lambda^2/2d$  (12)  $d$  决定自由光谱区长度的大小。由(2)式联合(10)式、(12)式得在满足一定的自由光谱长度  $\Delta\lambda$  即腔长  $d$  确定条件下,反衬度  $V$  由端面 1,2 的反射率  $R_1, R_2$  决定。图 5 是在自由光谱区长度  $\Delta\lambda = 8\text{nm}$  即腔长  $d = 150\mu\text{m}$ ,工作波长  $\lambda = 1550\text{nm}$ ,模场直径  $W_0 = 9.9\mu\text{m}$  时 FFP 腔端面反射率  $R_1, R_2$  与反衬度  $V$  间的关系。由图可见:(1)在 FFP 腔端面 1 的反射率  $R_1 < 0.25$  时,反衬度  $V$  对  $R_2$  存在极值位置,如  $R_1 = 0.1, R_2 = 0.3$  时  $V = 1$ ,此时再改变  $R_2$  的大小都会降低  $V$  值;但在  $R_1 \geq 0.25$  时,不存在  $V = 1$  的点,此时  $V$  与  $R_2$  成正比,如  $R_1 = 0.3, R_2 = 1$  时反衬度为最大值  $V = 0.89$ ,但无论如何调整  $R_2$  都不能使  $V$  为 1;(2)在  $R_2$  一定的条件下,调整  $R_1$  总存在  $V = 1$  的极值点,在此点再增大或减小  $R_1$  都会使  $V$  降低,此

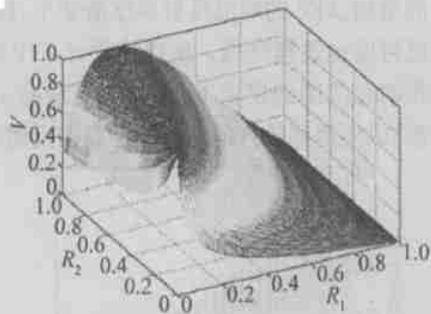


Fig.5 The relation between discrimination and reflectivity of two ends  $R_1$  分布在 0~0.25 范围内。

可见,在设计 FFP 时为了保证一定的反衬度,要注意选择端面反射率  $R_1, R_2$  的范围。

### 4 FFP 腔端面反射率与干涉谱反射率的关系

反衬度对 FFP 是一项重要的指标,反射谱的反射率同样也很重要,在满足自由光谱区长度和反衬度的条件下也应考虑端面反射率对 FFP 性能的影响,反射谱的反射率提高了,系统的灵敏度也就提高了,由(1)式,FFP 的最大反射率可表示为:

$$R = R_1 + K^2 R_2 (1 - R_1)^2 + 2K \sqrt{R_1 R_2} (1 - R_1) \quad (13)$$

式中,  $R$  与  $R_1, R_2$  和  $K$  有关,在  $K$  确定时,FFP 反射谱的反射率  $R$  与腔的两个端面反射率  $R_1, R_2$  间的关系如图 6 所示。可见,在  $R_1, R_2$  较小时,FFP 的反射率比较低,随着其逐渐增大,  $R$  也增大,直至趋近于 1。所以,在设计 FFP 时,既要保证一定反衬度  $V$ ,又要兼顾 FFP 的反射率  $R$ ,要尽可能地提高 FFP 腔两端面的反射率,以便提高 FFP 的总体反射强度提高信噪比。

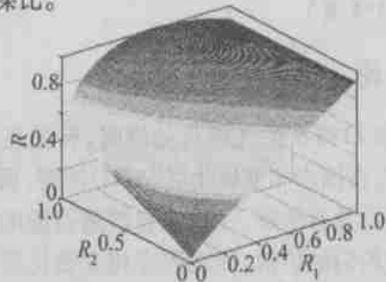


Fig.6 The relation between reflectivity of FFP and reflectivity of two ends

### 5 FFP 腔长与反射率和反衬度的关系

FFP 干涉仪反射率和反衬度不但与干涉腔的两端面反射率有关,而且与腔长  $d$  也有关系,因由(10)式,  $d$  直接影响 FFP 腔的几何衰减因子  $K$ 。由(1)式,在 FFP 腔的端面反射率确定的情况下,反射率与腔长间的关系如图 7 所示。可见,反射谱的峰值反射率与腔长之间类似于有阻尼衰减振荡曲线,随

着腔长的增加, FFP 的峰值反射率逐渐变小; 同样反射谱的反衬度也逐渐降低。所以在设计 FFP 时, 在满足波长动态范围的要求下, 还要适当地减小 FFP 腔的间隙, 以便得到较大的反衬度和高的反射率。

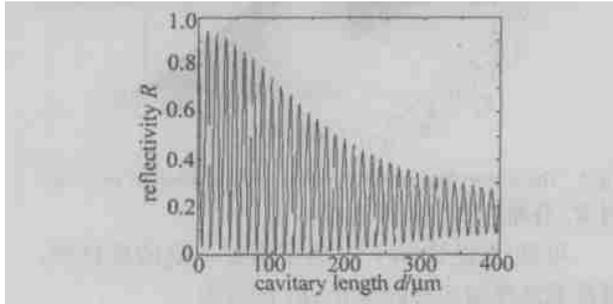


Fig. 7 The relation between reflectivity and cavity length of FFP

## 6 实验结果

采用以上思想设计的 FFP 作为边带滤波器, 实现了对光纤光栅传感器的波长解调, 考虑到传感器的波长变化范围为 1nm, 在综合考虑解调系统的线性度、反衬度和反射率的条件下, 首先确定 FFP 的自由光谱区  $\Delta\lambda = 8\text{nm}$ , 由(12)式得腔长  $d = 150\mu\text{m}$ ; 在考虑反射谱的反衬度和反射率条件下 FFP 腔的两个端面的反射率分别选为  $R_1 = 0.2$ ,  $R_2 = 0.6$ ; 另外选用模场直径  $W_0 = 9.9\mu\text{m}$  的单模光纤, 由此实验得到 FFP 的反射谱如图 8 所示, 根据(2)式计算得其反衬度  $V = 0.97$ , 最大反射率为  $R = 0.65$ 。采用此 FFP 干涉仪实现了对光纤光栅波长解调, 最终系统的测量精度达到  $1\mu\text{e}$ 。

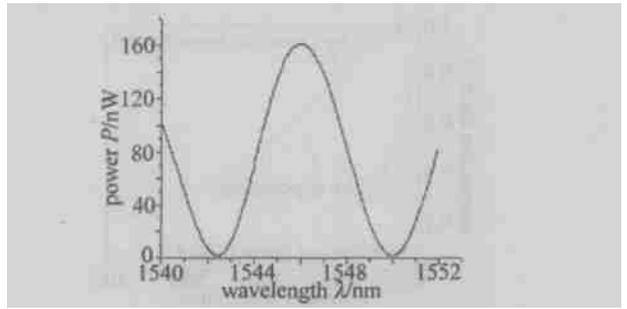


Fig. 8 The reflectivity spectrum of FFP

## 参 考 文 献

(上接第 354 页)

## 3 结 论

(1) 灰口铸铁激光硬化处理时, 石墨在熔化层完全溶解, 在固态相变硬化层中部分溶解, 而在过渡层中则完全没有溶解。(2) 来自溶解石墨的碳在熔化层有较均匀的扩散, 而在固态相变硬化层中碳则富积在原石墨位置附近, 扩散不均匀。(3) 硬化层中马氏体的过饱和碳含量随表面距离的增加而减小, 硬化层中的硬度亦有与此极相对应的变化规律, 这说明因石墨溶解带来马氏体中碳的过饱和固溶强化是灰口铸铁激光表面硬化的主要硬化机理之一。

## 参 考 文 献

- [1] KALAMKAROV A L, FITZGERALD S B, MACDONALD D O. The use of Fabry Perot fiber optic sensors to monitor residual strains during pul-tusion of FRP composites [J]. *Composites Part B: Engineering*, 1999, 30(1): 167~ 175.
- [2] 毕卫红, 王 昕, 郎利影. 光纤 Fabry-Perot 干涉式温度测量 [J]. *光子·激光*, 2002, 13(42): 1316~ 1317.
- [3] 李志全, 王志斌, 董 凯. 光纤 F-P 加速度传感器的研究 [J]. *传感技术学报*, 2001, 9(3): 206~ 209.
- [4] CLAUS R O, SUDARSHANAM V S, MURPHY K A. Interferometric optical fiber sensors for ultrasonic wave measurement [M]. New York: Wiley, 1995. 249~ 269.
- [5] 陈长勇, 乔学光, 贾振安 *et al.* 光纤光栅传感应用中的波长编码信号解调技术 [J]. *半导体光电*, 2003, 24(2): 121~ 127.
- [6] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M. Quadrature phase shifted extrinsic Fabry Perot optical fiber sensors [J]. *Opt Lett*, 1991, 16(4): 273~ 275.
- [7] 吴 强, 郭光灿. 光学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003. 67.
- [8] 杨朝晖, 刘浩吾. F-P 型光纤应变传感器混凝土试验研究 [J]. *实验力学*, 1998, 13(1): 41~ 46.
- [9] 亚里夫 A. 量子电子学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983. 116~ 118.
- [1] 沈 莲, 李成芳, 王秀琴 *et al.* 激光处理对灰铸铁显微组织的影响 [A]. *全国激光热处理学术会议论文集* 88 [C]. 上海: 上海市新闻出版局, 1989. 42~ 46.
- [2] 左养秀, 刘凤琴, 张 忠. 东风 4 型内燃机柴油机气缸套激光热处理 [A]. *全国激光热处理学术会议论文集* 88 [C]. 上海: 上海市新闻出版局, 1989. 19~ 23.
- [3] 姚建华. 摩托车汽缸内壁激光处理 [A]. *全国第六届高能束热处理学术会议论文集* [C]. 北京: 电子工业出版社, 1997. 36~ 41.
- [4] MOLLAN P A. Fatigue characteristics of laser surface hardened cast irons [J]. *J Engineering Materials and Technology*, 1987, 109: 179.
- [5] 周卓华. 铸造镍基高温合金熔凝、熔覆的开裂行为研究 [D]. 武汉: 华中理工大学, 1995. 39~ 40.
- [6] 范 雄. X 射线金属学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1981. 96~ 97.
- [7] 王家金. 激光加工技术 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1992. 113~ 115.