

文章编号: 0258-7025(2003)08-0739-04

高精度测量 F-P 标准具间距的光谱方法

黄文财, 谢建平, 吕 亮, 陈曦曜, 明 海, 鲁拥华, 王安廷

(中国科学技术大学物理系, 安徽 合肥 230026)

摘要 利用高分辨率光谱分析仪对空气隙 F-P 标准具透射谐振峰频率进行测量, 然后通过直线拟合获得自由谱域, 从而计算得出 F-P 标准具的间距。对 F-P 标准具间距测量的精度进行分析, F-P 标准具间距测量的相对误差为 2×10^{-3} 。提出了一种新颖的入射光与 F-P 标准具垂直的精确调节方法。

关键词 光学技术与仪器; F-P 标准具; 高分辨率光谱分析仪; 多光束干涉

中图分类号 TN 253 **文献标识码** A

Spectrum Method of F-P Etalon Spacing High Precision Measurement

HUANG Wen-cai, XIE Jian-ping, LÜ Liang,

CHEN Xi-yao, MING Hai, LU Yong-hua, WANG An-ting

(Department of Physics, University of Science & Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China)

Abstract In this paper, a method was reported that used a high precision optical spectrum analyzer to measure transmission resonant frequency of air gap F-P etalon and got its free spectrum range by linear fitting. The spacing of F-P etalon was calculated based on this. The measuring precision of this method was analyzed, which showed that the relative error of F-P etalon spacing measurement was 2×10^{-3} . A novel method of F-P etalon perpendicularity adjusting was introduced as well.

Key words optical technique and instrument; F-P etalon; high precision optical spectrum analyzer; multi-beam interference

1 引 言

近年来,在光纤通信中 F-P 标准具已成为一种结构最简单、应用广泛的光滤波器件,它的主要用途是用作解复用器^[1],特别是随着密集波分复用通信系统(Dense Wavelength Division Multiplexed System)的发展,由于 F-P 标准具具有等间隔多透射峰的特点使得它成为光源的相对稳频标准^[2],从而实现对多路信号光源频率的精确锁定,以避免不同信道之间的相互串扰。然而,在 F-P 标准具的各种应用中都要求能够对 F-P 标准具的间距进行高精度测量,以确定设计的 F-P 标准具是否能够满足要求。

为此,本文提出高精度测量 F-P 标准具间距的光谱方法,并分析该方法的测量精度。基于光谱分

析仪 2 GHz 的频率测量精度, F-P 标准具间距测量的相对误差为 2×10^{-3} 。同时,本文还提出了利用自身光路实现 F-P 标准具测量中与入射光垂直的精确调节,整个调节过程不需要借用其他光学仪器。

2 理论分析

2.1 空气隙 F-P 标准具间距的测量原理

根据多光束干涉原理,空气隙 F-P 标准具透过率可表示为^[3]

$$T = 1 / \left[1 + \frac{4R \sin^2(2\pi d \cos\theta / \lambda)}{(1 - R^2)} \right] \quad (1)$$

式中, R 为 F-P 标准具的反射率, d 为 F-P 标准具的间距, λ 为入射光波长, θ 为入射光的倾斜角,当光束垂直入射时, $\theta = 0^\circ$ 。

收稿日期: 2002-04-27; 收到修改稿日期: 2002-06-03

基金项目: 安徽省自然科学基金(编号 BJ02-08)资助项目。

作者简介: 黄文财(1976.6—),男,中国科技大学博士生,主要从事光通信技术研究。E-mail: huangwc@mail.ustc.edu.cn

由(1)式可求出 F-P 标准具透射谐振峰波长 λ_m 和频率 ν_m 分别为

$$\lambda_m = \frac{2d\cos\theta}{m} \quad (2a)$$

$$\nu_m = \frac{cm}{2d\cos\theta} \quad (2b)$$

式中, m 为干涉级数。由(2)式, 相邻两透射谐振峰波长和频率的间距分别为

$$\Delta\lambda = \frac{2d\cos\theta}{m(m+1)} \quad (3a)$$

$$\Delta\nu = \frac{c}{2d\cos\theta} \quad (3b)$$

可见, F-P 标准具相邻透射谐振峰波长间距与干涉级数有关, 严格地讲并不是等间隔。而频率间距(定义为自由谱域, 用 FSR 表示)严格等间隔, 与干涉级数无关。因此, 先用光谱仪测量出相邻若干透射谐振峰频率, 再通过直线拟合获得斜率值, 则斜率即为频率间距, 如图 1 所示。即

$$k = c/(2d\cos\theta) \quad (4)$$

根据(4)式可计算出 F-P 标准具的间距 d 。

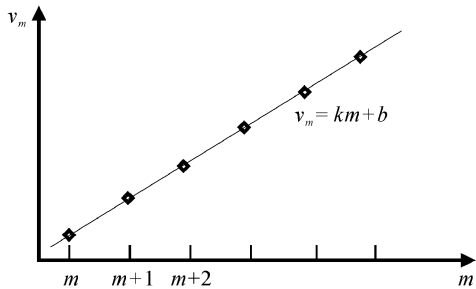


图 1 F-P 标准具的间距测量原理图

Fig. 1 Principle diagram of F-P etalon spacing measurement

2.2 光谱法测量 F-P 标准具间距的精度分析

根据(4)式对两边变量求微分, 则光谱法测量 F-P 标准具间距的精度由下式决定

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta(\cos\theta)}{\cos\theta} \quad (5)$$

式中第一项表示拟合直线斜率的相对误差, 第二项表示入射光与 F-P 标准具的垂直度引起的误差。根据线性拟合误差理论^[4], 斜率 k 以及它的误差由下式决定

$$k = \frac{nS_{m\nu_m} - S_{\nu_m}S_m}{\Delta} \quad (6a)$$

$$\Delta k = \frac{1}{\sqrt{n-2}} \sqrt{\frac{n(S_{m\nu_m} + \Delta_{m\nu_m}) - S_{\nu_m}^2}{\Delta} - k^2} \quad (6b)$$

式中, n 为测量点数, $S_{m\nu_m} = \sum_{i=1}^n \nu_{mi}^2$, $S_{\nu_m} = \sum_{i=1}^n \nu_{mi}$, $S_{mm} = \sum_{i=1}^n m_i^2$, $S_m = \sum_{i=1}^n m_i$, $S_{m\nu_m} = \sum_{i=1}^n m_i \nu_{mi}$, $\Delta_{m\nu_m} = n[(k\delta m)^2 + (\delta\nu_m)^2]$, $\Delta = n \cdot S_{mm} - S_m^2$ 。

实验时, 也可以通过多次测量, 进行直线拟合获得一组斜率值, 再求均方差从而得到斜率的误差。下面分析 F-P 标准具垂直度引起的误差。

入射光与 F-P 标准具垂直的精确调节方法——光谱判别法的基本原理如下: 当光束斜入射时, 如图 2 所示, 根据式(2b)可知, 对于干涉级数 m 的某一透射谐振峰频率值取决于入射光束的倾斜角 θ , 利用光谱仪监测某一谐振峰, 假定开始光束由 1 方向入射进入 F-P, 此时对应谐振峰频率为 ν_m , 当 F-P 角度向 0 方向改变时, 即倾斜角 θ 变小, 因此光谱仪上能观察到谐振峰频率 ν_m 向左移动。继续同方向改变 F-P 的角度, 当光束入射方向刚好越过垂直入射方向 0 时, 光谱仪上观察到谐振峰频率 ν_m 突然改变移动方向, 向右移动。根据这一特点, 可以精确地调节入射光与 F-P 标准具的垂直度。必须说明, 入射光与 F-P 标准具垂直的调节是二维的, 即 θ 为锥角, 如图 2 所示。根据上面的分析, 入射光与 F-P 标准具的垂直精度取决于光谱分析仪的分辨率。光谱判别法调节 F-P 标准具时, 监测某一干涉级, m 和 d 为常量, 由式(2b)两边微分得

$$\frac{\Delta(\cos\theta)}{\cos\theta} = \frac{\Delta\nu_m}{\nu_m} \quad (7)$$

则(5)式改写为

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\Delta k}{k} + \frac{\Delta\nu_m}{\nu_m} \quad (8)$$

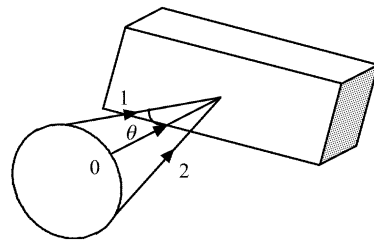


图 2 F-P 标准具垂直调节示意图

Fig. 2 Sketch map of F-P etalon of perpendicularity adjusting

3 实验与数据处理

3.1 实验装置

实验装置如图 3 所示。利用 980 nm 激光器抽运一段 7 m 长的掺钕光纤形成的放大自发辐射谱

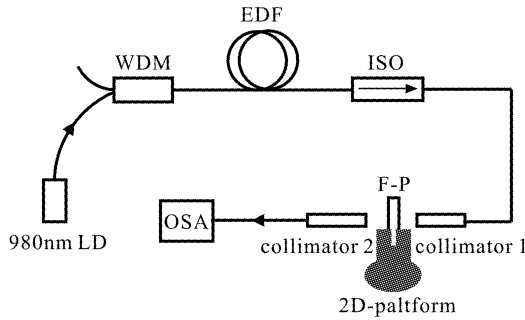


图 3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup

作为宽带光源。F-P 标准具置于一个二维可调节的平台上,实验用 ANDO6317B(频率测量精度为 2 GHz)光谱分析仪测量 F-P 标准具透射谐振峰频率值。

3.2 F-P 标准具与入射光垂直度的精确调节

根据前面的分析,实验时细心调节二维平台,使得入射光尽量垂直入射到 F-P 标准具。图 4 是调节过程中记录下来的光谱图,其中 1 是 F-P 标准具在某一位置时的透射谱,先调节二维平台的其中一维,透射谱向左移至 2 位置,继续同方向调节,透射谱突然反向移动至 3 位置。因此,入射光与 F-P 标准具垂直的位置对应的透射谱应在 2 和 3 两者之间,仔细调节找到最精确的垂直位置。用同样的方法调节入射光与 F-P 标准具另一维的垂直度。

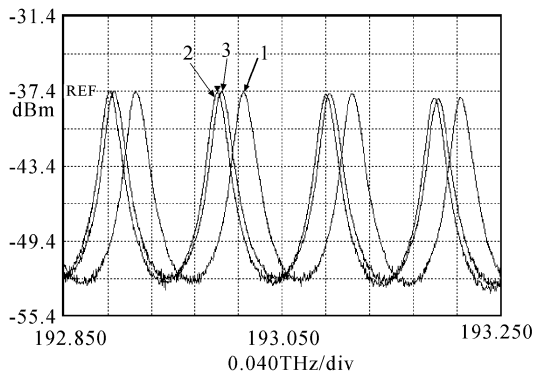


图 4 F-P 标准具透射谱随光束入射角变化图

Fig. 4 Transmit spectra vs inside angle of F-P etalon

3.3 F-P 标准具间距的测量结果

设定光谱仪的分辨率为 2 GHz,调整横坐标的频率范围,使得光谱仪屏幕范围内能出现 7~10 个谐振峰。记下每个谐振峰对应的频率值,测 5 组数据,并通过线性拟合获得每次测量所得到的直线的斜率 k_i ,见表 1。

表 1 实验数据及拟合结果

Table 1 Experimental data and fitting results

Measured group	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5
ν_{m1}	192.766	192.765	192.766	192.767	192.767
ν_{m2}	192.864	192.866	192.866	192.866	192.866
ν_{m3}	192.965	192.966	192.967	192.966	192.967
ν_{m4}	193.066	193.068	193.066	193.064	193.066
ν_{m5}	193.166	193.167	193.166	193.165	193.166
ν_{m6}	193.266	193.266	193.265	193.266	193.265
ν_{m7}	193.365	193.365	193.366	193.366	193.366
ν_{m8}	193.466	193.466	193.464	193.468	193.464
ν_{m9}	193.566	193.566	193.564	193.567	193.564
k_i	0.1001	0.1	0.09972	0.10013	0.09965

表 1 中,5 次测量获得斜率的平均值为: $\bar{k} = 0.09992$ 。则斜率的均方差由下式决定

$$\Delta k = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (k_i - \bar{k})^2}{5}} = 0.000198 \quad (9)$$

因此,斜率的测量结果表示为

$$k = 0.0999 \pm 0.0002 \quad (10)$$

取表 1 中任一组数据(这里取第一组),由(6)式可以计算出线性拟合的 k 值及 k 的误差,基于 ANDO6137B 光谱分析仪 2 GHz 的分辨率,即 $\delta\nu_m = 2$ GHz,计算结果如下

$$k = 0.1001 \pm 0.0003 \quad (11)$$

比较(10),(11)两式,多组测量求均方差所得误差与理论分析的误差基本相符。

取 $\nu_m \approx 193$ THz,由(8),(10)两式,则 F-P 标准具间距的测量的相对误差为

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{0.0002}{0.0999} + \frac{2 \times 10^9}{193 \times 10^{12}} \approx 2 \times 10^{-3} \quad (12)$$

(12)式说明,F-P 标准具垂直度引起的误差比拟合直线斜率的相对误差小两个量级,即本文提出的光谱判别法具有很高的精度,F-P 标准具间距的测量误差主要由拟合直线斜率的误差决定,它取决于光谱仪的测量精度。

由式(4),(10),(12),并取 $\theta = 0^\circ$,则 F-P 标准具间距的测量结果为

$$d = 1502 \pm 3 \mu\text{m} \quad (13)$$

4 结 论

利用高精度光谱分析仪对空气隙 F-P 标准具间距进行测量具有操作简单、测量精度高等优点。

同时,还提出了入射光与 F-P 标准具准直调节的光谱判别法,它是利用自身光路实现 F-P 标准具在测量中与入射光垂直的精确调节,整个调节过程不需要借用其他光学仪器。这种高精度测量在 F-P 标准具构成的扫描干涉仪以及高灵敏度传感器中也是十分重要的。

参 考 文 献

- 1 A. A. M. Saleh, J. Stone. Two-stage Fabry-Perot filters as demultiplexers in optical FDMA LAN's [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1989, 7(2):323~330
- 2 J. H. Jang, S. K. Shin, H. Kim *et al.*. A cold-start WDM system using a synchronized etalon filter [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1997, 9(3):383~385
- 3 Max Born, Emil Wolf. Principles of Optics [M]. 7th edition, Beijing: Cambridge University Press, 2001. 360~366 (in Chinese)
- 4 Laboratory of General Physics, University of Science and Technology of China. University Physics Experiments [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1996. 41~43 (in Chinese)



半导体激光治疗偏头痛

头痛是临床上最常见的症状之一,头痛有很多种类型,引起头痛的原因也十分复杂。根据不同原因引起不同类型的头痛,临床治疗方法也不同,本文对采用半导体激光治疗机治疗的 57 例偏头痛(普通型)患者进行了临床观察、分析及总结。

临床资料 本组治疗的 57 例患者均是门诊病人,其中男 26 例,女 31 例。年龄 21~52 岁,平均为 38.7 岁。病程最短为 9 个月,最长为 5 年,平均为 2 年 5 个月。根据对本组 57 例患者进行调查可知,患者偏头痛反复发作,以往每次发作持续时间约为 3~12 天。间歇期自数天至半年不等。而病人一般都是在偏头痛发作 3 天内到医院诊治(其中偏头痛发作 1 天内来就诊的有 11 例,偏头痛发作 2 天来就诊的有 27 例,偏头痛发作 3 天来就诊的有 19 例)。诊断标准:参照中华人民共和国行业标准。

治疗方法 所有病人均采用英国制造的 OMEGA-2001 型半导体激光治疗机治疗,用 46 点集束式输出端进行局部照射,脉冲频率选用 73~700Hz,该输出端共有 6 种波长(660,820,870,880,900 和 950 nm),平均功率密度:75 mW/cm²,照射面积 10 cm²。病人仰卧在治疗床上,全身放松,将治疗器先贴于一侧太阳穴(眉梢与眼外眦之间向后 3.3 cm 许的凹陷处)进行照射,持续照射 3 min;然后用同样的方法在另一侧太阳穴进行照射。每天治疗 1 次,3~5 次为一疗程。

观察结果 经 1 次治疗,所有病人头痛均有不同程度减轻;经 2 次治疗,头部疼痛消失 21 例;经 3 次治疗,头部疼痛消失 28 例;治疗 5 次后,所有病人头部疼痛均消失。经 8 个月随访观察,有 9 例患者复发(其中 2 例于治愈后 3 个月复发,5 例于治愈后 5 个月复发,2 例于治愈后 6 个月复发),需

要给以第二疗程治疗。

讨论 普通型偏头痛是一种常见、多发病,其病因尚不明确。血管功能不稳定、血管敏感性增高及植物神经功能紊乱等与发病有一定关系。劳累、受凉、饮酒、情绪变化及妇女经期等因素可诱发偏头痛。患者出现发作性一侧、双侧或全头部的搏动性痛或胀痛。部分患者伴有面色苍白、冷汗、恶心、呕吐和便秘等植物神经症状。以往主要采用止痛药、针灸等对症治疗。

OMEGA-2001 型半导体激光治疗机采用独特的 46 点集束式输出端,使 6 种波长的激光同时照射,适合不同的组织细胞对不同的波长起反应,增加激光照射的均匀度和深度。通过激光的生物学效应及微热效应,可调节血管的收缩、舒张功能及植物神经功能,降低神经末梢对疼痛的敏感性,从而起到镇静、止痛作用。采用止痛药治疗偏头痛有较好的治疗效果,但长期反复口服止痛药不但易形成对止痛药的依赖性,止痛药也会对人体产生一定的副作用或不良反应。针灸治疗偏头痛也有较好的治疗效果,但有不少病人怕痛不愿意接受针灸治疗,个别病人还会出现晕针等现象。因偏头痛的病因尚不明确,半导体激光治疗偏头痛的机理仍不完全明确。但从临床治疗观察,半导体激光对偏头痛确有很好的治疗效果,能有效地解除患者头痛等症状,减少偏头痛的发作频率。是一种操作简便、安全可靠的治疗方法。

广州军区广州总医院康复理疗科,
广州 广东 510010
宁俊忠,詹欣荣,廖军锋,陈耀平
收稿日期:2003-05-21