

F-P 标准具激光波长测量系统

吴 瑞 昆

(中国科学院上海光机所)

提要: 本文报告带有参考光束的 F-P 波长测量系统的工作特性及误差, 用 He-Ne 激光作参考光束的波长测量实验装置。对 32 个不同波长测量的结果表明, 测量均方根误差为 0.0019 nm。

Laser wavelength meter with F-P etalon

Wu Ruikun

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai)

Abstract: We report here the results about operation characteristics and error for F-P etalon wavelength meter with a reference beam. We have done some wavelength measurement experiment in a F-P system, in which the diameter of the interference pattern was measured by an OMA system and a He-Ne laser beam as reference beam. The RMS error for 32 different wavelength measurements was about 0.0019 nm.

引 言

近年来波长可调谐激光器有了很大的发展, 特别是染料激光在各个领域得到了广泛的应用。但是, 大多数这类激光器都没有精确定标的输出波长读数, 使用中常常感到缺少必要的参数。特别是在很多物理实验中, 人们往往需要把激光波长精确地对准某条谱线, 或者需要精确地知道输出的激光在某一时刻的波长值。因而波长的精密测定逐渐引起人们的关注, 迄今已有很多这方面的报道^[1~4]。F-P 标准具是经常用来测量谱线宽度的, 用它作波长绝对值测量时要碰到很多

的问题, 本文就是报告用 F-P 标准具系统测量激光波长绝对值的有关分析和实验结果。本方法不但适用于连续激光器, 也适用于脉冲激光器。

带有参考光束的 F-P 标准具测量系统

F-P 标准具有很高的光谱分辨率, 但自由光谱区很小, 不易得到谱线的绝对位置。为了克服此问题, 通常先用其它手段, 例如用光谱仪测出波长的粗略数值, 而后选用几块厚度不同的标准具逐次测量, 直到满足给定的

收稿日期: 1986年3月18日。

误差为止。尽管这样做整个测量系统是很复杂的,但由于它不仅测连续光,而且也能测脉冲光,因还此是有不少人在发展这种技术^[5,6]。

测量过程是从准标具的基本公式出发:

$$m + e = \frac{2H}{\lambda} + \frac{\phi}{\pi} \quad (1)$$

式中 m 为干涉级数, e 为中心小数, H 为标准具板间的光程, ϕ 为反射相位。公式(1)只能适用于光垂直入射到标准具时的情形。 ϕ 随膜层的种类、波长、时间的改变而改变。但其影响在数学处理上可以等效为光程 H 有个微小的变化,是波长的函数。因此可以把公式(1)改写为

$$m + e = \frac{2H(\lambda)}{\lambda} \quad (2)$$

波长测量过程归结为二次利用上式。首先已知粗略的波长 λ_0 、标准具厚度 $H_1(\lambda)$ 和测出的中心小数 e_1 , 利用(2)式就可得到干涉级数

$$m_1 = \frac{2H_1}{\lambda_0} - e_1 \quad (3)$$

获得了准确的干涉级数整数 m_1 后,再利用(2)式就可得到提高了精度的波长值

$$\lambda_1 = \frac{2H_1}{m_1 + e_1} \quad (4)$$

多块 F-P 标准具能够进行接力测量,不断提高测量精度。接力测量对标准具光学厚度 H 的定标提出很高的要求。如果在 F-P 标准具测量系统中引入波长已知的参考光束,则对测量系统的参数起着—个校准的作用,某些定标的要求可以降低。假设参考光的波长记为 λ_s , 根据(2)式有

$$m_s + e_s = 2H_i(\lambda_s)/\lambda_s \quad (5)$$

如果把被测光 λ_x 和参考光 λ_s 同时射到第 i 块 F-P 标准具上,并分别测出相应的中心小数 e_x^i 和 e_s^i , 则被测光的波长 λ_x 是:

$$\lambda_x = \frac{m_s^i + e_s^i}{m_x^i + e_x^i} \lambda_s \quad (6)$$

式中干涉级数 m_s^i 和 m_x^i 可以从标准具的光

学厚度值 H_i 及借助于公式(3)用类似的办法求出。值得说明的是,用这种方法一定要定准干涉级数 m_s^i 和 m_x^i , 其关键是在(3)式中一定要使用准确的标准具光学厚度。但由于引入了已知参考波长 λ_s , 所以只要标准具的厚度误差满足

$$\Delta H_i < \lambda_s/4 \quad (7)$$

就可以定准参考光的干涉级次 m_s^i , 因而进一步又可得到高精度的 H_i 值

$$H_i = (m_s^i + e_s^i)\lambda_s/2 \quad (8)$$

由此得到的 H_i 的误差主要取决于 e_s^i 的误差,大约可以做到小于 $\lambda_s/100$ 的量级。有了这样高精度的 H_i 值, m_x^i 因而也就不难定准,即可以降低波长测量的误差。由式(6)求出未知波长 λ_x 的测量误差为

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_x = & \frac{m_s^i + e_s^i}{m_x^i + e_x^i} \Delta\lambda_s + \frac{\lambda_x}{\lambda_s} FSR_i \Delta e_s^i \\ & + FSR_i \Delta e_x^i + \frac{\lambda_s}{m_x^i + e_x^i} \Delta m_s^i \\ & - \frac{\lambda_x}{m_x^i + e_x^i} \Delta m_x^i \end{aligned} \quad (9)$$

在 m_s^i 和 m_x^i 都定准时,误差由前三项决定。第一项是由参考光束的波长精度所决定,一般 He-Ne 激光器的 $\Delta\lambda_s$ 最大值约为 0.001 nm, 如采用稳频 He-Ne 激光器该项误差可进一步减小。所以(9)式的误差就主要由中心小数的测量误差 Δe 所决定

$$\Delta\lambda_x \approx \sqrt{2} FSR_i \cdot \Delta e \quad (10)$$

式中 FSR_i 为所使用标准具的自由光谱区。

得到公式(6)是有条件的,即假设了对波长 λ_x 和 λ_s 都有相同的等效光学厚度。当 F-P 标准具的反射镜用多层高反射介质膜层时,由于膜层有较大的反射相位色散,如果 λ_s 和 λ_x 相差较大时,则对应于这两个波长的反射相位不一致,因而等效光学厚度就不相等了,这时如果仍用(6)式计算波长就会引入误差。镀银反射镜的反射相位基本不随波长改变而变化,因此可在宽的波长范围内使用。

实验和结果

实验装置如图 1 所示。我们只用了一块适当厚度的标准具和一套电荷耦合器件(以下简称 CCD)接收元件,目的是摸索在单级测试中可能碰到的问题及所能达到的精度。用一般的 He-Ne 激光器作参考光源。

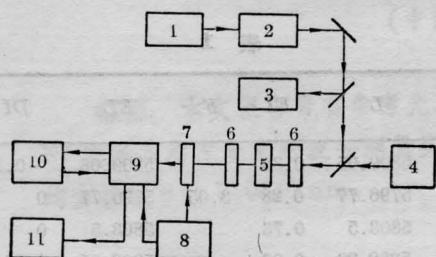


图 1 波长测量实验系统装置

- 1—氦离子激光器；2—可调谐染料激光器；
3—JBY-1 型波长计；4—He-Ne 激光器；
5—F-P 标准具；6—透镜组；7—CCD 探
测头；8—驱动电源；9—接口；10—计算
机；11—显示器。

由于干涉环的位置只取决于标准具的法线和聚焦透镜的位置,而被测光和 He-Ne 光只起照明作用,只要发散角足够大,被测光和 He-Ne 光的光轴稍有漂移关系不大。因此对参考光束和被测光束的共轴并无严格要求。仔细调整会聚透镜,使 CCD 列阵元件处于焦平面上,并且使阵列处于干涉环的直径位置上。使用的 CCD 总共有 150 个光敏元,总长为 4.5 mm,每个光敏元尺寸为 $25\mu\text{m}$ 见方,间隔为 $5\mu\text{m}$ 排成一列。每个光敏元上的光强信号输出后经 Δ/D 变换,送入计算机存储起来等待作进一步的处理。

计算机的数据处理包括如下的步骤和内容:

(1) 根据采集到的 CCD 光强分布曲线,自动找出各干涉环峰值的位置;

(2) 由于 CCD 元件的有限大小,对干涉环光强分布曲线的采样是在光敏元范围内的积分采样,其峰值定位精度不高。为了提高

峰值定位精度,计算机根据干涉环的光强分布线型函数拟合采集到的各峰值数据,这样可把峰值定位精度提高至 $2\mu\text{m}$;

(3) 由测出的峰位置计算出干涉环的直径;

(4) 由 4~5 个干涉环的直径,用最小二乘法求出中心小数;

(5) 根据参考光束中心小数的变化对被测波长的中心小数作相应的修正;

(6) 用剩余小数法或拟合的办法求出标准具的等效光学厚度及反射相位;

(7) 根据前述各公式处理数据,得出被测波长的准确值;

(8) 其它辅助程序。包括 CCD 光学多通道数据采集系统性能的校验、干涉环直径自动寻找、CCD 干涉图形分布曲线的暂贮、磁盘或磁带的存贮、波形或数据的重放等等。

我们先进行了旨在校验系统测量精度的实验。实验数据表明,若列阵元件不处于干涉环的直径上,则会给中心小数的测量带来较大的误差,一般测出的 e_r 值偏小。在示波器上直接观察 CCD 列阵的输出信号,手动调节 F-P 标准具的俯仰角,使各峰值间的距离最大。多次重复的结果表明: e_r 值的变化范围小于 2%。如果进一步用计算机的程序来判断是否得到最大的干涉环直径,可望精度可进一步提高。

此外,CCD 元件偏离焦距透镜的焦平面也会引起对 e 的测量误差。当使用 $f=7\text{cm}$ 的聚焦透镜时,在焦面前后移动 CCD 元件 5 mm, e 值的变化小于 2%。可见在系统调整时,对调焦的要求并不十分苛刻。

实验中温度变化引起 e_r 的漂移在 0.04~0.15 之间,这是由于室温的变化引起标准具光学厚度的改变所致,而不是 CCD 列阵元件的热膨胀所产生的。图 2 为石英实心标准具的中心小数随温度变化的情况,所得到的斜率与考虑到石英的热胀效应及折射率的热效应计算出来的数据完全一致。这也间接地

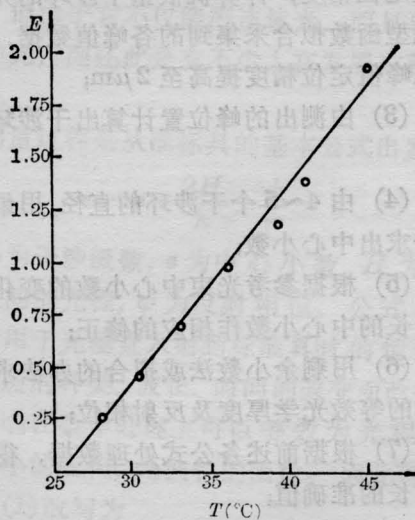


图2 石英板 F-P 标准具中心小数随温度的变化

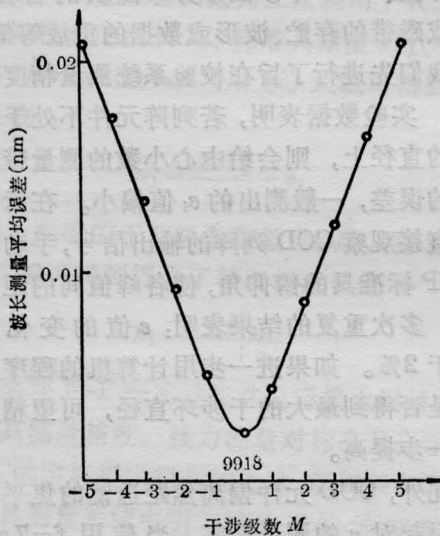


图3 波长测量平均误差与干涉级数的关系

检验了中心小数测量的可靠性。目前装置中还没有恒温装置,因此定时地插入参考波长的采样,通过 e_s 的变化监视温度的变化,进一步可根据 e_s 的变化对数据作出温度修正。

在以上实验的基础上,作了 F-P 标准具波长测量精度的校对实验。用一台 JBY-1 型波长计(精度为 1.7×10^{-6} , 基于迈克尔逊干涉仪原理)作为波长对比的基准。环形染料激光器输出的激光谱线宽度小于 10^{-4}nm ,

因而可以忽略线宽对波长测量的影响。每改变一次波长,用 F-P 系统测量其干涉图形,得到中心小数,同时用波长计测出相应的波长。共测量了 40 组数据,其中 32 组为不同的待测波长及对应的中心小数,其余 8 组为参考光束的数据。表 1 为镀银空气隙标准具测量的数据和结果, L 为波长, EI 为中心小数,它们就是进一步处理的基础。

表 1

No.	L	EI	F	EL	DI
1	5809.05	0.38		5809.06	-0.1
2	5796.77	0.28	3.05	5796.77	0
3	5803.5	0.73		5803.5	0
4	5802.28	0.06		5802.25	0.03
5	5771.74	0.21		5771.76	-0.02
6	5769.91	0.67	2.97	5769.92	-0.01
7	5770.52	0.51		5770.54	-0.02
8	5777.82	0.79		5777.82	0
9	5833.81	0.53		5833.82	-0.01
10	5826.98	0.12	3.01	5827	-0.02
11	5828.22	0.88		5828.21	0.01
12	5839.42	0.2		5839.42	0
13	5846.29	0.56		5846.3	-0.01
14	5852.55	0.13	3.06	5852.53	0.02
15	5853.17	0.98		5853.16	0.01
16	5851.92	0.21		5851.94	-0.02
17	5883.35	0.96		5883.35	0
18	5885.25	0.5	3.09	5885.26	-0.01
19	5897.93	0.59		5897.93	0
20	5890.95	0.24		5890.92	0.03
21	5922.16	0.07		5922.14	0.02
22	5924.08	0.6	3.19	5924.08	0
23	5936.27	0.87		5936.26	0.01
24	5930.5	0.14		5930.5	0
25	5975.13	0.14		5975.1	0.03
26	5976.44	0.79	3.3	5976.44	0
27	5963.43	0.72		5963.41	0.02
28	5969.29	0.35		5969.3	-0.01
29	6001.99	0.11		6001.97	0.02
30	6009.23	0.45	3.14	6009.25	-0.02
31	6010.56	0.12		6010.59	-0.03
32	6000.69	0.24		6000.75	-0.06

数据处理中关键的一步是用剩余小数法求出标准具相对于参考 He-Ne 光束的干涉级数,其原理简述如下。设真正的干涉级数为 m_s , 用测量仪器得出的干涉级数为 m'_s , 误差为 x , 则有 $m_s = m'_s + x$, 从(1)式不难推导出

$$m_x + e_x - \frac{\phi_x}{\pi} = \left(m'_s + e_s - \frac{\phi_s}{\pi} + x \right) \frac{\lambda_s}{\lambda_x} \quad (11)$$

式中的 e_x 和 e_s 是对应于波长 λ_x 和 λ_s , 由实验测出的中心小数。对于一个给定的 λ_x , 改变 x 的值, 总可以找到一个或几个 x 值使上式中左右二端的小数部份相等, 再利用至少三个不同的波长 λ_x 就可定出唯一的 x 值, 因而也就求得真正的干涉级数 m_s 。从上述数据中求出的 $x = 23$, $m_s = 9918$, 因而求出标准具的等效光程为 3.13816 mm , 其误差由 $\Delta\lambda_s$ 和 Δe_s 决定。实验中 $\Delta\lambda_s \approx 0.001 \text{ nm}$, $\Delta e_s \approx 0.02$, 所以 ΔH 的相对误差为 2.5×10^{-6} 。在此基础上, 从(11)式出发, 利用类似剩余小数的方法改变 ϕ_x 可以拟合出对应不同波长的反射相位 ϕ 。

利用公式(6)和上述高精度求出的标准具厚度就可以求得待测波长的准确数值, 见表1中的 EL 栏。32个不同波长测量误差的均方根值为 0.0019 nm , 相对误差为 3.3×10^{-6} 。使用不同的 F-P 厚度值, 即不

同的干涉级数值计算 32 个不同波长测量的误差, 其结果见图 3, 从图中可见只有干涉级数 M 取 9918 时有最小的波长测量误差, 这与用剩余小数法得到的干涉级数是一致的。此结果从另一个角度验证了剩余小数法处理数据是可行的。

3mm 空气隙标准具的自由光谱区为 0.06 nm , 根据上述数据, 其单级增益因子 K 为 14。实验中还使用了镀宽带多层全反介质的标准具, 但用剩余小数法处理数据时, 得不出唯一的干涉级数。这是由于反射相位色散的影响, 这时使波长的测量变得复杂, 要引入更多的校正手段才能完成。

实验中得到了王常生和周善玉同志的帮助, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] J. P. Monchalin *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, No. 5, 736.
- [2] S. J. Bennett, P. Gill; *J. Phys. Sci. Instr.*, 1980, **13**, 174.
- [3] P. Juncar, J. Pinard; *Rev. Sci. Instr.*, 1982, **53**, 939.
- [4] L. S. Lee, A. L. Schawlow; *Opt. Lett.*, 1981, **6**, No. 12, 610.
- [5] N. Konish *et al.*; *Appl. Phys.*, 1981, **A25**, 311.
- [6] A. Fischer *et al.*; *Opt. Commun.*, 1981, **39**, 277.
- [7] Max. Born, Emil. Wolf; "Principles of Optics", Second Edition, Pergamon Pree, Oxford 1964, p. 339.

激光参数测试仪器联合鉴定会在重庆召开

1986年12月24至27日, 国家科委新技术局委托重庆市科委和中国计量科学研究院在重庆召开“激光参数测试仪器”鉴定会。鉴定的主要项目有4项, 它们是: 中国计量科学研究院研制的“高灵敏、宽波段激光功率计”; 中国科学院上海光机所研制的“JK-80 大口径激光能量计”; 中国科学院物理所研制的“LE-2A 型双通道、高灵敏、宽波段激光能量计”; 重庆光学机械研究所研制的 LER-1 型高灵敏、宽波段激光能量计”。这些测试仪器都是国家科委下达的“六五”科技攻关项目, 经过几年的研究试制,

都已全部完成任务, 各项性能达到了国家科委下达的任务书中所规定的指标。专家们认为, 这些测试仪器的性能良好, 测试功能多, 测量范围宽, 在结构设计和工艺处理等方面还有一定的独创性。

全国各地 55 所高校、研究所、工厂的专家教授 90 余人参加了这次鉴定会。重庆市科委副主任杨东桥、国家科委新技术局赵润乔也出席了会议。

(群 荏)