

# 镀银标准具厚度和反射相位的精密测定

吴瑞昆 方子书

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文报道一种测量标准具间距的方法,其误差为 $\lambda/60$ 。用波长连续可调的染料激光器的输出射到标准具上,借助于频率探测元件和计算机组成的OMA系统可从干涉图形中精确测定对应波长的中心小数,在此基础上发展了剩余小数处理数据的方法,利用至少四个不同的波长可得到干涉级数的绝对值和标准具的厚度。进一步用数据拟合法可得到镀层反射相位的相对色散曲线。

## 一、引 言

F-P标准具是干涉测量中常用的基本元件之一。因为它具有高的光谱分辨率,常用来进行光谱的精细结构和线宽的测量。这些大多属于相对测量,当使用F-P标准具作某些量的绝对测量时,就须要精确地知道标准具的厚度。例如在激光波长测量中,要想知道波长的绝对值,就必须知道干涉级的整数和小数部份,因而对标准具的厚度定标提出了很高的要求。此外在激光波长的测量中,对F-P标准具反射膜层的相位特性也提出了很高的要求,剩余小数法是干涉计量中常用的一种较古老的方法<sup>[1]</sup>,在此基础上作了进一步的发展,使得不但能测量标准具的精确厚度,而且也能得出相应的反射相位色散曲线。

## 二、测量原理和装置

我们从F-P标准具的基本公式出发,

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

该公式表示波长为 $\lambda$ 的光垂直入射到厚度为 $h$ 的标准具上, $m$ 为其对应干涉图形干涉级的整数部份, $e$ 为干涉级的小数部份,又称为中心小数。 $\phi$ 为高反射膜层的反射相位。如果有标准的参考光束 $\lambda_0$ 和其它波长可精确调谐的光束 $\lambda_1$ 同时入射到F-P标准具上,则不难推出下列关系:

$$m_1 + e_1 - \frac{\phi_1}{\pi} = \left( m_0 + e_0 - \frac{\phi_0}{\pi} \right) \frac{\lambda_0}{\lambda_1}, \quad (2)$$

该公式反映了两种波长的干涉级数、中心小数以及反射相位之间的联系。

当我们用一般的手段测量F-P标准具的厚度 $h$ 或测量其等效光程厚度 $nh$ 时都达不到波长量级的精度,因此在确定其干涉级数时总会引入一定的误差。假设某一标准具对于参

考标准波长  $\lambda_s$  所对应的真正干涉级数的整数为  $m_s$ , 而我们通过测量厚度所得到的干涉级数为  $m'_s$ , 误差为  $\alpha$  则有

$$m_s = m'_s + \alpha. \quad (3)$$

如果我们能精确定出  $\alpha$  的数值, 那么也就是等于精确地测准了干涉级的整数部份, 对于近似的干涉级数  $m'_s$  也可得到类似(2)式的公式

$$m'_i + e'_i - \frac{\phi_i}{\pi} = \left( m'_s + e_s - \frac{\phi_s}{\pi} \right) \frac{\lambda_s}{\lambda_i}, \quad (4)$$

式中的  $m'_i$ 、 $e'_i$  和  $m'_s$  表示由于标准具的厚度测量有误差时所计算出的干涉级数和中心小数。利用(3)、(4)式从(2)式做进一步的推导得到

$$m_i + e_i - \frac{\phi_i}{\pi} = \left( m'_s + e_s - \frac{\phi_s}{\pi} + \alpha \right) \frac{\lambda_s}{\lambda_i} = m'_i + e'_i - \frac{\phi_i}{\pi} + \alpha \frac{\lambda_s}{\lambda_i}, \quad (5)$$

式中的  $e_i$  是实验可以测量出来的中心小数, 而  $e'_i$  则可以由(4)式计算出来, (5)式的右端  $\alpha \frac{\lambda_s}{\lambda_i}$  对小数部份也有贡献, 对于某一波长  $\lambda_i$ , 利用使(5)式两端小数部份相等, 可以求出若干个  $\alpha$  的值, 利用几条波长相近但数值不同的光束就能定出一个唯一的  $\alpha$ , 这样 F-P 标准具的精确厚度便可求出

$$nh = \frac{1}{2} \left( m'_s + \alpha + e_s - \frac{\phi_s}{\pi} \right) \lambda_{s0}. \quad (6)$$

在已准确求出干涉级数的基础上, 可以进一步求出反射相位随波长的变化。一般高反膜层反射相位随波长变化不会十分剧烈, 因此在几十  $\text{\AA}$  的范围内可认为基本恒定, 如果在此范围内选择了几个不同的波长并测出了相对应的中心小数, 对这些波长来说(2)式中的  $\phi_i$  都应取相同的数值, 而  $m_i$ 、 $e_i$ 、 $m_s$ 、 $e_s$  都是已知的值。因此可以连续改变  $\phi_i$  的值, 在  $\phi_i = \pi$  附近找寻能够使等式二端的小数部份的差对几个波长都保持最小的  $\phi_i$  值, 此  $\phi_i$  值即是在此波长的反射相位。由于(2)式中还有相位  $\phi_s$  是未知的, 我们根据银的反射相位一般为  $\pi$ , 假定  $\phi_s = \pi$ , 这样求出来的反射相位随波长变化的曲线是相对的, 是以  $\phi_s = \pi$  归一化的。

### 三、实验和数据处理

实验装置见图1, 染料激光器输出波长可变的激光, 其值由波长计测准, 精度为  $2 \times 10^{-6}$ , 其输出波长用  $\lambda_i$  表示。He-Ne 激光输出的波长作为参考标准波长记为  $\lambda_s$ 。上述输出光束都能分别经适当光学系统射到 F-P 标准具上, 并由列阵元件来探测其干涉图形, 从而精确测定出对应波长的中心小数  $e_i$ , 这些过程都在计算机内由事先编制好的程序来处理, 中心小数的测量是整个测量的基础, 其数值可由下式得出<sup>[2]</sup>:  $e = [(q-1)D_p^2 - (p-1)D_q^2] / (D_q^2 - D_p^2)$ 。式中  $D_p$  和  $D_q$  分别为第  $p$  和  $q$  个干涉环的直径。从公式上看, 中心小数的测量误差只受干涉环直径测量误差的影响, 在我们研制的测量系统中, 列阵探测元件和计算机组成了光学多通道测量系统, 列阵元件采集到的干涉环原始数据经计算机根据干涉环的线型函数拟合处理后, 干涉环的直径测量误差为 2 微米, 这大约是千分之一的相对误差。因此  $e$  的测量误差就主要来自实验中的一些因素: 如列阵元件对准干涉环直径位置的对准误差; 调焦误

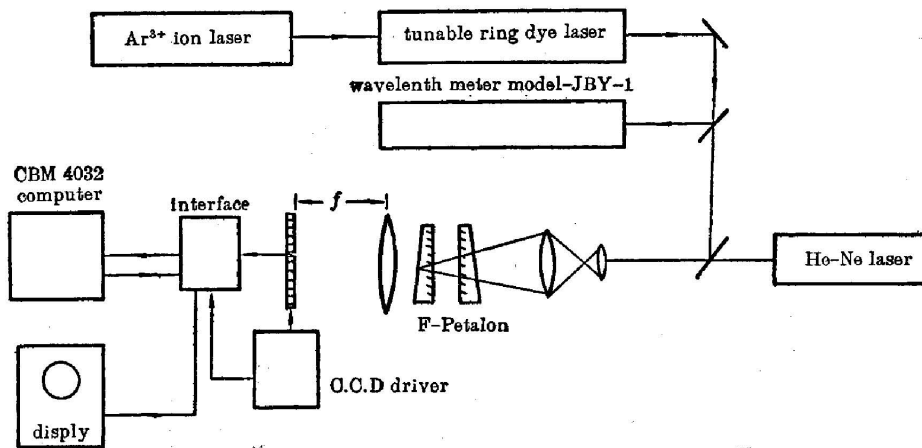


Fig. 1 Experimental setup for wavelenth measurements

差。经多次重复对准和测量,  $e$  的变化小于 2% 左右, 因此认为中心小数的测量精度在 0.01~0.03。有关精度的详细分析和实验数据另行发表在文献[2]中。

表 1 中的  $L$  和  $BI$  二项就分别给出了测量波长和相应的中心小数。利用这些基本数据和上述的剩余小数法编制相应的处理程序, 得出的结果如表 2 所示。例如把  $\lambda_0 = 6009.23$  代入(5)式, 当  $\alpha = -15, 4, 23, 42$  等四个值时都可使(5)式二端的小数部份相等, 对不同波长来说这些  $\alpha$  值是不一样的。最后从这四组数据中唯一定出了  $\alpha = 23$ 。实验中用的是空气隙镀银反射镜的标准具, 细度为 20 左右, 空气隙间距的标称值为 3.13 mm, 考虑到空气折射率的修正, 求出粗略的干涉级数  $m'_s = 2 \times 1.0003 \times 3.13 / 6.32817 \times 10^{-4} = 9885$  (见表 3)。因而真正的干涉级数为  $m_s = m'_s + \alpha = 9918$ 。所以 F-P 标准具的等效光程  $nh$  根据(6)式为 3.13816 mm。

在以上数据的基础上又编制了根据(2)式拟合出反射相位的程序。为了求得相位, 在取数据时已有意识把每 4 个波长算为一组, 使其分布在  $20 \text{ \AA}$  以内, 在这个范围内认为有相同的  $\phi_i$ 。所得到的结果见表 1 中的  $F$  项和  $O$  项,  $F$  列表示由每一组四个波长拟合出的反射相位,  $O$  列表示拟合时对四个波长的剩余误差的总和。从得到的数据来看大部份剩余误差都在中心小数测量误差的范围内, 这说明数据是可靠的。

关于上述求出干涉级数和相位的准确性在进一步波长的测量中也间接地得到了证实。如果改变在进一步波长测量中所使用的干涉级数, 则波长测量的误差就会有变化。表 3 给出了此误差与所使用干涉级数的关系, 从表中可看出只有使用上述剩余小数法求出的干涉级数 9918 时, 才能得到最小的波长误差。

表 1 中的  $DI$  和  $DI1$  为进一步波长测量中所得到的波长测量误差。 $DI$  对应于所有的相位  $\phi_i$  都取  $\pi$  时的波长误差, 这时从 32 个波长测量的误差分布来看, 不只是 随机分布的成份, 在波长短时误差全都为正, 而波长长时全部为负。这说明存在着系统误差, 但是如果在计算波长时, 所有的  $\phi_i$  用拟合出来的数值代入, 得到的波长误差数据为  $DI1$  列所示, 这时的数据表明系统误差已消除, 只剩下了随机误差。这些事实都说明了所得到的干涉级数和相位色散是可靠的。

最后对上述得出的标准具厚度的误差作一简单分析。由(6)式不难得到

Table 1 Data and results

No	$L$	$EI$	$F$	$C$	$DI$	$DI1$
1	5809.05	.38			+.02	-0.01
2	5796.77	.28	3.045	.075	+.02	0
3	5803.50	.73			+.02	0
4	5802.28	.06			-.01	0.03
5	5771.74	.21			+.04	-0.01
6	5769.91	.67	2.97	.046	+.03	0
7	5770.52	.51			+.03	0
8	5777.82	.79			+.02	+0.01
9	5883.81	.53			+.03	0
10	5826.98	.12	3.01	.060	+.03	-0.01
11	5839.42	.88			+.01	+0.02
12	5828.22	.20			+.02	0
13	5846.29	.56			+.03	-0.01
14	5852.55	.13	3.06	.109	.00	+0.02
15	5853.17	.18			+.01	+0.01
16	5851.92	.21			+.03	-0.02
17	5883.35	.96			+.01	0
18	5885.25	.50	3.09	.066	+.02	-0.01
19	5897.93	.59			0	0
20	5890.95	.24			-.02	+0.02
21	5922.16	.07			-.01	0
22	5924.08	.60	3.19	.0375	0	-0.02
23	5936.27	.87			-.01	0
24	5930.50	.14			-.01	0
25	5975.13	.14			-.04	+0.01
26	5976.44	.79	3.30	.076	-.02	-0.01
27	5963.43	.72			-.04	+0.01
28	5969.29	.35			-.01	-0.01
29	6001.99	.11			-.05	+0.04
30	6009.23	.45	3.14	.14	-.01	+0.01
31	6010.56	.12			.00	0
32	6000.69	.24			+.03	-0.03

Table 2 Data for method of excess fractions

$\lambda$	$E$	possible value for $x$	final value for $x$
$\lambda_s = 6328.17$	0.08		
$\lambda_s$ 6009.23	0.47	-15, 23, 4, 42	$x=23$
5930.50	0.16	23, 38	
5846.29	0.56	-50, 23, 35, 47	
5769.91	0.67	23	

Table 3 The error changes of wavelength measurement with interference order

interference order MS	RMS error for wavelength measurement
9913	0.210
9914	0.169
9915	0.126
9916	0.087
9917	0.045
9918	0.019
9919	0.047
9920	0.087
9921	0.129
9922	0.172
9923	0.212

$$\frac{\Delta(nh)}{nh} = \frac{\Delta\lambda_s}{\lambda_s} + \frac{\Delta e_s}{\left(m_s + e_s - \frac{\phi_s}{\pi}\right)} + \frac{\Delta\left(\frac{\phi_s}{\pi}\right)}{\left(m_s + e_s - \frac{\phi_s}{\pi}\right)},$$

目前由于使用一般的 He-Ne 激光器  $\Delta\lambda_s \approx 0.01\text{\AA}$ ,  $\Delta\lambda_s/\lambda_s \approx 1.5 \times 10^{-6}$  F-P 标准具的厚度为 3 mm 左右  $m_s \approx 10^4$ , 而  $\Delta e_s \approx 0.02$ , 所以第二项的误差约为  $2 \times 10^{-6}$ , 得三项的误差约同第二项, 因此总的均方根误差约为  $3 \times 10^{-6}$ 。

#### 四、结 束 语

发展了剩余小数法, 使之能至少用四个准确的激光波长精确测出标准具的干涉级数, 再借助于从干涉图形中精密测出的中心小数值, 就能得到 F-P 标准具的精确厚度或等效光程, 得到的结果为  $(3.13816 \pm 0.00001)\text{mm}$ , 相对误差为  $3 \times 10^{-6}$ 。在此基础上进一步用数据拟合法, 得出了相对的相位色散曲线。利用这些基本数据可在进一步的波长测量实验中得到较好的结果。

本实验中五室提供了染料激光器和波长计, 实验中还得到了王常生和周善玉的帮助, 在此表示感谢。

#### 参 考 文 献

- [1] M. 玻恩, E. 沃耳夫; 《光学原理》, 上册(科学出版社, 北京, 1978年), 379, 441。  
 [2] 吴瑞昆; 《中国激光》, 即将发表。

## The measurement of cavity spacing for Fabry-Perot interferometers with high accuracy

WU RUIKUN AND FANG ZIWEI

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

(Received 18 March 1986; revised 26 May 1986)

### Abstract

We report in this paper a method of measuring the cavity spacing of a Fabry-Perot interferometer with error less than several tenth of wavelength. First the central fractional order was obtained from interference pattern by a OMA system, which consists of a diode array and a microcomputer, for 32 different wavelengths and He-Ne 6328 Å line. Then by using the method of excess fractions to process data, the absolute interference order and cavity spacing of F-P interferometer was worked out from the data corresponding at least to 4 different wavelengths. Further more, the relative reflection phase dispersion curve for silver mirror was obtained by using the data fitting method.