

# 影响 Fizeau 波长计精度因素的分析

张哨峰 梁培辉

(中国科学院上海光机所, 上海 201800)

**提要:** 本文分析了影响 Fizeau 波长计测量精度的几种因素, 给出了对测量环境温度、电磁干扰以及光束模式应控制的范围。

**关键词:** 激光波长计, Fizeau 干涉仪

## Analysis of factors affecting the measurement accuracy of Fizeau wavemeter

Zhang Shaofeng, Liang Peihui

(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica, Shanghai 201800)

**Abstract:** In this paper we analyzed several factors affective the measurement accuracy of Fizeau wavemeter, and derived the limits which must be controlled for the surrounding temperature, electro-magnetic disturbance beam mode and mechanic thermo-stability.

**Key words:** laser wavemeter, Fizeau interferometer

Fizeau 波长计作为连续、脉冲激光通用的波长计, 不仅结构简单而且可实时测量。Snyder 在 1978 年首次介绍了用 Fizeau 干涉仪测量波长的方法<sup>[1,2]</sup>, 此后 Fizeau 波长计不断得到完善。文献[2]报道了对波长计的底板及干涉仪腔体进行温控, 其中, 底板控温在  $28.0 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , 干涉仪腔体控制在  $29.73 \pm 0.05^\circ\text{C}$ , 获得了对连续光的测量精度为  $2 \times 10^{-7}$ , 脉冲光的测量精度为  $1 \times 10^{-6}$ 。为了减少影响波长测量精度的因素, L. Gardner 设计了一种紧密型的 Fizeau 波长计<sup>[3]</sup>, Reiser 等采用实心 Fizeau 楔<sup>[4]</sup>, 以及 W. Kedrierki 使用单模光纤耦合输入光束<sup>[5]</sup>。所有这些措施都是为了克服环境温度变化对波长测量的影响, 改善入射光束质量, 以及减小机械部件的不稳定。本文对我们在研制实用的 Fizeau 波长计的过程中遇到的影响测量精度的各因素加以分析, 改进测量装置, 获得了较好的测量精度。

### 一、波长测量方法及测量精度

Fizeau 波长计是通过测量 Fizeau 干涉仪的干涉条纹的宽度及初位相来获得激光波长数据的。图 1 所示为空气楔的 Fizeau 干涉仪的结构。

入射光进入干涉仪后分成两束, 两束光的位相差为

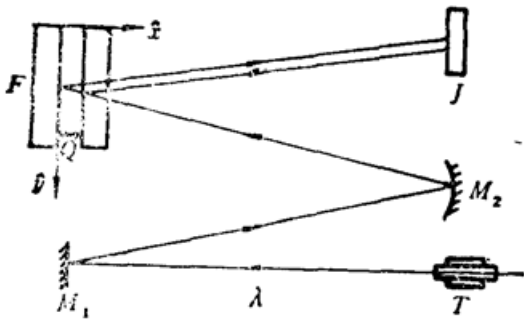


Fig. 1 Fizeau wavemeter arrangement

- T*—output top of optical fibre;  
*M*<sub>1</sub>—mirror,  
*M*<sub>2</sub>—paraboloidal mirror;  
*F*—Fizeau interferometer;  
*J*—photodiode array and its trestle

$$PS = \frac{2\pi}{\lambda} (2x_0 + 2y \operatorname{tg} \theta) + \phi \quad (1)$$

$\phi$  是反射位相跳变, 一般取  $\phi = \pi$ 。干涉条纹的强度分布则为

$$I(y) = I_1 \sin^2 \left( \frac{2\pi x_0}{\lambda} + \frac{2\pi y \operatorname{tg} \theta}{\lambda} \right) + I_0 \quad (2)$$

由(2)式可知干涉条纹的周期

$$FP = \lambda / 2 \operatorname{tg} \theta = \lambda / \text{SCALE} \quad (3)$$

干涉条纹用光电二极管阵列接收, 该接收器件有 1024 个像元, 两像元的间距为  $25 \mu\text{m}$ 。设在光电二极管阵列上看到的第一个极小值所对应的级次为  $N$ , 则在干涉仪上对应点的光程差为

$$L = N \cdot \lambda \quad (4)$$

若  $x_0$  为阵列零像元位置所对应的 Fizeau 楔的位置的厚度,  $PH$  为零像元距第一个极小值间的距离, 则有

$$L = 2x_0 + PH \cdot 2 \operatorname{tg} \theta \quad (5)$$

在实际测量中, 由干涉条纹的周期  $FP$  定出近似的波长数据而确定干涉级次  $N$ , 再由干涉条纹的初位相  $PH$ , 根据(4), (5)式就可得到被测波长  $\lambda$  的数值

$$\lambda = (2x_0 + PH \cdot \text{SCALE}) / N \quad (5')$$

从(4)式可知, 在  $L \sim 2 \text{mm}$ ,  $\lambda \sim 600 \text{nm}$  时,  $N \sim 3300$ , 周期  $FP$  的测量误差需小于  $1.5 \times 10^{-4}$ , 才能准确确定干涉级次  $N$ 。而由(5')式知道, 位相  $PH$  的测量精度要满足  $\Delta PH / FP < 3 \times 10^{-3}$ , 才能获得  $1 \times 10^{-6}$  的波长测量精度。

## 二、影响波长测量精度的因素

### 2.1 干涉仪腔体温度

由于温度的变化, 空气的折射率及 Fizeau 干涉仪内的石英玻璃隔圈长度也相应地产生变化, 即(5)式所表示的光程差是随温度  $T$  变化的,

$$L(T) = L_0(T) + PH \cdot \text{SCALE} \quad (6)$$

其中  $L_0 = 2x_0$ 。考虑温度变化很小, 光电二极管阵列上观察到的第一个极小值的干涉级次  $N$  不变, 由(4-6)式得  $\Delta \lambda = \Delta L / N$

$$\Delta L = \Delta L_0 + \Delta PH \cdot \text{SCALE}$$

其中  $\Delta L_0 = \alpha \Delta T \cdot L_0$ ,  $\alpha$  是石英的热胀系数。有

$$\Delta PH = \frac{\Delta(nL_0)}{\text{SCALE}} = \frac{(\Delta n)L_0 + n\alpha \Delta T L_0}{\text{SCALE}}$$

$$\Delta \lambda = \Delta L / N = \frac{(1+n)\alpha \Delta T + \Delta n}{N} L_0 \approx [(1+n)\alpha \Delta T + \Delta n] \lambda$$

空气的折射率  $n$  与温度、波长的关系由文献[6]给出。

图 2 为温度变化与测量精度的关系。从图中可以看出温度变化在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  范围内, 对测量

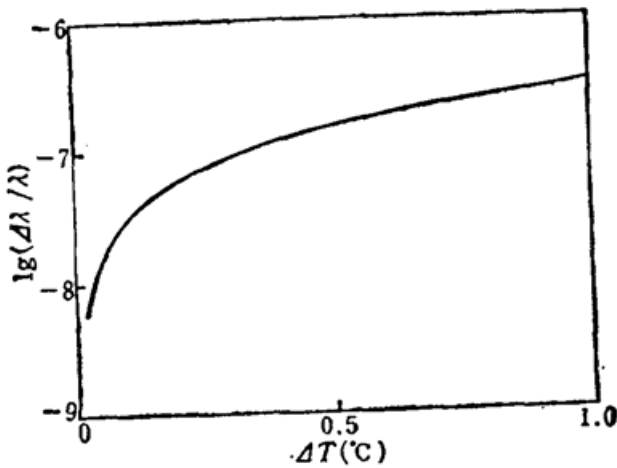


Fig. 2 Dependence of measurement accuracy on the temperature at the interferometer

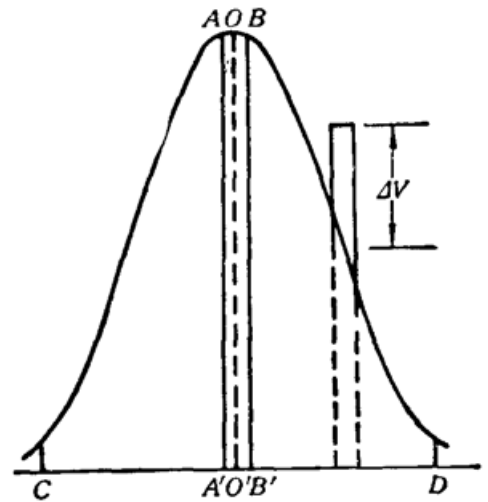


Fig. 3 Illustration of filtering

精度的影响小于  $2 \times 10^{-7}$ 。

### 2.2 电干扰的影响

脉冲激光器在其放电时会产生很强的电磁干扰, 从而影响测量数据的准确性, 使得 Fizeau 波长计在测量脉冲激光时的精度比连续光的测量精度要低。设脉冲激光器的重复率为  $f$ , 放电时间很短, 放电产生的电磁干扰仅对光电二极管列阵的一个像元信号的幅度产生影响, 图 3 中, 电磁干扰使某一个像元的光电信号的幅度上升了  $\Delta V$ 。由于电磁干扰的影响, 干涉条纹数据处理中采用的滤波方法<sup>[1,7]</sup>, 所得到的干涉条纹极值点位置会产生偏差。图 3 中,  $A$ 、 $B$  为数据采样点, 波形中心点  $O$  距  $A$  点的距离  $AO$  以探测器的像元数表示为

$$AO = \frac{LS}{LS - ID}$$

其中

$$LS = S_{AA'C} - S_{AA'D}$$

$$ID = S_{BB'C} - S_{BB'D}$$

$S$  表示面积。由于干扰使信号畸变,  $S_{AA'D}$ ,  $S_{BB'D}$ ,  $LS$ ,  $ID$  分别变为

$$S'_{AA'D} = S_{AA'D} + \Delta V \cdot 1$$

$$S'_{BB'D} = S_{BB'D} + \Delta V \times 1$$

$$LS' = LS - \Delta V, \quad ID' = ID - \Delta V$$

从而

$$\Delta AO = \frac{\Delta V}{LS - ID}$$

显然

$$LS - ID = -2S_{AA'B'B}, \quad (LS - ID)_{\max} = -2V_0,$$

$V_0$  为光电信号的最大输出。设  $\Delta V = \eta V_0$ , 故

$$(\Delta AO)_{\min} = \eta/2 \tag{7}$$

设光电二极管列阵的扫描周期为  $t$ , 则有  $t \cdot f$  个像元受到电磁脉冲的干扰, 它们均匀地分布在光电器件的 1024 个像元中。若干涉条纹的周期为  $FP$  个像元, 那么光电接收器共接收到  $1024/FP$  根干涉条纹, 如果  $t \cdot f < 1024/FP$ , 则有  $tf$  根条纹的光电信号受到干扰, 如  $t \cdot f \geq 1024/FP$ , 则有  $1024/FP$  根条纹都受到干扰。这些受干扰的条纹的峰值位置经过数字处理就会产生偏移。我们在处理数据时对所有条纹的峰值作最小二乘法线性拟合<sup>[8]</sup>:

$$y = FP \cdot x + PH$$

$y$  为列阵单元坐标,  $x$  为干涉级次。电干扰引起的偏差

$$\Delta PH = \frac{\left(\sum_{i=1}^M x_i\right) \cdot \sum_{i=1}^M x_i \Delta y_i - \left(\sum_{i=1}^M x_i^2\right) \cdot \sum_{i=1}^M \Delta y_i}{\left(\sum_{i=1}^M x_i\right)^2 - M \sum_{i=1}^M x_i^2} \quad (8)$$

其中  $M = 1024/FP$ ,  $x_i = i$

$$\Delta y_i = \begin{cases} \eta/2 & i=1, 1+m, 1+2m, \dots \\ 0 & i=\text{其它} \end{cases}$$

$$m = (1024/FP)/(t \cdot f)$$

由(4)、(5)式有

$$\Delta \lambda / \lambda = \frac{\Delta PH \cdot \text{SCALE}}{L_0} \quad (9)$$

由(7)~(9)三式可计算出测量精度随电干扰幅度变化的关系,图4显示了在脉冲激光器的重复  $f = 6 \text{ kHz}$ , 率光电二极管列阵的扫描周期  $t = 5.7 \text{ ms}$  时测量精度  $\Delta \lambda / \lambda$  随电磁干扰系数  $\eta$  变化的关系。

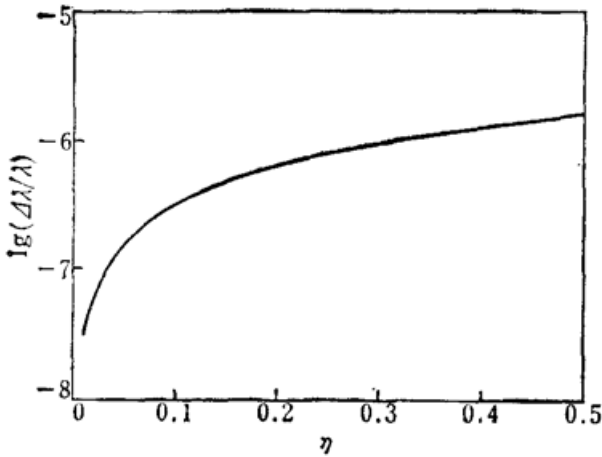


Fig. 4 Dependence of measurement accuracy on the electromagnetic disturbance

### 2.3 入射光束质量的影响

Fizeau 干涉仪对入射光波面的质量要求很严格<sup>[9]</sup>, 要求入射光为  $TEM_{00}$  模的 Gauss 光束。为此采用了单模光纤耦合的方法, 使能保证获得  $TEM_{00}$  模的光束, 但单模光纤在短于其截止波长的区域会有  $TEM_{01}$  模产生, 这样光纤出射光束就是一个多模光束了, 波长测量就会存在误差。

我们知道, 弱导光纤内的  $LP$  模的场几乎没有纵向分量, 即这种光导波与 TEM 波相差不远<sup>[8]</sup>, 对于  $TEM_{pl}$  模, 其远场发散角  $\theta_0$  的近似值<sup>[9]</sup>

$$\theta_0 \approx \frac{\lambda_0}{\pi W_0} \sqrt{2p+l+1/2} \quad (10)$$

$W_0$  为光斑半径。不同模所产生的干涉条纹图样不同, 因此多模入射光就会对测量产生误差, 产生干涉条纹图样不同主要在于不同模的发散角不一样。Fizeau 干涉仪干涉条纹周期由于波面不完全为平面波波面而有一个修正<sup>[7]</sup>,

$$FP' = \frac{\lambda}{2\theta} (1+d/R) = FP(1+d/R) = FP + \Delta FP \quad (11)$$

这里  $R$  为入射光的波面的曲率半径,  $d$  为列阵距干涉仪的距离,  $\theta$  为楔角。

设 Fizeau 楔板的孔径为  $2a$ , 则有

$$R = a/\theta_0$$

对于  $TEM_{01}$  模, 由(10), (11)和(12)式可得激光模式引起的偏差

$$\Delta FP/FP = d\theta_0/a = \frac{\sqrt{3/2} \cdot d}{a} \cdot \frac{\lambda_0}{\pi w_0}$$

取

$$\lambda_0 = 633 \text{ nm}, w_0 = 10 \text{ mm}, d = 150 \text{ mm}, a = 30 \text{ mm},$$

有

$$\Delta FP/FP = 1.2 \times 10^{-4}.$$

显然 TEM<sub>01</sub> 模对干涉条纹的周期产生的偏差已严重影响到测量精度。

#### 2.4 仪器机械部件的热稳定性

由于热胀效应, 固定在底板上的各光学部件可能会移动, 从而使得测量的精度降低。如图 1 所示, 光纤出射头放在抛物面镜的焦点上。设抛物面反射镜的焦距为  $F$ , 温度变化  $\Delta T$  后, 由于底板的热胀冷缩, 光纤头与抛物面镜的距离变为

$$l = F \cdot (1 + \alpha \Delta T)$$

$\alpha$  为底板材料的线胀系数。由于离焦  $F\alpha\Delta T$ , 引起的波面曲率半径为

$$R = F / (\alpha \Delta T) - l = F / (\alpha \Delta T) - F(1 + \alpha \Delta T)$$

由(11)式,

$$\Delta FP / FP = d / R = d \alpha \Delta T / F$$

取  $F = 300 \text{ mm}$ , 底板材料若采用铝<sup>[2]</sup>,  $\alpha = 23.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ,  $\Delta T = 1^\circ\text{C}$  时有

$$\Delta FP / FP = 1.16 \times 10^{-5}$$

从上面的分析可以看出底板温度的变化对干涉条纹周期影响不大。实际上, 机械部份的热稳定性主要影响在初位相的变化大。由于固定光电器件的列阵架是安装在底板上的, 由于底板的热胀冷缩会使列阵在垂直光线方向产生移动。列阵架一般长  $3 \text{ cm}$ , 温度变化  $\Delta T$ , 列阵移动  $\Delta y = 30\alpha\Delta T (\text{mm})$ 。

用像元的个数来表示位相的变化

$$\Delta PH = \Delta y / (25 \times 10^{-3} \text{ mm}) = 2.78 \times 10^{-2} \Delta T$$

如果要求  $\Delta PH / FP < 10^{-3}$ , 在可见光范围内, 一般  $FP \sim 10$  个像元, 则需有  $\Delta T < 0.6^\circ\text{C}$ 。

### 三、结 论

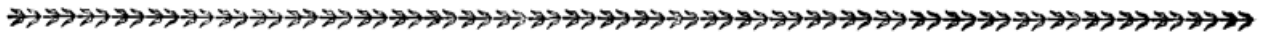
从上面的分析我们知道, 干涉仪腔体的温度、底板温度、光束质量以及电磁干扰对 Fizeau 波长计的测量精度均有不同程度的影响。干涉仪温度的变化对测量精度的影响较小, 只有在需要高精度 ( $\Delta\lambda/\lambda < 10^{-8}$ ) 时, 才需要对干涉仪腔体进行精密的温控, 一般只需保持温度变化在  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  的范围内。

采用单模光纤来输入激光是获得 TEM<sub>00</sub> 模较简捷的方法, 这种方法的缺点是限制了 Fizeau 波长计的测量范围, 被测光的波长不能短于单模光纤的截止波长。但由于光纤的使用, 可以把仪器置入屏蔽室内工作, 相对减少了电磁干扰。脉冲激光器产生的电磁干扰是影响 Fizeau 波长计测量精度的主要因素, 为了减小电磁干扰的影响, 除了对波长计的电子线路作出改进外, 对于重复率较高的激光, 提高光电二极管的扫描速度, 使得在一个扫描周期内受到电干扰的次数减少, 也可以降低电干扰的影响。

我们在研制 Fizeau 波长计时, 对其底板的温控精度为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , 干涉仪腔体温控精度亦相应为  $\pm 0.2^\circ\text{C}$ , 在电磁干扰占光电信号最大输出 30% 时, 获得的对脉冲激光的测量精度为  $5 \times 10^{-6}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 J. J. Snyder, *Sov. J. Quant. Electr.*, **8**(8), 959(1979)
- 2 Mark B. Morris *et al.*, *Appl. Opt.*, **23**(21), 3663(1984)
- 3 J. L. Gardner, *Appl. Opt.*, **24**(21), 3570(1985)
- 4 Christopher Reiser, *Appl. Opt.*, **27**(17), 3656(1988)
- 5 W. Kedzierski, *J. Phys. E: Sci. Instrm.*, **21**, 796(1988)
- 6 D. H. Rank, "Advances in Spectroscopy". Vol. 1. American Institute of Physics Handbook, 5ed Ed.
- 7 Charles R. Tiford, *Appl. Opt.*, **16**(7), 1858(1977)
- 8 沃敏政 *et al.*, *中国激光*, **16**(11), 651(1989)
- 9 J. L. Gardner, *Opt. Lett.*, **8**(2), 91(1983)



## 闪光灯泵浦掺钛宝石激光器

闪光灯泵浦的掺钛宝石激光器结构简单紧凑,可以在可见和近红外光谱区做宽调谐,激光的总体效率较高。

最近我们采用双灯泵浦掺钛宝石,获得了 50 mJ 的激光输出。

实验用的  $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$  晶体是我们所研制的,掺杂浓度为 0.17 Wt%;几何尺寸为  $\phi 4 \times 60\text{mm}$ ,两端面镀以 700~960 nm 波段的增透膜。该晶体棒封在充满染料光谱转换液的石英套管内,然后置于椭圆聚光腔内的两只闪光灯之间。

闪光灯为我所研制的 DMX-70 型灯,管内径为 3.5 mm,极间距为 70 mm。两只灯串接于电路中。闪光时间为 10~15  $\mu\text{s}$ (脉冲半极大处)。

激光腔的端面反射镜在 700~960 nm 波段内,反射率达 99.2%,是曲率半径为 750 mm 的球面镜;输出耦合镜为平板,在 700~960 nm 范围内的透过率有两种: 2% 和 5%;腔长 400 mm。当采用透过率为 2% 的输出耦合镜时,阈值泵浦能量为 34 J; 当用 5% 的输出耦合镜时,阈值泵浦能量为 45 J; 当泵浦能量为 179 J 时,获得 50 mJ 激光输出。泵浦能量是以灯电路中储能电容器上的电压计算的。

激光脉冲宽度为 4  $\mu\text{s}$ ; 滞后脉冲灯的闪光 2  $\mu\text{s}$  左右。激光发散度为 6 mrd。

(中国科学院上海光机所 于开义 姜爱宝 钱玉兰 林文正 卓美珍 乔景文 邓佩珍

1992 年 8 月 26 日收稿)