

# 激光波长计

**Abstract:** A digital scanning wavemeter for lasers is described. The accuracy for laser wavelength measurement is  $2 \times 10^{-7}$ .

目前,国内外染料激光进展迅速,其谱线宽度已压缩至兆赫量级。实际应用中提出了一个重要的问题,就是要以与激光谱线宽度相当的精度,实时地测定其波长。国外已研制多种测量设备<sup>[1~4]</sup>。我们和长春光机所<sup>[5]</sup>也分别研制成激光波长计。本文报道我们研制的数字式激光波长计。

## 一、原理

我们采用了与[1]相同的原理。但我们用被测激光干涉带负向过零信号控制干涉带计数,被测一路为整数干涉带,标准激光一路采用了锁相加倍频计数。干涉仪扫描时,两组计数的关系为

$$\lambda_m = \lambda_r \left( \frac{n_m}{n_r} \right) \left( \frac{N'_r/10}{N_m} \right) \quad (1)$$

式中  $\lambda_r$  和  $\lambda_m$  及  $n_r$  和  $n_m$  分别为标准激光和被测激光的真空波长和折射率,  $N_r = N'_r/10$  和  $N_m$  分别为两者的干涉带计数。如果不计折射率影响(如测量在真空中进行,或两波长很接近时),由(1)式可知,将  $N_m$  作为计数器的一个预置数,并且与  $\lambda_r$  波长值的数字相同,则可从标准激光的干涉带计数  $N'_r$  直接得到被测波长值  $\lambda_m$ 。

## 二、波长计的结构

波长计由干涉仪和电子系统组成。

### 1. 光学系统

光路如图1所示。采用了对称三角形光路的干涉仪系统。 $S$  为干涉仪的分光镜, $C$  为移动镜组, $M_1 \sim M_6$  为平面反射镜, $m_1$  和  $m_2$  为窗口平晶, $P$  为表面镀金属反射膜的直角棱镜, $A$  为立体棱镜, $D_1$  和  $D_2$  为接收器。

分光镜  $S$  由两块同样楔角的平面镜胶合而成。移动镜组  $C$  由对顶放置的两块直角立体棱镜组成,该反射镜组的扫描范围为 200 mm。 $M_1 \sim M_6$  为平面反射镜,其中  $M_1 \sim M_4$  为固定镜, $M_5$  和  $M_6$  可以调节,能使被测激光光束方便地进入干涉仪。

参考光束和被测激光束被射到棱镜  $P$  反射至分光

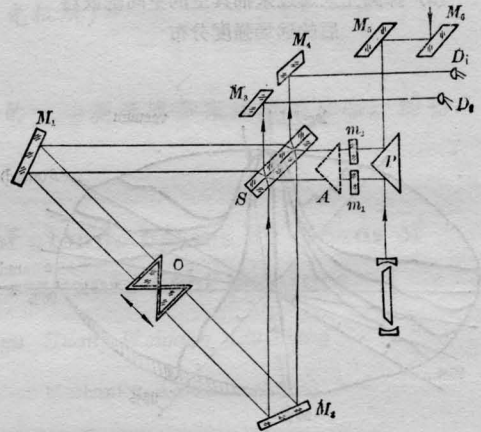


图1 光路图

镜  $S$ , 两束光分别被  $S$  分成透射、反射光束,此二光束又分别被  $M_1$  和  $M_2$  反射至  $C$ , 移动镜组  $C$  的反射光束,由  $M_1$  和  $M_2$  反射至  $S$ , 两光束会合后分别形成干涉带,干涉带由光电接收器  $D_1$  和  $D_2$  转换成电信号。

上述对称三角形光路干涉系统,当反射镜组  $C$  移动时,一侧光程增大,另一侧光程减小,从而使光程差倍增。当  $C$  移至中间位置时,两侧光程相等,在零光程差附近,多纵模激光仍可以形成干涉带,因此可以测其平均波长。

直角立体棱镜  $A$  可如图放入光路中,从  $P$  反射的参考光束,由  $A$  平行反射回  $P$ ,由  $P$  反射至  $M_5$ ,又由  $M_6$  反射至被测激光,此光束为被测光束的引导光束。只要将被测激光调至与引导光束重合,既可满足两光束平行入射干涉仪的要求。测量时需将  $A$  移出光路。

参考激光和被测激光光束在立体棱镜  $C$  底面上的入射和出射位置如图2所示。可见其空间位置完全分离,避免了激光间耦合的影响。

### 2. 机械及传动

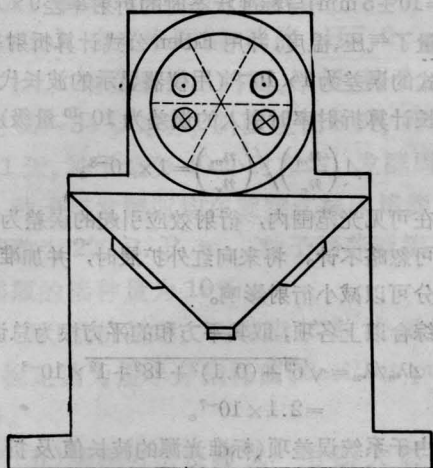


图2 导轨滑架截面及激光光束入射出射位置

采用了经研磨的V型槽导轨及滑架结构,滑架的V型表面贴有聚四氟乙烯膜(聚四氟乙烯与钢表面的摩擦系数与其间速度的平方成正比例<sup>[6]</sup>。滑块及导轨的截面见图2。滑架行程为200 mm。

拖动系统使用了SD<sub>45</sub>交流电机(低速时更换SD<sub>2</sub>电机),通过尼龙丝与拉伸弹簧牵引立体棱镜滑架见图3。尼龙丝绕过电机拖动轮两周,消除了其间的滑动,并避免马达轴受到径向力的作用。行程两端有自动换向开关。

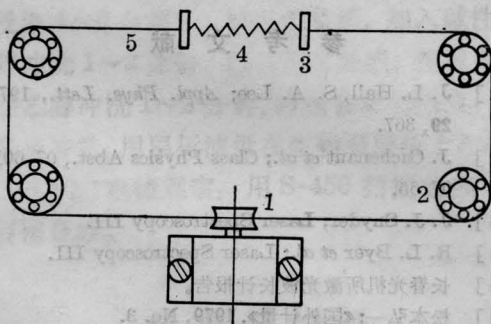


图3

- 1—马达; 2—滚动轴承; 3—滑架拖动板;  
4—拉伸弹簧; 5—尼龙丝

立体棱镜滑架的移动速度约为25 nm/s(参考激光干涉带计数的中心频率为1.7 MHz),移动速度的平稳性优于±10%,满足了电子锁相系统的要求。

干涉仪光学元件(分光镜,反射镜)的机械结构均为不可调结构。光学系统装调后能保持位置的稳定,但对装配的要求比较严格。

### 3. 电子系统

所用的电子系统方框如图4所示。其中参考激光一路采用了锁相十倍频,它可以提高仪器的分辨率。被测激光一路,经整形得到脉冲信号,通过逻辑控制到预置计数器。在该通道上,预置计数器在高、低分辨率时分别预置632991与633。如此,可直接从数码管上读出待测的波长值。电子系统可通过把参考激光的干涉带信号同时送入两个计数通道进行自校。

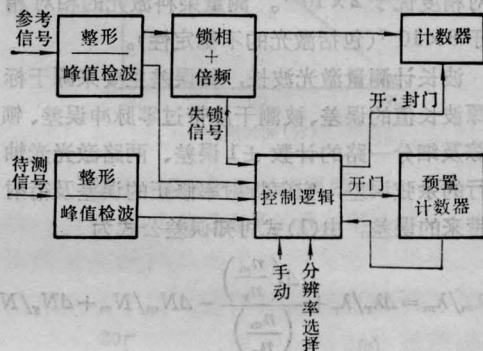


图4

控制逻辑部分能协调各部件的工作,可以手动或自动清零。后者可在清零后重新计数,保证了两路干涉带信号在同一时间(也就是干涉仪的同一程长)内同时计数。测量分为高分辨率和低分辨率连续测量或单次测量。测量结果通过数码管显示,还可以用编码输出供给记录器。

### 三、实验及精度

波长计的标准光源为用兰姆凹陷稳定的半内腔激光器。其波长值为 $\lambda=0.6329914\mu\text{m}$ 。在高分辨率测量时其值取为 $\lambda=0.632991\mu\text{m}$ (即预置计数为632991),低分辨率测量时取为 $\lambda=0.6330\mu\text{m}$ (预置计数为6330)。

实验开始前,首先检查参考激光干涉带信号的质量。其幅度应大于3V(峰—峰),全行程幅度不应有明显变化。

用调节立体棱镜A将参考激光光束变为引导光束。注意光轴位置要适当(可从分光镜、反射镜及立体棱镜组上的光斑位置判断),将被测激光光束沿引导光束逆向射入到干涉仪中,检查出射光束的干涉带信号的质量。与参考激光干涉带信号要求相同,但在被测激光线宽很宽或为多模时,只能在零光程位置附近达到这一要求。

实验开始时,用参考激光干涉带信号进行自校。高分辨率测量时示数为  $0.6329910 \pm 0.0000001$ , 低分辨率时为  $0.633 \pm 0.001$ , 如此可以开始正式测量。

为了检查研制的波长计的精度,我们主要用两只兰姆凹陷稳频用的半内腔激光器( $\lambda = 0.633 \mu\text{m}$ )的一个作为参考激光,另一个作为待测激光。也测量了未加稳频  $0.630 \mu\text{m}$  和  $0.640 \mu\text{m}$  的氦-氖激光的波长<sup>[7]</sup>及稳频染料激光的波长<sup>[8]</sup>。

实验结果表明,波长计测量 He-Ne 激光波长的相对精度优于  $2 \times 10^{-7}$ 。测量染料激光的相对精度优于  $3 \times 10^{-7}$ (包括激光的不稳定性)。

波长计测量激光波长,其误差主要来源于标准光源波长值的误差、被测干涉带过零脉冲误差、锁相跟踪及细分一路的计数  $\pm 1$  误差、两路激光光轴不平行的余弦误差,空气折射率修正的误差及衍射相移带来的误差。由(1)式可知误差公式为

$$\Delta\lambda_m/\lambda_m = \Delta\lambda_r/\lambda_r + \frac{\Delta\left(\frac{n_m}{n_r}\right)}{\left(\frac{n_m}{n_r}\right)} - \Delta N_m/N_m + \Delta N_r/N_r \quad (2)$$

标准光源波长的误差为  $6 \times 10^{-6}$ 。

锁相跟踪误差即十倍频细分误差,与信号频率的抖动有关。运动均匀性即干涉带频率变动范围为  $\pm 10\%$ , 该项误差最大为  $1 \times 10^{-7}$ 。

十倍频计数的  $\pm 1$  误差,使波长产生  $1.5 \times 10^{-7}$  的误差。

标准与被测两路激光光轴不平行,将产生余弦误差为  $\theta^2/2$ ,  $\theta$  为两光轴的夹角。直接观察干涉环中心与光斑的重合调整两光轴的平行,经测量表明,这种方法可使两光轴平行性优于  $\pm 30''$ 。对波长的影响为  $\pm 1 \times 10^{-8}$ 。

综合以上三项将产生

$$\Delta N_r/N_r = \sqrt{10^2 + 15^2 + 1^2} \times 10^{-8} = 1.8 \times 10^{-7}$$

空气折射率的影响。测量是在空气中进行的,标准激光波长取其真空波长值。在可见光范围,如以测量值当做真空波长值,可能有  $10^{-6}$  的误差(标准状态时,对  $0.55 \mu\text{m}$  为  $1 \times 10^{-6}$ )。实验室条件下(气压  $P = 760 \pm 10$  Torr, 温度  $t = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ , 水蒸气

压  $f = 10 \pm 5$  mm)与标准状态时的折射率差  $9 \times 10^{-8}$ 。当测量了气压、温度,并用 Edlen 公式计算折射率时,该公式的误差为  $1 \times 10^{-8}$ (用仪器显示的波长代替被测波长计算折射率时引入的误差为  $10^{-10}$  量级)。故

$$\Delta\left(\frac{n_m}{n_r}\right)/\left(\frac{n_m}{n_r}\right) = 1 \times 10^{-8}$$

在可见光范围内,衍射效应引起的误差为  $10^{-9}$  量级可忽略不计。将来向红外扩展时,并加准直扩束部分可以减小衍射影响。

综合以上各项,取其平方和的平方根为总误差:

$$\Delta\lambda_n/\lambda_n = \sqrt{6^2 + (0.1)^2 + 18^2 + 1^2} \times 10^{-8} = 2.1 \times 10^{-7}$$

由于系统误差项(标准光源的波长值及折射率的修正值)为  $10^{-8}$  量级,故  $\Delta\lambda_n/\lambda_n$  主要为偶然误差。此分析结果与实测结果在精度范围内符合。

所研制的激光波长计已于 1983 年 3 月鉴定通过,它适用于可见光范围的连续激光波长测量,所需功率约为  $0.5 \text{ mW}$ , 用光电倍增管接收时,功率可为  $0.1 \text{ mW}$ , 谱线宽度以产生可接收的干涉带为限,约为百兆赫。该仪器可以单次测量或连续测量,设有编码输出接口。高分辨档测量精度为  $10^{-7}$ , 低分辨档为  $10^{-8}$ 。

仪器设计时考虑了真空系统,因此测量范围可扩展至红外波长(光学元件要更换)。

## 参 考 文 献

- [1] J. L. Hall, S. A. Lee; *Appl. Phys. Lett.*, 1976, **29**, 367.
- [2] J. Cachenaud *et al.*; *Class Physics Abst.*, 07, 60L, 07.65.
- [3] J. J. Snyder; *Laser Spectroscopy III*.
- [4] R. L. Byer *et al.*; *Laser Spectroscopy III*.
- [5] 长春光机所激光波长计报告。
- [6] 松本弘一;《国外计量》, 1979, No. 3.
- [7] 刘忠有, 赵志喜;《中国激光》, 1984, **11**, No. 2, 126.
- [8] 刘忠有, 赵志喜;《应用激光》, 1983, **3**, No. 2.

(中国计量科学研究院激光波长基准室

刘忠有 赵志喜 马明德 刘秀英

1984年7月28日收稿)