

激光数字波长计

郑洪滨 许凤鸣*

一、引言

在激光技术发展的进程中,由于可调谐激光器的出现,推动了高分辨光谱学的进展。现在,可调谐激光器已经成为光谱学中有力的工具。随之而来的问题是要实时高精度地确定激光波长值。目前国内已研制出谱线宽度达几十兆赫的染料激光器,用光栅单色仪测定其波长已远远不能满足需要了。尽管在光谱学中不是都需要这样高的精度,但是研究与激光的线宽相当的波长测量仪器是重要的。

用于测量激光波长的仪器有各种类型^[1]。对连续波激光波长的测量基本上是数字式条纹干涉仪^{[2][3][4]}。这些仪器的实质是测量参考激光波长和未知波长的比值,加上电子学细分技术,达到实时显示和高分辨率的要求。

我们研制的激光数字波长计是扫描的迈克尔逊干涉仪。以稳频He-Ne激光波长为标准,用锁相倍频实现电子学细分,加上数据处理系统,对在可见光范围内的连续波激光,可以高精度地实时测量波长值。

二、波长计的设计

1. 干涉仪部份

研制的扫描双迈克尔逊干涉仪,如图1所示,有一共用的活动臂,臂上的角反射器装在浮动托架上,托架可沿着长度为500mm的气浮导轨以可控的速度平稳地滑动。

参考激光(波长 λ_0)和被测激光(波长 λ_x)入射到干涉仪中。在通过分束板B后,两光束在活动臂内的光路中沿同样光路同向传播。由于两光束的光路一致,可以进行准确的调整。为了避免光束反射回到原激光器而导致相互干扰,干涉仪的另一臂也采用角反射器结构。

仪器内设有直径2mm的准直光栏,被测光束经双反射镜 M_1 和 M_2 可以方便地被引入仪器进行测量。入口处置一中性变密度衰减片S,使进入干涉仪内被测光强满足测量需要。

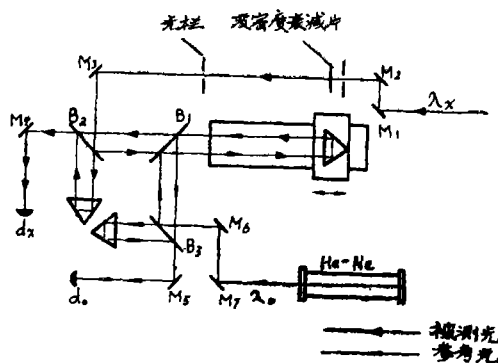


图1 干涉仪示意图

* 此课题是长春光机所与吉林光机实验厂合作项目。长春光机所参加此工作的还有胡永文、杨惠群、王云霞和梁万兆同志。

当浮动托架移动时, 因光程差发生变化, 两束光同时形成的二组干涉条纹由探测器 d_0 和 d_x 接收计数, 如果角反射器移动的距离为 L , 探测器 d_0 、 d_x 记得的条纹数分别为:

$$N_0 = 2n_0L/\lambda_0$$

$$N_x = 2n_xL/\lambda_x$$

式中 n_0 和 n_x 分别是波长 λ_0 和 λ_x 的大气折射率。两式消去 L , 则有:

$$\lambda_x = \frac{n_x}{n_0} \cdot \frac{N_0}{N_x} \cdot \lambda_0 \quad (1)$$

如果采用锁相倍频对干涉条纹进行细分, 细分后的数值为 $N'_0 = mN_0$ 和 $N'_x = mN_x$ (m 为倍频系数), 则可得到:

$$\lambda_x = \frac{n_x}{n_0} \cdot \frac{N'_0}{N'_x} \cdot \lambda_0 \quad (2)$$

如果忽略折射率影响 (在真空中测量或两波长接近), 将 N'_x 作为计数器的预置数, 并且等于 λ_0 的数字, 就可以从参考激光的干涉条纹计数值 N'_0 得到被测激光波长值 λ_x 。在本设计中, 参考激光是拉姆凹陷稳频 He—Ne 激光, 浮动托架移动的有效长度 $L = 320\text{mm}$, 倍频系数取 $m = 40$, 在可见光范围内具有 0.0002\AA 分辨率。因为实际测量是在大气中进行的, 确定被测激光波长值则需要计算折射率比值 n_x/n_0 加以修正。用 633nm He—Ne 激光作参考激光, 折射率比值可按式计算近似值: [5]

$$n_x/n_0 = 1 + [(0.4007\sigma_x^2 - 1) \times (25.63 - 1.339t + 0.00395P) \times 10^{-8}] \quad (3)$$

σ_x : 真空波数 (单位: μm^{-1})

t : 温度 (单位: $^\circ\text{C}$)

P : 大气压 (单位: Pa)

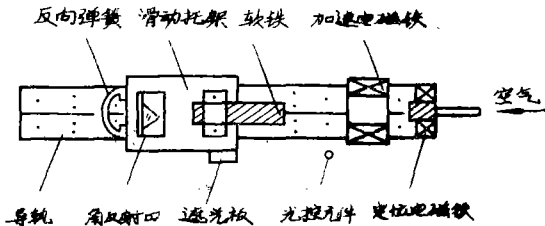


图2 拖动系统简图

薄的气膜, 滑动托架处于漂浮状态, 不仅消除了磨损, 长期使用精度不变, 而且导向性能好, 运动平稳无爬行, 可以获得高精度直线运动。我们采用 V 型静压导轨, 如图 3 所示。润滑气体是空气, 供气压力为 1.5kg/cm^2 。长度为 500mm 的导轨上均布 30 个喷嘴, 喷嘴直径为 0.3mm 。气浮滑动托架长 180mm , 其处于任何位置都跨越同样恒压区, 以保证平稳滑动, 托架上装有角反射器, 反向弹簧和工作软铁。导轨的一端装有空心螺管式电磁铁和定位电磁铁, 通过光电控制, 使滑动托架在导轨上匀速往复运动。改变空心螺管的端电压, 可以调节移动速度, 速度控制在约每秒 10cm 。一次有效测量时间为 3 秒, 以使干涉条纹通过探测器的频率约在 $300\sim 500\text{kHz}$ (波长在可见光范围)。往复测量在逻辑电路控制下自动进行的, 即当滑动托架离开空心螺管电

如果空气含有水蒸汽, 则还要进行修正。

2. 气浮导轨及控制系统

干涉仪活动臂平稳匀速移动是保证波长计高精度计量的一环。为了避免机械传动爬行和瞬间阶跃现象出现, 我们采用了气浮导轨的滑动结构, 如图 2 所示

由于气浮导轨间工作介质是一层很

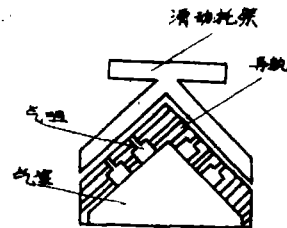


图3 气浮导轨截面

磁铁被遮光板挡住的光再次射到光电元件时，托架不再受力开始匀速滑行，经过一延迟时间后，发出一触发信号，启动计数部份的逻辑控制，开始计数测量，直到达到预置数时一次测量结束。这样周而复始，测量将一次次进行。

3. 锁相倍频环路和条纹计数显示系统

被测激光波长值是由通过每个探测器干涉条纹数的比值求得的。由于干涉条纹数的任何差错，比如染料激光器的染料中混有微小的气泡，都可造成干涉条纹数的误计数。因此为了达到高精度测量，电子学系统要具有排除可能产生误计数的外部干扰的功能，为了解决这一问题，我们在信号处理中，两路都加入锁相环路。一方面克服了信号的瞬间丢失，同时也能对信号进行跟踪，使倍频电路容易实现。

锁相倍频环路的方框图如图 4 所示。由鉴相器、低通滤波器、压控振荡器和分频器等四

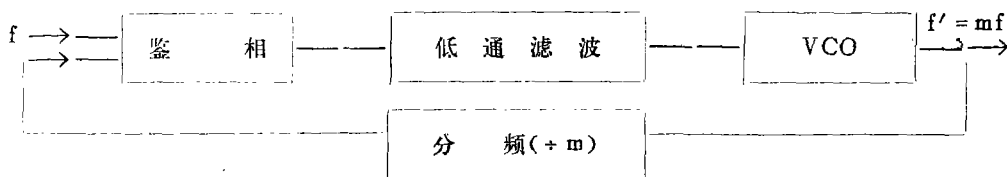


图 4 锁相倍频环路方框图

部分组成。环路的倍频系数取 $m = 40$ ，环路输入信号频率：标准信号为 13.2 MHz，被测信号的频率为 21.3 MHz ~ 12.2 Hz。

为了减小光功率变化对锁相环路的影响，在前置放大器和锁相环路之间加入限幅电路，使输入锁相环路的信号幅度恒定。

条纹计数和波长显示由逻辑控制，被测激光条纹计数器及参考激光条纹计数器和波长显示器组成。各信息量随时间变化及控制关系见图 5。

测量时，环路在触发信号到达之前锁定，手动或自动触发信号产生复零负脉冲，被测信号通过触发器，开启最后一道门后，信号进入计数器计数。当被测信号计数器计满预置数时，同时关闭第一、二道门，计数器停止计数。

此复合信号经延迟送出一正脉冲寄存信号，把波长值显示出来。如果测量中由于干涉信号的任何故障，将导致锁相环路失锁，失锁信号停止计数器计数，不显示波长值。

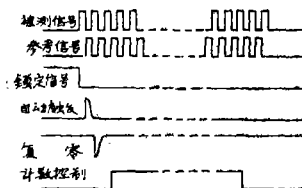


图 5 逻辑控制波形图

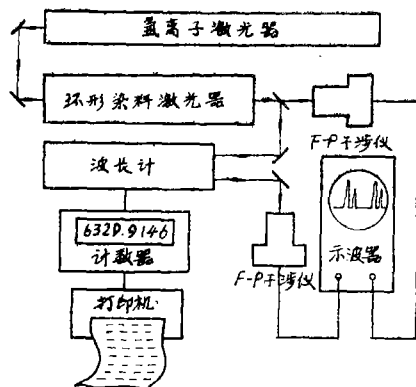


图 6 激光波长测量系统

三、波长测量及精度

波长计的参考光源用兰姆凹陷稳频的 He-Ne 激光器。以其波长值做预置数为 6329.9146。参考信号计数器用偶数计数器作个位数，个位数每记一个数表示的波长值为 0.0002 \AA ，八位数字用荧光数码管显示。

测量时用机内信号源自校，数码显示为 6329.9146 ± 0.0002 。

用波长计测量了拉姆凹陷稳频的 He—Ne 激光，测量了 801A 型环形染料激光器调谐到某一任意波长时的波长值。激光波长测量系统如图 6，测量的一组数据见表 1。测量稳频 He—Ne 激光和环形染料激光波长值的离散分布如图 7、图 8。

表 1

激 光 器	测量次数	测量波长 ($\bar{\lambda}$) Å	标准偏差(σ) Å	$\sigma/\bar{\lambda}$
稳 频 He—Ne	49	6329.9170	0.00042	5.5×10^{-8}
801 型染料激光器	20	5769.8136	0.00030	5.2×10^{-8}
同 上	20	5974.3033	0.00024	4.1×10^{-8}
同 上	20	6140.2245	0.00034	5.5×10^{-8}

表中列出的结果表明波长值测量精密度为 5.5×10^{-8} 。

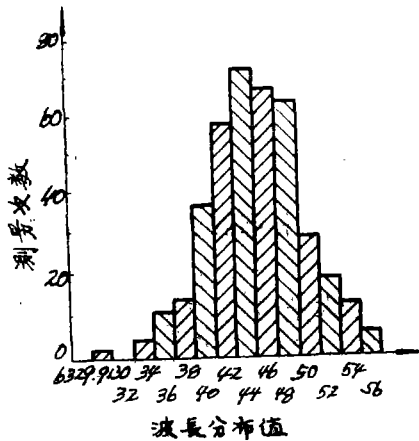


图 7 JP—6型稳频He—Ne激光器

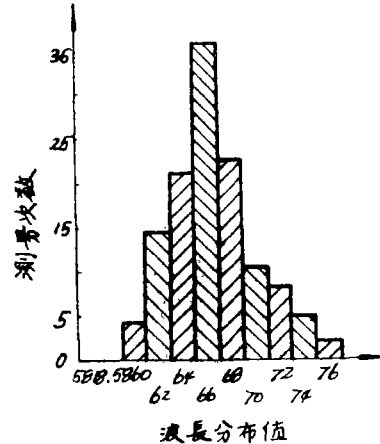


图 8 801型染料激光器

测量的误差主要来源于参考光源波长值误差、锁相倍频条纹数计数误差、两路光束不重合的余弦差、空气折射率的修正误差和被测光源不稳定因素的影响。

参考光源是拉姆凹陷稳频的 He—Ne 激光器，频率稳定度为 10^{-8} 数量级，波长值取 6329.9146 \AA ，故参考光源产生的误差为 1.8×10^{-8} 。参考光路和被测光路锁相倍频计数的 ± 1 误差，使波长值产生 2.1×10^{-8} 的误差，两路光光轴调不重合，将产生余弦误差。如果两光束夹角为 θ ，则有 $L - L_0 = \frac{L}{2} \theta^2$ ， L 、 L_0 分别是被测光和参考光移动的光程。 $\theta = \frac{\Delta x}{L}$ ， Δx 为两光束距 L 处相差长度。经 40 倍后，滑车每移动半波长距离，将有 40 个计数，计一个数相应移动的距离约为 $\frac{3}{4} \times 10^{-8} \text{ m}$ ，在距离 $L = 3 \text{ m}$ 处，调整两光束重合，使 Δx 不大于 1 mm ，处于仪器测量精度允许范围内，由此引起的误差为 3.6×10^{-8} 。

测量是在空气中进行的，测量值要进行空气折射率的修正。在波长 $0.46 \mu\text{m} \sim 0.70 \mu\text{m}$ 范围内，压力为 $94.7 \sim 105.3 \text{ kPa}$ ，温度为 $15^\circ\text{C} \sim 25^\circ\text{C}$ 用 (3) 式计算的值比用 Edlen 公式计算的差不大于 1.8×10^{-8} ，对于使用若丹明 6G、DCM 染料的可调谐激光器，可用标准状态大气代替实验室条件折射率比值，由此引起的偏差最大不超过 6×10^{-8} 。

仪器的总误差取上述各项误差平方和的平方根，即：

$$\frac{\Delta\lambda_x}{\lambda_x} = (1.8^2 + 2.1^2 + 3.6^2 + 1.8^2)^{1/2} \times 10^{-8} = 4.9 \times 10^{-8}$$

由于被测激光光源不稳定的影响，偶然误差还要加大实测数据的离散，测量结果略高于 4.9×10^{-8} 。

波长测量的准确度，由分解各单项的误差测定。其中不能直接测得的项，我们采用理论分析，从极限差中求得。求得各单项误差后，波长计的准确度按下式合成：

$$\sigma_{\text{准确}} = (\sigma_{\text{折}}^2 + \sigma_{\text{公式}}^2 + \sigma_{\text{光源}}^2 + \sigma_{\text{主体}}^2)^{1/2}$$

式中：

$\sigma_{\text{折}}$ ：为折射率修正值带来的误差。如折射率极限误差为 1×10^{-7} ，该值为随机性系统误差，并且等概率分布，则 $\sigma_{\text{折}} = \pm 10/\sqrt{3} \times 10^{-8}$ 。

$\sigma_{\text{公式}}$ ：为与Edlen公式计算的误差。取 $\pm 1.8 \times 10^{-8}$ 。

$\sigma_{\text{光源}}$ ：为波长计中参考光源带来的误差，取其极限误差为 1×10^{-7} 。因是等概率分布，则 $\sigma_{\text{光源}} = \pm 10/\sqrt{3} \times 10^{-8}$ 。

$\sigma_{\text{主体}}$ ：为波长计中除 He-Ne 参考光源外的误差。为了测得 $\sigma_{\text{主体}}$ 数值，我们将被测波长选得和参考波长一样，两束光都由同一个稳频 He-Ne 激光器产生，为了避免两束光相互干扰，调整时将两束光空间分离，但彼此相互平行。在这种条件下测得的一组数据如图 9 所示。这组 105 次测量结果分布，其记数 $N_2/N_1(\lambda_1 = \lambda_2)$ 比值的平均值为 $N_2/N_1 = 1 - (3.2 \times 10^{-8})$ 。图 9 所示分布的 $\sigma_{\text{主体}}$ 为 3.2×10^{-8} ，这个分布，由于两光束空间分离而被加宽了，在两光束重合时分布的宽度比上述分布将减小。

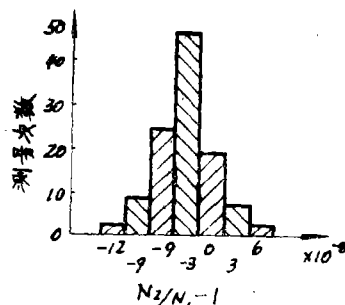


图9 二束光同是He-Ne 激光一组测量分布

根据上式得：

$$\sigma_{\text{准确}} = \pm 10^{-8} [(10/\sqrt{3})^2 + (1.8)^2 + (10/\sqrt{3})^2 + (3.2)^2]^{1/2} \approx \pm 9 \times 10^{-8}$$

四、结 果

研制的波长计，对在可见光范围内连续波激光，可以实时测定其波长值，测量精度 $< 1 \times 10^{-7}$ ，单次有效测量时间小于 3 秒，连续测量每隔 3 秒数码显示一次，也可以编码输出供给记录打印，测量过程的操作自动进行。

波长计具有较高的灵敏度，输入激光功率可以小至 0.1 mW。内部安置的中性变密度衰减片，可以调节输入激光功率的辐值。

波长计是一种高精度激光波长测量仪器，欲要达到上述高精度，被测激光波束必须小于 1GHz，它适于 801A 型可调谐环形染料激光器实时测量波长值或监视其漂移。

参 考 文 献

- [1] J.J.Snyder, Laser Wavelength Meters Lasev Focus, 1982, 18, 5.
- [2] S.A.Lee, J.Hall, Appl. phys. Lett., 1976, 29, 367.
- [3] F.V.Kawalski et al., J. Opt. Soc. Am., 1976, 66, 965.
- [4] B.W.Petley, Opt. & Quantum Electron., 1978, 10, No. 3, 277-8.
- [5] S.J.Bennet, P.Gill, J. Phys. E: Sci. Instrum., 1980, 13, No. 2, 174-177.