

利用Fizeau干涉仪测量激光波长

张铁军 陈 方 许凤明

摘要：采用Fizeau干涉仪测量激光波长，测量的重复精度为 5×10^{-7} 。

一、引 言

激光波长的测量通常采用以下几种方法：迈克尔逊干涉仪^[1]，F—P标准具^[2]，Fizeau干涉仪^[3]，杨氏干涉^[4]等；由于各方法本身的不足，限制了其中一些方法的普遍采用，如迈克尔逊干涉仪在进行激光波长的测量时要移动锥角棱镜，故不能测量脉冲激光波长。F—P标准具虽可用于脉冲激光波长的测量，但因其反射膜具有反射位相色散，并且相应的结构和测量手续复杂，使得F—P标准具测量激光波长尚未有产品出现。

利用Fizeau干涉仪进行激光波长的测量能够满足实时、中等测量精度的要求，它的光学和机械结构简单、紧凑。它既可进行连续激光波长的测量，又可用于脉冲激光波长的测量，光谱测量范围宽，对待测激光的线宽和模式要求不严格。1977年J.J.Snyder首次报道了Fizeau激光波长计^[5]，接着又推出了产品^[5]。目前，国内在这方面开展的工作不多，还没有商品出现。

我们参照国外的研究成果，建立了采用Fizeau干涉仪测量激光波长的光学和电子学系统，并进行了激光波长测量的实验，波长测量的重复精度已达 5×10^{-7} 。

二、基本原理

利用Fizeau干涉仪进行激光波长的测量，就是使待测波长的激光产生等厚干涉条纹，通过二极管阵列接收器将随空间位置变化的干涉信号转换成随时间变化的电信号，通过计算机的实时处理而求得未知的激光波长。

图1.给出了Fizeau干涉仪的原理图。当一单色平面波 I 入射到干涉仪 F 上时，经过 F 上下两个表面的反射（如图1中的 A 、 B 点），产生两列在传播方向上略有差异的相互剪切的反射光波 I_1 、 I_2 ，在它们的交点 P 处产生等厚的干涉条纹^[6]，干涉条纹的方向与 I_1 和 I_2 的交线相互平行。光强近似为正弦分布，即：

$$I = 2I_0 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta\right) \right]$$

(1)

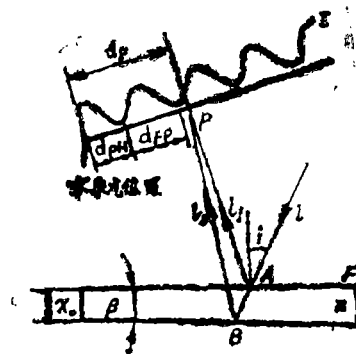


图1 Fizeau干涉仪原理图

其中 Δ 为 I_1 与 I_2 之间的光程差, λ_0 为待测激光的波长, I_0 为 I_1 或 I_2 的光强度。如果在 P 位置放置二极管阵列接收器, 使其与干涉条纹的方向垂直, 就能够获得干涉条纹的空间分布信号。

在入射角 i 不大($\leq 10^\circ$)的情形下, Δ 可以表示为:

$$\Delta = 2n(\alpha_0 + \beta \cdot d_p) \quad (2)$$

其中 n 为光楔 F 的折射率, α_0 为与接收器上零象元位置相对应的 F 薄端厚度, d_p 为接收器上非零象元与零象元的距离, β 为 F 的楔角。

当 Δ 为波长的整数倍时, 干涉条纹的强度为极小, 亦即有:

$$\Delta = k\lambda_0 = 2n(\alpha_0 + \beta \cdot d_p) \quad (3)$$

其中 k 为干涉级次。由(3)式可得干涉条纹的周期 d_{FP} 为:

$$d_{FP} = \lambda_0 / 2n\beta \quad (4)$$

令 d_{FH} 为干涉条纹第一个极小所对应的位置, $\alpha = 2n\beta$, $L_0 = 2n\alpha_0$, 则有:

$$d_{FP} = \lambda_0 / \alpha \quad (5)$$

$$k\lambda_0 = L_0 + \alpha \cdot d_{FH} \quad (6)$$

(5)、(6)两式均与波长 λ_0 有关。其中 α , L_0 分别为 F 角度和厚度的标定参数, 它需要用已知的准确波长标定之后才能给出, d_{FP} 和 d_{FH} 为检测参数, 它由激光波长实际测量给出。波长测量分为两个步骤:

1. 由检测出的 d_{FP} 和已标定好的 α 定波长的初值 λ_1 , 即:

$$\lambda_1 = \alpha \cdot d_{FP} \quad (7)$$

2. 由检测出的 d_{FH} 和已标定好的 α , L_0 以及波长初值 λ_1 确定干涉条纹的级次 k , 即:

$$k = \text{Int} \left(\frac{L_0 + \alpha \cdot d_{FH}}{\lambda_1} + 0.5 \right) \quad (8)$$

Int表示取整, 最后由 k 定波长的实际值 λ_2 , 即:

$$\lambda_2 = (L_0 + \alpha \cdot d_{FH}) / k \quad (9)$$

只要预先标定出Fizeau干涉仪的结构参数 α , L_0 , 并在波长测量中检测出干涉条纹的周期 d_{FP} 和初位相 d_{FH} , 则通过(7)、(8)、(9)三式可求出未知的激光波长。

在利用Fizeau干涉仪测量激光波长时, 二极管阵列接收器的位置对测量精度有很大的影响。接收器应放在干涉条纹的定域位置上, 在该位置能够消除剪切干涉的影响。如果选择沿光楔 F 的上表面与上、下表面交线相垂直的方向为 x 轴, 垂直于上表面的方向为 y 轴, 则接收器应按下面方程确定的位置放置:

$$x = \frac{\beta}{n} \left(\frac{i}{\beta n} - 1 \right) + \frac{\alpha_0}{n} \left(\frac{i}{\beta n} - 1 \right) \quad (10)$$

显然当 F 为空气隙时, 定域面恰好与光楔表面反射光线方向相垂直。

三、结 构

图2给出了采用Fizeau干涉仪测量激光波长的结构简图, 它包括光学和电路(含微型计算机)两部分。

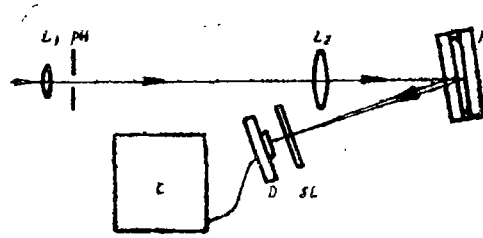


图 2 Fizeau干涉仪测波长结构简图

L_1 : 会聚透镜; L_2 : 准直透镜; PH: 针孔; F: Fizeau干涉仪; SL: 柱透镜;
D: 二极管阵列接收器; C: 计算机

1. 光学系统

光学系统中, 核心元件为 Fizeau 干涉仪, 它是由熔石英材料制成的两块平板和一个劈尖隔圈组成。平板与隔圈用树脂胶粘接固定的, 两个外表面镀增透膜以减少光损失和杂光干扰, 两个内表面不镀膜。为保证反射光为平面波前两块平板的平面度优于 $\lambda/15$ 。劈尖楔角为 $3'30''$, 薄端厚度为1mm, 通光孔径为 $\phi 40\text{mm}$ 。

透镜 L_1 和 L_2 用于光束扩束, 两者之间的焦距之比约为1/25。为获得高质量的干涉条纹, 对 L_1 和 L_2 的成像质量有很高的要求, 应尽量减少它们产生的像差。我们采用焦距为500mm的准直透镜, 它的相对孔径不大, 获得了令人满意的干涉条纹。

由于一些激光器, 特别是脉冲染料激光器的光束质量很差, 故采用针孔对入射光束进行空间滤波, 改善光束质量。柱透镜SL将由干涉仪反射来的光束在接收器上聚成与阵列方向一致的直线, 从而增加波长测量的输入灵敏度, 提高信噪比。

2. 电路系统及计算机数据处理

光电接收器采用的是光电二极管阵列器件, 当信号光照在接收器上时, 阵列器件便将光强的空间分布转换为电信号, 经过一系列的信号处理过程, 得到反映光强分布的具有采样保持输出的视频信号。

由二极管阵列输出并被放大的视频信号经过模数转换后, 便被输入到计算机中进行数据处理, 系统框图见图3。我们采用的是Cromemco Z80 计算机, 字长8位, 主频4MHz。

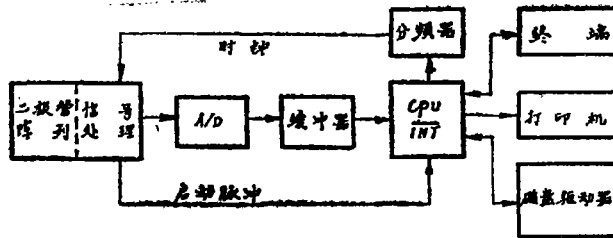


图 3 计算机控制系统框图

在数据采集过程中, 采用无条件传输方式, 使计算机采集数据的时间与光电二极管阵列输出的视频信号的采样保持时间严格同步。光电二极管阵列的扫描时钟为 TTL电平, 脉宽在

20ns至200μs之间，启动脉冲宽度的最小值为时钟脉宽加50ns，最大值应小于一个时钟周期，启动脉冲周期一般以小于40ms为佳，否则噪声过大。

我们将计算机内的时钟经分频作为二极管阵列的扫描时钟，启动脉冲是通过对扫描脉冲的计数而得到的，同时又把它作为外部中断申请信号送入计算机，在计算机中断开放后，CPU便响应中断，启动A/D，对二极管阵列输出的采样保持信号进行同步模/数转换，同时将转换完的数据按无条件传送方式存入内存。根据测量精度的要求，采用RL1024C二极管阵列器件，即有1024个象元，故计算机每组采集1024个数据。

为减小杂光信号及电路系统等方面的干扰和噪声，在获得原始数据后，需要进行数字滤波，我们采用卷积变换^[7]处理方法。用经过处理所得的数据计算干涉条纹的周期和初位相，计算程序使用FORTRAN语言。

由光学系统决定的干涉条纹的周期约占12个阵列象元，1024个象元的二极管阵列将得到90个左右的干涉条纹周期，对它们采用最小二乘法进行线性回归计算出准确的周期和初位相，利用式(7)、(8)和(9)便可计算出待测的激光波长。数据处理和波长计算过程见图4所示的流程图。

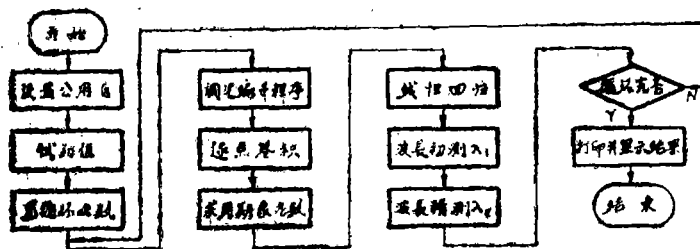
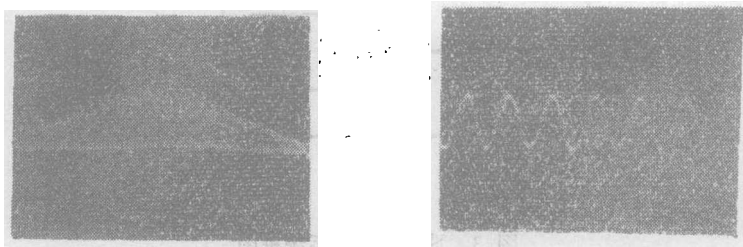


图 4 数据处理和波长计算过程流程图

四、实 验

我们采用He—Ne激光器的输出作为待测激光波长，进行了波长测量为重复性实验。图5(a)、(b)给出了在示波器上显示的由Fizeau干涉仪给出的等厚干涉条纹的光强分布照片。整个波形的轮廓近似为Gauss分布，这正是入射激光横向能量分布的反映。每一干涉条纹近似为正弦分布。



(a) 外轮廓 (b) 局部放大

图 5 Fizeau等厚干涉条纹光强分布的示波器照片

表1给出了干涉条纹周期 d_{FP} 、初位相 d_{PH} 、待测波长初值 λ_1 和终值 λ_2 的测量结果。表2为相应的误差计算结果。实验结果是令人满意的。

表1 测量结果

次数	d_{FP} (nm)	d_{PH} (nm)	初值波长 λ_1 (Å)	终值波长 λ_2 (Å)
1	366419.8	411503.0	6330.343	6330.925
2	366401.9	411700.1	6330.021	6330.926
3	366413.6	411317.5	6330.235	6330.924
4	366432.8	411643.9	6330.567	6330.925
5	366446.6	412706.6	6330.805	6330.932
6	366449.9	410946.9	6330.863	6330.922
7	366425.6	412384.1	6330.442	6330.930
8	366462.1	411077.8	6331.073	6330.922
9	366418.8	411752.1	6330.326	6330.927
10	366464.6	411842.1	6331.116	6330.927
11	366456.8	410979.1	6330.981	6330.922
12	366430.7	412300.4	6330.531	6330.929
13	366468.7	411383.5	6331.188	6330.924
14	366442.2	411562.2	6330.730	6330.925
15	366433.8	412349.9	6330.585	6330.930
16	366446.2	412677.7	6330.800	6330.932
17	366429.6	412928.5	6330.511	6330.933
18	366445.2	412322.0	6330.782	6330.930
19	366432.2	411686.8	6330.558	6330.926
20	366450.3	412324.5	6330.870	6330.930
平均值	\bar{d}_{FP} (nm) 366433.6	\bar{d}_{PH} (nm) 411869.4	$\bar{\lambda}_1$ (Å) 6330.666	$\bar{\lambda}_2$ (Å) 6330.927

表2 测量结果的误差

均方差	$\sigma(d_{FP})$	$\sigma(d_{PH})$	$\sigma(\lambda_1)$	$\sigma(\lambda_2)$
	17.90nm	595.43nm	0.309Å	0.003Å
相对误差	$\sigma(d_{FP})/\bar{d}_{FP}$	$\sigma(d_{PH})/\bar{d}_{PH}$	$\sigma(\lambda_1)/\bar{\lambda}_1$	$\sigma(\lambda_2)/\bar{\lambda}_2$
	4.8×10^{-6}	1.4×10^{-3}	4.8×10^{-6}	5.2×10^{-7}

如果精确标定Fizeau干涉仪的结构参数 α 、 L_0 ，那么可望获得结构简单、精度较高、可测连续和脉冲激光波长的新型波长计——Fizeau激光波长计。

本工作得到了王乃弘研究员的关怀和指导，张沛凤同志在光学加工方面给予了大力帮助，在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] F. V. Kowalski et al., J. Opt. Soc. Am., 1976, 66, 965
- [2] R. L. Byer et al., Laser Spectroscopy III, J. L. Hall and J. L. Carlson, eds. Springer—Verlag, 1977, 414—416.
- [3] J. J. Snyder, Laser Spectroscopy III, J. L. Hall and J. L. Carlson, eds, Springer—Verlag, 1977, 419.
- [4] 孙海音等, 中国激光, 1987, 14, No. 2, 145.
- [5] M. B. Morris et al., Appl. Opt., 1984, 23, 3862.
- [6] M. Born et al., Principles of Optics, 5th ed. Pergamon Press, Oxford 1975, Chap. VII.
- [7] J. J. Snyder, Appl. Opt., 1980, 19, 1223

Measurement of Laser Wavelength by Using Fizeau Interferometer

Zhang Tiejun Chen Fang Xu Fenming

Abstract

Measurement of laser wavelength by using Fizeau interferometer is reported in this paper. The repeat ability of this measurement is 5×10^{-7} .