

光波长测量仪器的分类、原理及研究进展

王利强¹, 左爱斌², 彭月祥³

(1. 北京邮电大学电子工程学院, 北京 100876; 2. 中国计量科学研究院, 北京 100013;
3. 北京石油化工学院自动化系, 北京 102617)

[摘要] 波长计分为斐索干涉型、法布里-珀罗干涉型和迈克尔逊干涉型 3 种。详细阐述了各种波长计的测量原理和研究现状, 比较了它们的异同, 其中迈克尔逊干涉型波长计测量精度最高。

[关键词] 斐索干涉, 布里-珀罗干涉, 迈克尔逊干涉, 波长计, 标准具, 光程差 [中图分类号] 043

[文献标识码] A [文章编号] 1000-7857(2005)05-0031-03

Classification, Principle and Progress of Wavemeters

WANG Li-qiang¹, ZUO Ai-bin², PENG Yue-xiang³

(1. Electronic Engineering School, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China;

2. National Institute of Metrology, Beijing 100013, China;

3. Automation Department, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: Wavemeters include Fizeau interference, Fabry-Perot interference, and Michelson interference meters. Principles and status of Wavemeters are formulized in details. Compared with the others, Michelson wavemeter is in highest precision.

Key Words: Fizeau interference, Fabry-Perot interference, Michelson interference, wavemeter, etalon, optical path difference

CLC Number: 043

Document Code: A

Article ID: 1000-7857(2005)06-0031-03

光波长测量仪器即波长计, 可用来标定调谐激光器的输出波长值, 或者用于测量未知激光的波长值。按照测量原理分类, 波长计主要有斐索干涉型、法布里-珀罗干涉型和迈克尔逊干涉型等 3 种。

1 基于斐索(Fizeau)干涉仪的波长计

J J Snyder 首次介绍了用干涉仪测量波长的方法^[1], 此后 Fizeau 波长计不断得到完善, 可以测量脉冲或连续激光器的输出波长^[1-3]。

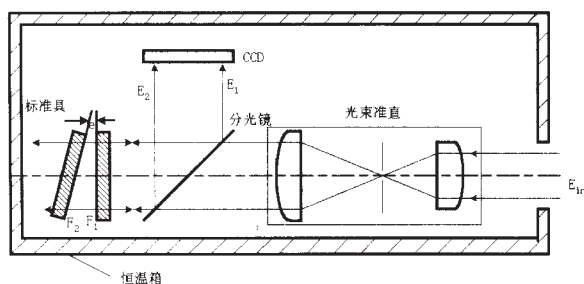


图 1 Fizeau 波长计装置结构

Fizeau 波长计装置结构如图 1 所示。F₁ 和 F₂ 是两个形成干涉仪的未镀膜表面。E_{in} 是输入光场, E₁ 和 E₂ 是分别从未镀膜表面 F₁ 和 F₂ 反射的光场, 这两束反射光在 CCD 探

测器上形成正弦型的干涉条纹, CCD 输出模拟信号, 再由取样放大器和模-数转换器(ADC)转换成数字信号, 读入计算机中进行计算, 最后确定光源的波长值。

在正入射条件下 (入射光束垂直于入射平面), CCD 探测器上干涉条纹的光强为:

$$I(x) = I_0 \left\{ 1 + A \cos \left[2\pi x \frac{2\alpha}{\lambda} + \frac{2e}{\lambda} \right] \right\} \quad (1)$$

式中, 常数 A (<1) 是从两个相干场振幅的微小不平衡产生的, λ 是输入激光波长, α 是有效楔角, e 为有效厚度。

为计算未知波长 λ_x, 依据薄膜干涉理论, 可知有效厚度 e 为:

$$2e = \left(m + \frac{\theta}{2\pi} \right) \lambda_x \quad (2)$$

式中: m (整数) 是干涉级次, θ (θ < π) 是 x=0 处的相位。

将式 (2) 代入式 (1) 得:

$$I(x) = I_0 \left\{ 1 + A \cos \left[2\pi x \frac{2\alpha}{\lambda_x} + \frac{2e}{\lambda_x} \right] \right\} \quad (3)$$

$$I(x) = I_0 \left\{ 1 + A \cos \left[2\pi x \frac{2\alpha}{\lambda_x} + 2m\pi + \theta \right] \right\}$$

$$= I_0 \left\{ 1 + A \cos \left[2\pi \frac{x}{x_x} + \theta \right] \right\} \quad (4)$$

$$x_x \equiv \frac{\lambda_x}{2\alpha} \quad (5)$$

收稿日期: 2005-04-04

作者简介: 王利强, 北京市海淀区西土城路 10 号北京邮电大学电子工程学院, 博士生, 主要研究方向为光电检测及信号处理;

E-mail: wrrw@eyou.com

x_x 是条纹周期。

波长计算过程描述如下。首先条纹周期 x_x 和相位 θ 是根据拟合数据计算得到的,用式(5)可得出近似波长 $\lambda_x^a = 2\alpha x_x$,由式(2)可计算精确的干涉级次,在干涉级次显然确定后,最终波长 λ_x^f 由下式给出:

$$\lambda_x^f = \frac{2e}{\left[m + \frac{\theta}{2\pi}\right]} \quad (6)$$

美国 New Focus 生产斐索干涉型波长计,其产品指标^[3]如下:波长测量范围为 0.4~1.0 μm ,精度为 1×10^{-5} 。国内中国科学院上海光机所曾在 1993 年研制成功斐索激光波长计^[4],精度为 0.01 nm。

斐索干涉型波长计不需内置参考光源,但测量精度低于法布里-珀罗干涉型和迈克尔逊干涉型波长计。由于温度对其测量精度影响很明显^[5],测量装置须放入恒温箱。

2 基于法布里-珀罗(Fabry-Perot)干涉仪的波长计

法布里-珀罗干涉型波长计是利用光束通过两块镀以高反射率、间距一定的玻璃板时产生多光束干涉的现象,测量待测激光波长^[6-7]。这种波长计可用来测量脉冲或连续激光器的输出波长,系统可采用多个不同厚度的标准具,下面以含有两个标准具的法布里-珀罗波长计为例介绍其工作原理^[3],装置结构如图 2 所示。

法布里-珀罗波长计通过波长值已知的参考激光和待测激光产生的干涉条纹进行比对,测量待测激光波长,波长测量过程如下:

$$\lambda_x = \frac{M_x}{M_r} \times \lambda_r \quad (7)$$

式中: λ_x 是待测激光波长, λ_r 是参考激光波长, M_x 是待测激光条纹数, M_r 是参考激光条纹数。

参考激光在标准具 A 产生的干涉条纹数量为:

$$M_A = 2nd_A / \lambda_r \quad (8)$$

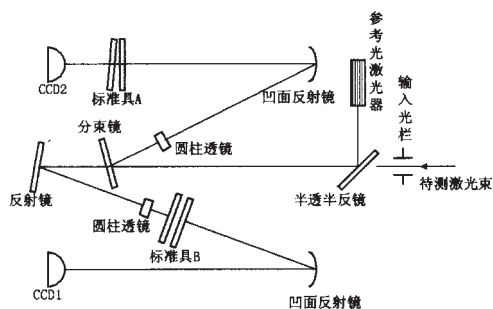


图2 法布里-珀罗波长计装置结构

λ_r^1 是由式(7)得到的参考激光波长近似值, d_A 是标准具 A 的镜面间距,由参考激光和楔角标定得到。

比较参考激光和待测激光的干涉级次,将 M_A 取整数,可以得到:

$$\lambda_x^1 = 2nd_A / M_{A0} \quad (M_{A0} \text{ 为整数}) \quad (9)$$

再确定标准具 B 的镜面间距 d_B ,得到:

$$M_B = 2nd_B / \lambda_x^1 \quad (10)$$

M_B 再精确取整,得到待测激光波长的最终值:

$$\lambda_x^f = 2nd_B / M_{B0} \quad (M_{B0} \text{ 为整数}) \quad (11)$$

目前,美国伯利(Burleigh)公司已经将法布里-珀罗干涉波长计商品化^[3],有两种型号:WA-4 000 和 WA-4 500。WA-4 000 型含有 1 个楔形标准具,测量精度为 1×10^{-4} ;WA-4 500 型含有两个楔形标准具,测量精度为 1×10^{-6} 。

3 基于迈克尔逊(Michelson)干涉仪的波长计

迈克尔逊波长计适合测量连续激光波长。其光学系统如图 3 所示。

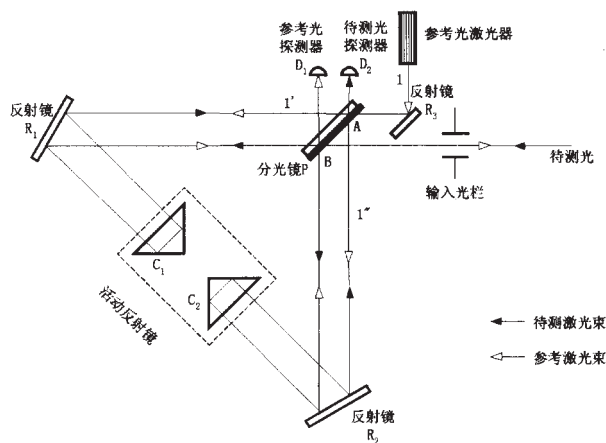


图3 迈克尔逊波长计结构

参考光源输出光束 1,经反射镜 R_3 进入分光镜 P,在点 B 分成透射光 $1'$ 和反射光 $1''$,透射光 $1'$ 经反射镜 R_1 进入可动反射镜 C_1 ,透射光 $1'$ 平行入射光线,从反射镜 C_1 返回到反射镜 R_1 ,回到分光镜 P 的 B 处,有一部分穿过分光镜,射出光栏;同时反射光 $1''$ 经反射镜 R_2 和反射镜 C_2 后,也返回到分光镜 P 的 B 处,光束 $1'$ 和 $1''$ 在 B 点汇合,发生干涉,由光探测器 D_1 接收,作为参考信号。

待测光由光栏射入,形成干涉条纹的过程与参考光相同,待测光分光点在 B 处,合光点在 A 处,干涉信号由光探测器 D_2 接收,作为待测信号。

待测光由光栏射入,与射出的参考光调整至重合;两个反射器 C_1 和 C_2 安装在同一可动的平行导轨上。在波长计工作时,驱动电机拖动导轨沿轴向连续往返平动,使参考光和待测光产生光程差,发生干涉现象,由光探测器 D_1 和 D_2 接收,由此得到它们的干涉条纹的信号,经过信号细分和计数电路分别获得参考激光和被测激光干涉条纹数。由于反射器 C_1 和 C_2 安装在同一运动导轨上,参考激光和被测激光的光程差相等。

如果可动反射镜的移动距离为 L ,参考激光产生的干涉条纹变化数量为:

$$N_r \lambda_r = 4n_r L \quad (12)$$

式中: λ_r 为参考激光的波长, n_r 为参考激光的空气折射率, N_r 为参考激光产生干涉条纹的数量。

对于待测激光,可以得到同样的公式:

$$N_x \lambda_x = 4n_x L \quad (13)$$

由公式(12)和(13),得到:

$$\lambda_x = \left(\frac{N_r}{N_x} \right) \left(\frac{n_x}{n_r} \right) \lambda_r \quad (14)$$

当可动反射镜沿轴向平移时,同时记录参考激光与被测激光两组不同的干涉条纹,根据两组条纹数比值与参考激光的真空波长值的乘积及空气折射率,可直接求得被测激光波长值。

迈克尔逊波长计的测量精度可达 1×10^{-6} ,最高可达 1×10^{-7} ,高于另外两种波长计。国外,伯利公司(Burleigh)、爱德万公司(Advantest)均生产迈克尔逊波长计^[8]。国内,中国计量科学研究院分别在 1991 和 1994 年采用迈克尔逊原理研制红外激光波长计^[9-10],其精度为 1×10^{-5} ,但未见后续报道^[11-17]。

4 结论

在光干涉测量仪器中,迈克尔逊波长计性能优于斐索和法布里-珀罗波长计,精度最高。在迈克尔逊波长计的基础上,参考光和待测光经光电探测器,由 A/D 采样,进入计算机,通过 FFT 变换,获得待测光的光谱,根据波长和光频的换算关系,可以得到待测光的波长值。多波长计可用于光通信中波分或频分复用系统中的多路激光的功率、信噪比和波长的测量。

参考文献(References)

- [1] 张峭峰,梁培辉.影响 Fizeau 波长计精度因素的分析[J].中国激光,1992,19(10):759~764
- [2] B Alipieva, B Stoykova, V Nikolova. Wavemeter with Fizeau interferometer for CW lasers [A].In:11th International School on Quantum Electronics: Laser Physics and Applications [C]. Proc. SPIE,2001(4397):129~133
- [3] 包学诚,秦莉娟,周志蕊.激光波长的标定——浅谈波长计的结

- 构原理与应用[J].上海计量测试,1998,(6):24~27
- [4] 徐毓光,余勤跃.费索激光波长计 [P].中国专利,专利号:93112393.3
 - [5] 宋建明,是度芳.利用斐索干涉测量激光波长[J].量子电子学报,2001,18(3):224~227
 - [6] T R Parker, M Farhadiroushan. Femtometer resolution optical wavelength meter [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(4):347~349
 - [7] Wojciech Skrzeczanowski, Marek Zyczkowski, Andrzej Dlugaszek. Laser wavelength meter—analysis of measurement uncertainties[C]. Proc. SPIE Vol. 3745:182~188
 - [8] Advantest. Michelson interferometer[P].Number: EP0478801
 - [9] 王百华,黄明坡,韦占凯,王纲.红外激光波长计[J].现代科学仪器,1991,(4):33~34
 - [10] 王纲,沈乃澄,等.红外激光波长计的原理及其研制[J].现代计量测试,1994,(4):6~12
 - [11] 高军毅,陈红兵,丁强.多重标准具游标法及激光波长计[P].中国专利,专利号:93104366.2
 - [12] 镭射通公司.监视—控制经可变的空滤光后的激光波长[P].中国专利,专利号:98811567.0
 - [13] 赵样,程晓辉,李达成.利用合成波长法实现纳米测量的方法[P].中国专利,专利号:00109499.8
 - [14] 薛实福,李庆祥,王伯雄,王剑.自扫描光电二极管阵列单频激光干涉测长仪[P].中国专利,专利号:89103380.7
 - [15] 于占海.Fizeau 激光波长计测量脉冲激光波长[J].光学精密工程,1999,7(3):109~112
 - [16] 于占海,许凤明,陈方.单片机控制的 Fizeau 激光数字波长计[J].光学精密工程,1999,7(2):97~100
 - [17] 程玉宝,周慧鑫,刘上乾.一种激光探测与波长测定装置的研究[J].光电工程,2002,29(6):25~27

(责任编辑 胡春华)

·科技动态·

《北京科技报》评出 2004 年中国 10 大科技骗局

《北京科技报》自改版以来,大力普及科技文化知识,高扬反对伪科学旗帜,2005 年初评选出了“2004 年中国 10 大科技骗局”,揭露了每个骗局的真相,并请有关专家进行了相应的点评。这 10 大科技骗局的具体内容如下。

[骗局一] 老中医“绝食”49 天

2004 年 3 月 20 日至 5 月 7 日,四川泸州个体老中医陈建民在四川雅安市碧峰峡十几米高、昼夜温差极大的玻璃八卦房中,在只饮用矿泉水、不摄入其它任何营养性物质的情况下,仍然每天坚持学习工作达 8 小时以上,最终“成功禁食 49 天”。

[骗局二] 发现成吉思汗陵

日本媒体和英国《泰晤士报》2004 年 10 月 5 日及 6 日分别报道,一支分别来自日本和蒙古的联合考古队宣布:他们找到了成吉思汗“灵庙”(成吉思汗陵中关键建筑)。“如果此发现属实,或许就会成为 21 世纪最伟大的考古发现。”

[骗局三] 干细胞美容使你年轻

2004 年上半年,广州和深圳若干干细胞产品“成功面世”,“可以使人一下年轻 10 至 15 岁”。其中一种名为“诺曼茜”的产品称,该产品由美国青春再造国际医美研究中心研制,获美国 FDA 批准认证,并称该中心是美国联邦政府直属的总统御用医护惟一机构。

[骗局四] “软体飞机也能上天”

2004 年 11 月 15 日,有媒体报道,河南师范大学高级工程师张丙炎自 1993 年起,历时 11 年研制出新型“软体飞机”。该飞机采用特殊的高强度纤维面料,除发动机和机架外,没有任何硬质的金属材料,故称“软体飞机”。

[骗局五] “人体增高术”

2004 年春节后,一种叫“高乐美 1+1”的保健食品的广告语这样写道:“科学多长 10 厘米不再是梦想!”

[骗局六] 再传永动机神话

梁星人,号称永动机发明人,其所在的海南星人永动机发电厂有限公司称,将建设装机总容量 300 万 KW 的宇宙引力能发电厂及年产 10 万辆宇宙引力能小轿车厂项目。梁称,他发明的永动机推翻了能量守恒定律。

[骗局七] “中国人获诺贝尔贡献奖”

据报道,2004 年 11 月 30 日,在第 42 届世界传统医学会议上,北京某神经学研究院院长等 5 名中国人获得了大会颁发的“诺贝尔贡献奖”。

[骗局八] 中学课本《悲壮的两小时》

人民教育出版社新版中学初中《语文》教材第五册的这篇课文叙述:1967 年 8 月 23 日,前苏联著名宇航员弗拉迪米尔·科马洛夫在驾驶“联盟 1 号”宇宙飞船归航进入大气层时,突然发现减慢降落伞出现故障无法打开,只能面对着陆坠毁的现实。苏联当局在此过程中对这一情景做了实况直播,并请科马洛夫家人在他生命中的最后两个小时与家人告别。

[骗局九] 重庆“衣物百慕大”

2004 年 10 月有媒体报道,重庆江津杜市镇梅湾村住在半山腰的村民们只要衣裤一离身,就会莫名其妙地出现破洞或类似刀割的划痕。32 年来,这种现象一直持续至今。有人将其称为“衣物百慕大”。

[骗局十] “汲取宇宙精华的太空蚂蚁”

有媒体报道,2004 年 10 月 15 日 10 时 43 分,我国第 20 颗返回式科学试验卫星带回了一群汲取宇宙精华的“太空蚂蚁”;“受外太空环境对生物的遗传变异影响,这些蚂蚁弥足珍贵,它们发生的物理、化学及生物学变化将成为科学研究的重要内容。”送“太空蚂蚁”上天的某公司董事长称,“蚂蚁”太空科学试验将对我国遗传学、育种学、营养学、生物工程学等发展起重要推动作用。

(本刊编辑部根据 2005 年 1 月 4 日《北京科技报》相关报道整理而成)