

一种基于劈尖干涉的激光波长测量装置的研究

吴海波, 杨仕广, 程玉宝, 焦 洋

(解放军电子工程学院脉冲功率激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:基于激光在光学劈尖表面上产生干涉条纹的特点,设计了一种激光波长测定装置。利用线阵 CCD 将激光垂直照射光学劈尖表面时所生成的干涉条纹感应成电信号并转移输出,经过线性放大、模数转换后变成有限长的离散周期序列,通过快速傅里叶变换测定条纹间距来计算出激光波长,并用 532 nm, 632.8 nm, 980 nm 三种波长的激光进行了测试。测试结果表明该装置在背景光不是太强的情况下,性能令人满意,精确度较高,并能从虚拟仪器面板上直观形象地观察信号波形和结果,具有一定的实用性。

关键词:激光波长;劈尖干涉;FFT;LabVIEW

中图分类号:TN247 **文献标识码:**A

Study of laser wavelength determining device based on wedge interference

WU Hai-bo, YANG Shi-guang, CHENG Yu-bao, JIAO Yang

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, PLA, Hefei 230037, China)

Abstract: Based on the property that laser generates interference fringes on optical wedge, a device is designed to determine the wavelength of the incident laser. When laser is shining optical wedge vertically, a linear CCD is used to induce the interference fringes and output electric signal, then the signal is filtered, amplified and transformed into digital signal, which is a discrete periodic sequence with finite length. The laser wavelength can be calculated through determination of fringe gas by FFT, and three kinds of laser having wavelength of 532 nm, 632.8 nm, 980 nm are used for test. The test results indicate that the device has satisfactory property and perfect precision under low background. In addition, the signal wave and the experimental results can be observed intuitively on the front panel of the virtual instrument, and this device is practicable to a certain extent.

Key words: laser wavelength; wedge interference; FFT; LabVIEW

1 引言

随着激光技术的广泛应用,很多场合需要激光波长测定装置,激光波长的直接探测主要采用相干探测法。目前国内外现有的激光波长相干探测技术主要有^[1]:法布里-珀罗型波长相干探测法、迈克尔逊型波长相干探测法、光纤干涉型波长相干探测法等,这些波长相干探测技术各具优缺点。法布里-珀罗标准具对激光的空间相干性要求较高,须采用四标准具的探测方式,制作难度大;迈克尔逊型波长探测技术只能在实验室进行原理性试验,不能解决在室外因激光衍射造成干涉圆环重叠难题,无法精确探测激光波长^[2];光纤干涉型波长探测技术具有一

定的先进性,但难以精确地控制相移,探测误差较大。

基于上述因素的考虑,我们采用的是一种基于劈尖干涉的激光波长相干探测方案。该方案利用时间相干性探测激光^[3],避免了空间相干性的缺点,且不存在激光衍射,也不需要相移控制,易于实现,成功地弥补了上述三种激光波长相干探测的不足。

2 测量原理

当一束平行激光垂直照射光学劈尖的表面时,光束在劈尖所夹的两面之间多次反射,由于激光的

作者简介:吴海波(1986-),男,硕士研究生,研究方向为光电检测及信号处理。E-mail: wuhaibo1986@163.com

收稿日期:2009-02-25

相干特性,会在劈尖的上、下表面上产生明暗相间的干涉条纹^[4],如图1所示,任何两个相邻的明条纹(或暗条纹)之间的距离 L 为:

$$L = \frac{\lambda}{2n\sin\theta} \quad (1)$$

式中, θ 为劈尖的夹角; n 为劈尖的折射率; λ 为激光的波长。

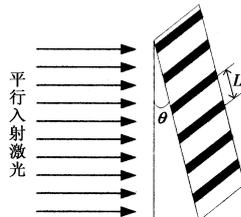


图1 激光在劈尖上产生干涉条纹

若能测出干涉条纹的间距 L ,则由上式可计算出入射激光的波长 λ 。为了使用方便,本装置利用的是劈尖下表面的干涉条纹,图2为采用波长632.8 nm的平行激光垂直照射劈尖表面时形成的透射干涉条纹局部放大后的图像。

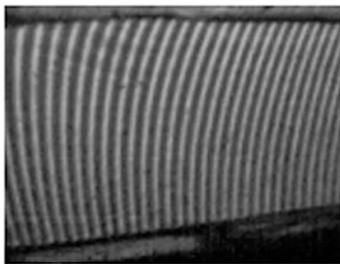


图2 劈尖干涉条纹局部放大图

3 系统设计

3.1 总体结构

该激光波长测定装置的结构组成如图3所示。在装置中,波长待测的平行激光垂直照射光学劈尖,线阵 CCD 紧贴光学劈尖,在一定的积分时间内,线阵 CCD 每个感应像元所产生的光生电荷的多少取决于入射光的强度。对线阵 CCD 输出的线性放大后的电信号进行 A/D 转换(转换的采样脉冲来自 CCD 像元移位输出的脉冲),转换后的数据变成有限长的离散周期序列,将其存入存储器中,然后通过 USB 传输线送入到计算机,由计算机对其滤波后进行数字信号处理,进而得到条纹间距,求出入射激光的波长,并在电脑屏幕上显示出测量结果。

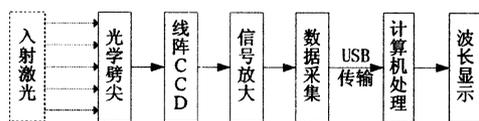


图3 激光波长测定装置的组成框图

3.2 组成部分

光学劈尖可用两块平板玻璃夹一小角构成,在

其上、下表面分别镀上反射膜,实现多光束干涉。劈尖的干涉条纹与劈尖夹角 θ 和反射率 R 有关: θ 不能太大,否则干涉条纹太密,对比度不好,但 θ 太小又会使得劈尖上的干涉条纹太少,影响条纹间距的探测精度; R 越大,透射光的对比度越好,但峰值透射率越低,且面形加工要求越高。综合考虑,本系统光学劈尖的夹角 θ 固定为 0.195° ,反射率 R 定为 0.4 。

本装置中采用的线阵 CCD 是日本东芝公司生产的 TCD1209D,典型时钟频率 1 MHz,光谱响应范围 $0.4 \sim 1.1 \mu\text{m}$,像元尺寸: $14 \mu\text{m} \times 14 \mu\text{m}$,共有 2048 个像元。

线阵 CCD 驱动脉冲电路和信号线性放大模块都被集成在一块 CCD 驱动板上(如图4所示),控制 CCD 工作的时序脉冲信号由一块 CPLD 芯片 - EPM7064S 产生。驱动电路板上还安装有调整输出放大器电压放大倍数和阈值的可调电位器 W1 和 W2,通过调整它们可以调整放大器对强、弱光的适应能力和暗信号的输出电平。

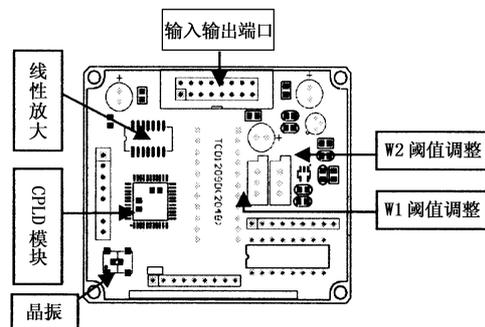


图4 TCD1209D 驱动板

数据采集与 USB 传输电路采用 AD08S - USB。AD08S - USB 是与线阵 CCD TCD1209D 驱动系列配合的 A/D 数据采集卡,且携带 USB 数据传输功能。从 CCD 驱动板上 I/O 口输出的信号,通过高速 A/D 芯片进行模数转换,转换后的数据变成有限长(2048 点)的离散周期序列,将其存入静态缓存中,然后通过 USB 接口传输到计算机上处理。

整个系统的实物装置如图5所示,由核心时序模块控制以上各单元保持同步。

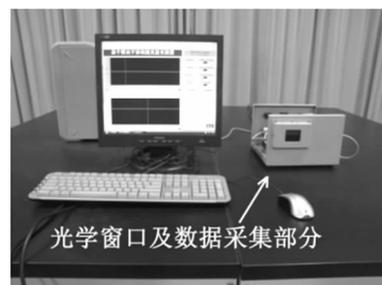


图5 系统实物图

4 信号处理

激光在劈尖的下表面产生的明暗相间的干涉条纹是频率较低的空域周期信号,其变化又具有一定的梯度,经过线阵 CCD 传感后,则变换为周期性的随着时间变化的电压信号(即完成了从空间域到时间域的转变)。因此,线性放大后的 CCD 输出信号可表示为:

$$x(t) = A\sin(2\pi ft + \phi) + B \quad (2)$$

式中, f 是干涉条纹的空间频率,由入射激光的波长决定; A, B 由入射激光的光强和背景光决定。

4.1 精确探测条纹间距

从理论上讲,平行激光在劈尖上产生的干涉条纹是均匀的,且平行于劈棱,但 CCD 实际输出的电压信号不是理想的正弦波,如图 6 所示。主要原因是:透镜和空气中的尘埃对光束的影响,以及光学劈尖表面的光洁度存在细小的差异等,它们都会引起干涉条纹的畸变和疏密不均。对于这种噪声较大、周期不稳定的正弦信号,用快速傅里叶变换(FFT)可以精确地求出其周期。

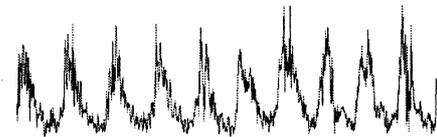


图 6 由 CCD 输出经过线性放大后的电信号

设数据采集卡采集的一帧数据是离散序列 $x(n)$ (序列长度为 $N, 0 \leq n \leq N$, 序列中包含多个周期),由离散傅里叶变换的理论可知^[5], $x(n)$ 的频谱 $X(k)$ 仍然是一个长度为 $N(0 \leq k \leq N)$ 的频域有限的序列,且其绝对值 $|X(k)|$ 在非 0 频率处(除去直流分量)的最大值所对应的 K (也就是在第 K 次谐波频率处的频谱最大)就是序列 $x(n)$ 中包含的周期的个数,所以 $x(n)$ 的序列周期为:

$$M = \frac{N}{K} \quad (3)$$

由于 A/D 采样速率与 CCD 像元移位输出的脉冲同步,每当 CCD 输出一个像元信号,就进行一次 A/D 转换,将结果存储一次。那么对应于干涉条纹的一个空间周期(即条纹间距)平均占用线阵 CCD 的像元数也为 $\frac{N}{K}$, 则条纹间距为 $L = d \times \frac{N}{K}$ (μm) (d 为线阵 CCD 像元的点心距, $d = 14 \mu\text{m}$)。该装置的光学劈尖夹角 $\theta = 0.195^\circ$, 折射率 $n = 1$, 代入式(1)得该装置测得的激光波长为:

$$\begin{aligned} \lambda &= 2nL\sin\theta = 2 \times 1 \times \sin 0.195^\circ \times 14 \times 1000 \times \frac{N}{K} \\ &= 95.1671875 \times \frac{N}{K} \text{ (nm)} \end{aligned} \quad (4)$$

4.2 软件实现

本系统的软件实现以美国 NI 公司的 LabVIEW 作为开发平台。LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering) 是一种图形化的编程语言,利用它可以方便地建立自己的虚拟仪器。

软件设计流程图如图 7 所示。整个程序采用堆叠顺序结构^[6],软件编程过程中直接调用线阵 CCD USB AD 数据采集卡 SDK (SDK 是配合线阵 CCD USB AD 数据采集卡推出的软件开发包)来完成数据采集,信号处理子程序中的 FFT 部分也可直接调用 LabVIEW 中的相应模块。

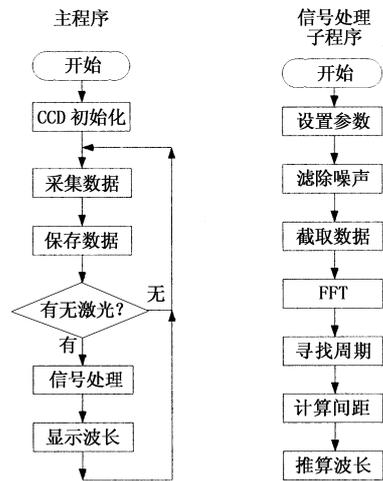


图 7 系统软件流程图

图 8 为虚拟仪器前面板,面板左部分动态显示时域波形及相应的频谱图,右部分实时显示测得的激光波长数值和对应的 K 值,还可设置波长测量时的一些参数。

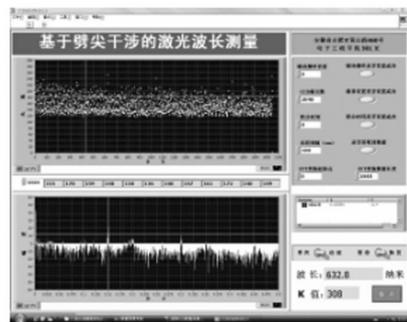


图 8 632.8 nm 激光照射时波长测量结果

5 实验结果及分析

我们选用了三种波长的激光光源进行测试,分别是:波长为 632.8 nm 的 He - Ne 激光器,功率为 20 mW; 532 nm 的半导体激光器,功率 5 mW; 980 nm 的半导体激光器,功率 10 mW。激光器出射的光束都经过望远镜系统准直扩束后再垂直照射到劈尖表面上。实验数据如表 1 ~ 3 所示。

表1 不同长度的 FFT 变换数据情况下实验记录

激光波长 /nm	FFT 起始点	FFT 数据长度	周期个数 (K 值)	测得波长 /nm	测量误差 /%
632.8	0	2048	308	632.8	0
	0	1024	153	636.936	0.654
	0	512	77	632.8	0
	0	256	38	641.126	1.316
	0	128	19	641.126	1.316
	0	64	10	609.07	3.75

表2 不同区间的 FFT 变换数据情况下实验记录

激光波长 /nm	FFT 起始点	FFT 数据长度	周期个数 (K 值)	测得波长 /nm	测量误差 /%
532	512	1024	183	532.52	0.0977
	0	1024	182	535.446	0.648
632.8	512	1024	154	632.8	0
	0	1024	153	636.936	0.654
980	512	1024	100	984.356	0.444
	0	1024	99	974.512	0.56

表3 不同入射激光波长情况下实验记录

激光波长 /nm	FFT 起始点	FFT 数据长度	周期个数 (K 值)	测得波长 /nm	测量误差 /%
532	1024	512	91	535.446	0.648
632.8	1024	512	76	641.126	1.316
980	1024	512	49	994.4	1.47

从上表中我们可以看到,该装置对 0.4 ~ 1.1 μm 范围内几种典型波长激光的测量结果相当精确,合理设置工作参数,可将测量误差控制在 1% 以内。实验中还发现,较强的背景光容易引起 CCD 饱和,不能探测入射激光波长。

采用 632.8 nm 的激光作为光源照射时,出现了几组误差为 0 的情况,这是系统定标的结果。因为在系统中所用的劈尖角度不可能和出厂制造时完全一样,必然有一定的误差存在,为了将整个系统的误差降至最小,我们选用波长较为稳定的 632.8 nm 的 He-Ne 激光进行定标^[7],即假设用此波长的激光实验时测量结果完全正确,使用反推法计算出劈尖夹角约为 0.195°,将其代入公式(1)中得到标准的换算公式,其他波长的激光均依此计算得出。

综合表 1 ~ 表 3 中的实验数据,我们可以得到以下几个结论:

(1) CCD 的有效像元数越少,系统误差越大;参与 FFT 变换的数据越少,系统误差越大。

(2) 选择中间一段数据进行 FFT 变换所得到的

结果比选用靠近 CCD 一端的数据误差要小。这是由于 CCD 在两端存在盲元,且中间部分的光敏单元感光性能和均匀性比两端要好。

(3) 当激光波长较短时,测量精度较高;当激光波长较长时,测量误差较大。其实这是周期信号加窗后截取了非整数个周期造成的。对于不同波长的激光干涉条纹,采样序列包含的信号周期数 K 不一定为整数, $|X(k)|$ 的主峰值位于离散点 $k = \text{int}(K)$ 处 ($\text{int}()$ 是取整函数),与理论峰值的位置 K 之间有一个误差 Δk 。当激光波长较短时,干涉条纹较窄,序列包含的信号周期数较多, K 较大, Δk 对测量精度的影响很小。随着激光波长的增大,采样序列包含的信号周期数减少, Δk 的影响使得测量误差增大。所以要提高系统的测量精度,应尽量选择像元数多的 CCD,提高数据的采样频率,使参与 FFT 的离散数列点数增多。

6 结论

基于劈尖干涉的激光波长测量装置运用相干识别法的原理,既可在一个宽波段的范围内探测激光,又避开了传统装置成本高、结构复杂等不利因素。虚拟仪器技术的运用使装置的实用性大大加强,友好的界面方便了用户的使用和调试。实验结果表明:该方法是可行的,装置成本低,工作实时性好,测量精确度高,操作简便。

本装置不仅可作为激光波长测量装置使用,还能从背景光中鉴别出激光的有无,若更换为红外波段(如 3 ~ 5 μm , 8 ~ 14 μm) 的 CCD 来测量红外波段的人射激光波长,则可用于激光探测和告警系统中,有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] Laser Warning System and Method: WO, 2004/001440A1 [P]. 2003: 10 - 31.
- [2] 张洁. 激光告警设备的组成和工作原理[J]. 航天电子对抗, 2002(2): 42 - 46.
- [3] 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.
- [4] M 波恩, E 沃耳夫. 光学原理: 上册[M]. 杨葭荪, 等译校. 第 7 版. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [5] 程佩青. 数字信号处理教程[M]. 第 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [6] 侯国屏, 王坤, 叶齐鑫. LabVIEW7.1 编程与虚拟仪器设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [7] 周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 第 5 版. 北京: 国防工业出版社, 2007.