

文章编号:1002-2082(2016)02-0303-05

# 一种高精度激光吸收率测量装置

高爱华,王少刚,闫丽荣

(西安工业大学 光电工程学院,陕西省薄膜技术与光学检测重点实验室,陕西 西安 710021)

**摘 要:**针对现有激光吸收率测量的不足,在总结现有激光吸收率测量方法基础上,设计了一种积分球法激光吸收率测量装置。增加了导光管结构,并对光源进行了监测,对光束进行了调制。采用相关检测和同步采集等方法,有效地去除了背景噪声、探测器及检测电路噪声对测量的影响。并实验比较了安装导光管前后装置对样品吸收率的测量影响,并对多个样品进行实验。结果表明,对于样品反射率在  $10 \times 10^{-6} \sim 10\,000 \times 10^{-6}$  范围内,装置的测量误差可以达到  $\pm 2\%$  以内,实现了激光吸收率的高精度测量。

**关键词:**积分球;吸收率;噪声;导光管

中图分类号:TN247

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201637.0207001

## High-precision laser absorption rate measuring device

Gao Aihua, Wang Shaogang, Yan Lirong

(Laboratory for Thin Film Techniques and Optical Test, School of Optoelectronics Engineering,  
Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** Aiming at the deficiency of the existing laser absorption rate measurement, a laser absorbing rate measuring device based on integrating sphere method was designed on the basis of the existing laser absorption rate measurement device. The light tube structure was added, the light source was monitored, and the light beam was modulated. The method of correlation detection and synchronous acquisition was adopted, which could effectively remove the influence on the measurement of background noise, detector noise and detection circuit noise. Furthermore, the influence of the light tube on the sample absorption rate was compared in experiment, and the experiments on multiple samples were carried out. The results show that the measurement error of the device can reach  $\pm 2\%$  or less for the sample reflectance in the range of  $10 \times 10^{-6} \sim 10\,000 \times 10^{-6}$  ppm, which indicates that high-accuracy measurement of laser absorption rate is achieved.

**Key words:** integrating sphere; absorption rate; noise; light tube

## 引言

在激光与材料的相互作用过程中,照射到材料上的激光,一部分被材料吸收,另一部分则被材料反射和透射。材料对激光的吸收作用除了在激光伪装和激光防护等军事和民用领域有着极高的

应用价值外,在许多场合,也是要引起高度重视的因素。如光学实验室中高精度测试系统,所有与测试无关的表面均要求其黑化处理,以便最大限度地吸收杂散光,防止其表面的反射光影响测试系统的精度。表征材料对激光吸收能力大小的参

收稿日期:2015-09-06; 修回日期:2015-11-10

基金项目:陕西省工业科技攻关项目:(2015GY048);总装基金项目:(9140A18020214BQ52001)

作者简介:高爱华(1967—),女,湖北孝感人,教授,硕士生导师,主要从事光电测试技术、信号处理研究。

E-mail: freegah@126.com

数是吸收率。吸收率测量是材料对激光吸收研究的基础。随着科学技术的发展,对吸收率的测量精度要求越来越高。

## 1 现有主要吸收率方法比较

激光吸收率即吸收功率和入射功率之比。目前吸收率测量方法主要有三类:第一类方法是从量热角度出发,通过测量材料的温度变化并进行相应的热力学计算而得到吸收率。主要方法包括利用集总参数法计算吸收率、利用有限差分法的一维和二维的非稳态传热学模型计算吸收率<sup>[1-2]</sup>。此类方法有使用前提条件,即样品内部导热热阻与表面换热热阻之比小于0.1,这限制了其使用范围。第二类方法是根据激光作用区材料状态发生变化的情况来间接研究吸收情况<sup>[3]</sup>,其原理主要是通过测量激光热作用区的几何尺寸来对吸收率进行间接评定,这类方法一般只能对吸收率进行定性评价。第三类方法是通过测量样品反射率和透射率,由1减去反射率和透射率求出吸收率<sup>[4]</sup>。

对于第三类方法,如果只是简单地直接测量反射率和透射率来获取吸收率,一般测量误差会比较大。甚至一些测量环境的影响也会造成不可忽略的测量误差。如现有技术一般未考虑普通环境下空气中灰尘等颗粒散射问题。对于高吸收率测量,空气中灰尘颗粒的散射损耗会产生很大误差。同时背景噪声、探测器及检测电路噪声也会对测量产生误差<sup>[5-6]</sup>。

针对现有积分球法激光吸收率测量技术的不足,设计了一种新的积分球法激光吸收率测量装置,通过利用导光管对光路中颗粒散射进行屏蔽和吸收,同时对光源进行调制,并配合相关检测和同步采集等方法实现对背景噪声、探测器及电路噪声的去除,实现激光吸收率的高精度测量。

## 2 高精度激光吸收率测量装置的设计

### 2.1 基本原理

根据能量守恒定律,对于样品,其吸收率 $\alpha_s$ 为

$$\alpha_s = 1 - \rho_s - \rho_T \quad (1)$$

式中: $\rho_s$ 表示样品的反射率; $\rho_T$ 为样品的透射率。所以吸收率的测量可以通过对样品反射率和透射率的测量实现。

积分球是一个内壁涂有理想漫反射物质的空心球,积分球内壁任一点照度只与球壁反射率和入射光通量成正比,与球半径成反比,积分球内壁任意一点照度(除光束投射面处)是均匀的<sup>[7]</sup>。

对于不透明高吸收率材料的吸收率测量,透射率可以忽略不计,可以利用积分球收集材料的总反射光,通过材料反射率的测量来计算其吸收率。

### 2.2 测量装置设计

影响吸收率测量精度的主要因素有:空间背景光产生的噪声,空气中灰尘等颗粒散射噪声,探测器及电路的噪声,以及光源功率波动产生的误差。本装置为了克服这些不利因素,从光路设计到信号处理进行了综合设计,从而实现了材料高精度吸收率的测量。

激光散射率测量装置示意图如图1所示,主要包括光学部分和控制部分。

图1中1为激光光源,2为声光调制器,3为光束整形组件,4为透反镜,5为反射镜,6为第一开口,7为积分球,8为导光管,9为第二开口,10为样品,11为第三开口,12为第一光电探测器,13为保护挡板,14为第二光电探测器,15为第一锁相放大器,16为第二锁相放大器,17为同步数据采集单元,18为波形发生器,19为光学平板,20为光学平台,21为计算机。

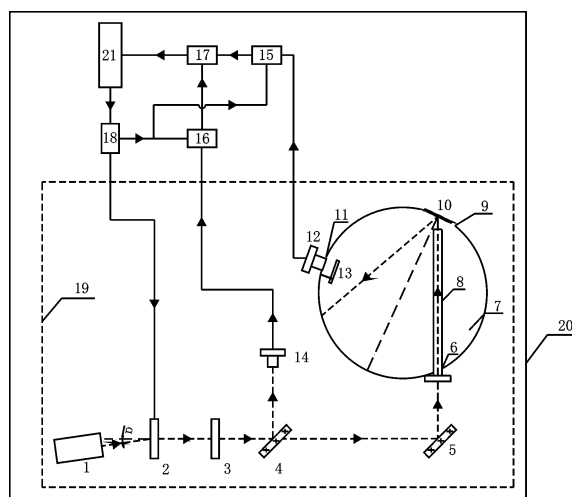


图1 装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of device

#### 2.2.1 光学部分

为了消除空间背景光对光路的干扰和探测电路的漂移对测量的影响,实现微弱信号检测,提高信噪比和测量灵敏度,设计了该光路,主要由激光

光源、声光调制器、光束整形组件、透反镜、反射镜和积分球结构组成。

采用相关检测技术去除背景光噪声及探测器电路噪声。因此需要对光束进行调制,利于后期信号处理。本设计采用声光调制器对光束进行调制,激光以布拉格角入射进入声光调制器<sup>[8]</sup>,利用其一级衍射光作为测量用入射光,这种设计避免了沿入射光路反射回激光光源的光对激光光源出光功率的影响。

由于激光束存在发散角,在光路中加入了光束整形组件,对光束进行整形,利于后期测量和信号处理。

光路采用透反镜分光,一路用于对激光功率波动的监测并用作基准光的测量,另一路用作测试的入射光。并采用计算机同步采集计算的方法有效去除光源瞬时功率波动对测量造成的误差。

对于测量光路上灰尘颗粒物散射的影响,由于对参考光和测量光采用同步数据采集,分光镜 4 之前的光路上灰尘颗粒物散射造成的波动可以归类为光源的波动,主要是要减少分光镜 4 之后光路上的颗粒物散射光,设计中尽量缩短从分光镜 4 到积分球入射口的光路,那么由于积分球内部光路上颗粒物的散射又被积分球收集混合于被测反射光中,变成了影响测量精度的主要因素之一。

如图 2 所示,在积分球部分,设置有导光管,且管内壁黑化处理,外壁与积分球内壁处理相同。导光管一方面吸收了颗粒散射光,避免其对测量造成影响,另一方面也阻挡了第一开口的背景光进入积分球对测量产生误差,提高了测量精度。

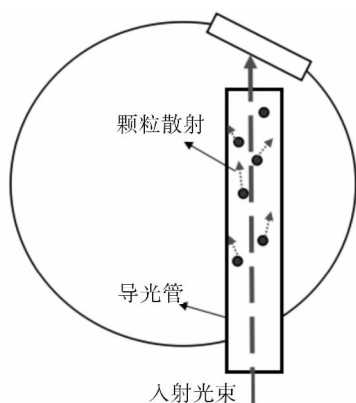


图 2 积分球结构

Fig. 2 Integral sphere structure

### 2.2.2 控制部分

控制部分主要采用了相关检测技术和同步采

集方法,包括第一锁相放大器、第二锁相放大器、同步数据采集单元和波形发生器<sup>[9]</sup>。

计算机控制波形发生器输出方波信号驱动声光调制器,同时方波信号被送至锁相放大器,用作相关运算的参考信号。透反镜的反射光由其光路上的光电探测器转换成电信号,此电信号经锁相放大器后输出去噪后的电压信号,该电压信号经同步数据采集单元后送入计算机,获取对应的基准光功率信号。经过透反镜的透射光经导光管照射到被测样品上,由于样品是高吸收率材料,大部分光被吸收,反射光(或称为散射光)被积分球收集,通过第一光电探测器输出电信号经锁相放大器后输出去噪后的电压信号,信号经同步数据采集单元采集后送入计算机,获取对应的反射光功率信号,经数据处理计算得到样品吸收率。

## 3 实验结果

依据图 1 所示装置示意图搭建好实验系统,以高稳定功率氦氛激光器为光源,以贴有黑色绒布平板为样品,在基于 Labview 环境下分别测量了积分球不安装导光管和安装导光管时的激光吸收率<sup>[10]</sup>。第一探测器测量数据的原始波形如图 3 和图 4 所示。

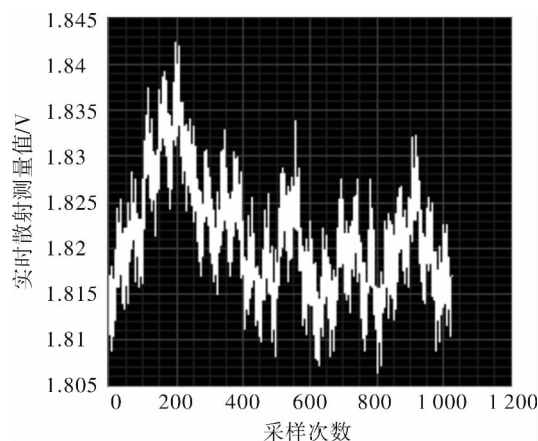


图 3 不安装导光管时的原始测量数据波形

Fig. 3 Waveform of original measurement data without installation of light tube

每次测量,计算机存储 1 000 个原始数据,通过对这 1 000 个数据再进行去噪处理,去掉其中 20% 的最大值和 20% 的最小值,对剩余的值求平均得到本次测量值,即对应于样品散射(也可称为反射)到积分球内的光功率信号。

从结果可以看出,同样的测试条件下,不安装

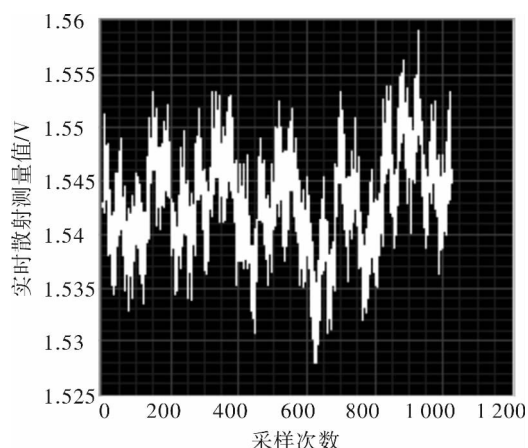


图4 安装导光管时的原始测量数据波形

Fig. 4 Waveform of original measurement data when light pipe is installed

导光管测量数据明显增大,波动也加大。可见导光管的增加极大地减小了积分球内光路上的空气中灰尘等颗粒散射激光对测量的影响,极大提高了测量精度。

选用功率波动在 $\pm 0.2\%$ 内的高精度氦氛激光器为入射光源,改变光电倍增管的供电电压从而改变其放大倍数,适应不同吸收率样品的测量。

图5是基于Labview环境下运行的实时测量界面,包括样品的坐标点显示(左上),原始测量的反射值(左下,图中用了散射值表示),以及放大坐标系中的实时测量显示(右下),计算机进行处理后的本次测量数据(右上)等。

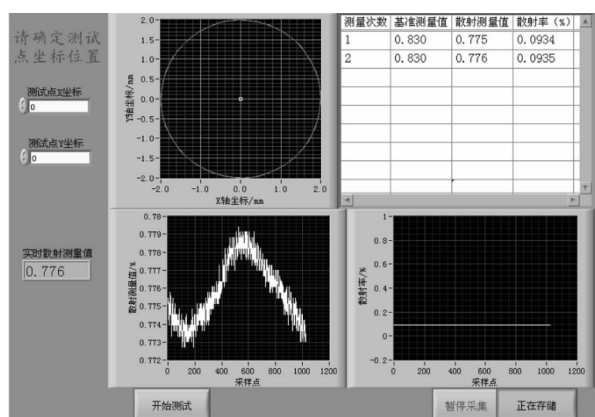


图5 基于LabVIEW的实时测量界面

Fig. 5 Real-time measurement interface based on LabVIEW

经过多个样品的多次测量验证,对于样品反射率在 $10 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$  ppm范围内,装置的测量误差可以达到 $\pm 2\%$ 以内。这样的反射率对应的吸收率在99%以上。对于低吸收率的样品测量,可以先在光路中增加衰减片,将光功率衰减到

倍增管的检测范围后进行测量。因此本装置可以实现大范围激光吸收率的高精度测量。

## 4 误差分析

### 4.1 积分球结构误差

由于环境灰尘颗粒的存在,入射光在积分球内的光路上产生的散射光全部被积分球收集,产生噪声信号。传统积分球光路未做任何处理,造成噪声光直接叠加到信号光上,产生噪声干扰,且由于空气流动性,使噪声信号大小随时变化,对测量产生波动,产生测量误差。本设计在积分球内添加导光管,激光在球内入射光路上产生的散射绝大部分被导光管吸收,不会对测量信号产生影响,极大地提高了测量的信噪比。

### 4.2 测量仪器设备误差

主要有光源波动误差,背景光噪声以及探测器电路零点漂移产生的误差。传统测量吸收率都是进行直接测量,未针对这些误差来源进行处理。本设计采取了对光源波动监测,对光进行调制,利用相关检测和同步采集方法来消除背景光和探测器电路零点漂移带来的测量误差,实现高精度测量。

## 5 总结

本装置不仅适合高吸收率样品吸收率的精确快速测量,在入射光路的声光调制器和光束整形组件之间设置衰减片,可实现对低吸收率样品进行测量。可根据需要换用不同波长的激光光源,同时可以方便快捷地定量检测样品对于激光的吸收率,避免了空气中灰尘颗粒的散射造成的测量误差,不受环境杂散光干扰,容易操作,便于重复测试。

## 参考文献

- [1] Lin Xiuchuan, Shao Tianmin. Lumped method for measurement absorption rate of materials[J]. Acta Physics Sinica, 2001, 50(5): 856-859.  
蔺秀川,邵天敏. 利用集总参数法测量材料对激光的吸收率[J]. 物理学报, 2001, 50(5): 856-859.
- [2] Huang Jinqu, Gu Jianfeng. Laser absorptivity measurement of dual-phase steel during laser heat treatment[J]. Heat Treatment, 2014, 29(4): 52-54.  
黄金秋,顾剑锋. 双相钢激光热处理时激光吸收率的

- 测定[J]. 热处理, 2014, 29(4): 52-54.
- [3] Wang Ruihua, Lin Wenqing. Bulk-absorption calorimeter for high power pulsed laser high[J]. Chinese Journal of Laser, 1980(8): 51-53.  
王瑞华, 林文清. 高功率脉冲激光的体吸收卡计[J]. 中国激光, 1980(8): 51-53.
- [4] Gong Bao, Na Hongyue, Zhao Guolan. Reserch in measurement of solar spectral absorptance[J]. Journal of Astronautics, 1983(3): 89-104.  
龚堡, 那鸿悦, 赵国兰. 太阳光谱吸收率的测量[J]. 宇航学报, 1983(3): 89-104.
- [5] Fang Wei, Jin Xifeng. Development of a compensate dual-conical cavity absolute radiometer [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 1992, 13 (3): 406-411.  
方伟, 金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制[J]. 太阳能学报, 1992, 13(3): 406-411.
- [6] Fang Wei, Yu Bingxi. A kind of absorption rate measuring device: China, 03212220. 9 [P]. 2004-11-24.  
方伟, 禹秉熙. 一种吸收率测量装置: 中国, 03212220. 9[P]. 2004-11-24.
- [7] Clarke F J J, Compton J A. Correction methods for integrating-sphere measurement of hemispherical reflectance[J]. Color Research & Application, 1986, 11(4): 253-262.
- [8] Gao Aihua, Sun Jinrong, Qin Wengang. Measurement of response time of photoelectric detector based on optical switch [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 29 (2): 188-190.  
高爱华, 孙金荣, 秦文罡. 基于光开关的光电探测器响应时间测量 [J]. 半导体光电, 2008, 29 (2): 188-190.
- [9] Gao Aihua, Sun Jinrong, Qin Wengang. Digital correlation detection technology of weak laser signal[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2010, 30 (1): 5-8.  
高爱华, 孙金荣, 秦文罡. 微弱激光信号的数字相关检测技术[J]. 西安工业大学学报, 2010, 30(1): 5-8.
- [10] Zhang Zhongxiong. Analysis and design of virtual instrument technology [M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2012.  
张重雄. 虚拟仪器技术分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.