

文章编号 2095-1531(2016)02-0263-07

# 面向光学器件透反射率测量的声光调制型 激光功率稳定系统设计

苗少峰<sup>1</sup>, 李晨旭<sup>1</sup>, 高 苗<sup>1</sup>, 邵晓鹏<sup>1\*</sup>, 史学舜<sup>2</sup>, 刘玉龙<sup>2</sup>, 刘长明<sup>2</sup>, 赵 坤<sup>2</sup>, 陈海东<sup>2</sup>  
(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;  
2. 中国电子科技集团公司 第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

**摘要:** 在各类光学系统设计过程中, 由于实验系统对于光学器件的透反射率要求不同, 需要确定光学器件的透反射率。本文设计了一种对光学器件的透反射率进行精准测量及标定的系统, 该系统通过对激光光源进行声光调制, 使得激光输出功率的稳定度显著提高, 避免了测量时光源不稳定带来的较大误差。实验结果表明, 该系统能够稳定光源输出功率, 稳定度维持在 0.05%/h, 甚至更高的水平, 满足了光学器件透反射率测量的误差小, 精度高等要求。

**关键词:** 透反射率; 声光调制; 激光功率稳定

中图分类号: TN248 文献标识码: A doi: 10.3788/CO.20160902.0263

## Design of laser power stabilization system based on acousto-optic modulation for the transmissivity and reflectivity measurement of optical devices

MIAO Shao-feng<sup>1</sup>, LI Chen-xu<sup>1</sup>, GAO Miao<sup>1</sup>, SHAO Xiao-peng<sup>1\*</sup>, SHI Xue-shun<sup>2</sup>,  
LIU Yu-long<sup>2</sup>, LIU Chang-ming<sup>2</sup>, ZHAO Kun<sup>2</sup>, CHEN Hai-dong<sup>2</sup>

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xian 710071, China;  
2. The 41<sup>st</sup> Research Institute of CETC, Qingdao 266555, China)

\* Corresponding author, E-mail: xpshao@xidian.edu.cn

**Abstract:** In all types of optical system design processes, the transmissivity and reflectivity of optical devices should be determined, because of different requirements in various experiment systems. One system was designed, by which the transmissivity and reflectivity of optical devices could be measured and calibrated with high precision. The laser output power stability was increased significantly by acousto-optic modulation in this system, avoiding larger errors caused by unstable measuring light. It is showed that the system is capable of stabilizing light output power from experimental results; the stability is maintained at 0.05%/h, or even higher

收稿日期: 2015-12-11; 修订日期: 2016-01-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 61575154)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61575154)

level, and it meets the requirements of small error and high precision for the measurement of the transmissivity and reflectivity of optical devices.

**Key words:** transmissivity and reflectivity; acousto-optic modulation; laser power stability

## 1 引言

光学器件的透反射率是评价光学器件的一个重要参数。在各类光学系统设计过程中,由于系统对于光学器件的透反射率要求不同,有必要对光学器件的透反射率进行精准地测量。常用的测量方法或专用仪器对于光学器件透反射率的测量精度普遍局限在0.1%~5%的水平<sup>[1]</sup>。

通常测量光学器件透反射率的方法可分为光强测量法和双光束差动法两大类,此外还有基于谐振腔特性测试法等。这些方法在实际测量过程中要么不能完全消除光源功率波动对实验结果的影响,使得测量精度不够高,误差较大;要么测量条件有限制,不能对某些特定条件下的光学器件进行透反射率的测量。

目前,市场上对于光学器件透反射率的测量仪器主要有椭偏计、分光光度计、ST座、DF透反仪等,这些仪器分别存在价格昂贵、计算复杂、误差较大等诸多缺点<sup>[2-3]</sup>。

鉴于此,本文在考虑了现今测量方法误差较大、操作困难等诸多因素之后,设计了一种基于声光调制的光学器件透反射率测量系统,从输出光源方面出发解决测量系统对光学器件的透反射率测量精度不高的技术问题,并且系统操作相对简单,实现了对光学器件透反射率的精确测量及可靠标定<sup>[4-5]</sup>。

## 2 系统构成及设计原理

### 2.1 系统构成

该系统主要由连续激光器、光路控制室、测量转台、测量模块、光电放大模块和反馈控制模块组成<sup>[6-8]</sup>。系统中,连续激光器,用于输出连续的激光信号;光路控制室,用于将接收到的连续激光信号分为反射激光信号和透射激光信号,同时接收反馈控制模块输出的超声波信号,实现对连续激

光信号的功率实时调节;测量转台,用于固定待测光学器件;测量模块,用于将接收到的透射激光信号进行光电转换,转换为测量电压信号;光电放大模块,用于将接收到的反射激光信号,进行光电转换,转换为反馈电压信号;反馈控制模块,与光电放大模块和光路控制室相连接,将接收到的反馈电压信号进行运算处理,得到超声波信号并输出到光路控制室中,利用声光调制稳定激光输出功率。系统构成及原理如图1所示<sup>[9-11]</sup>。

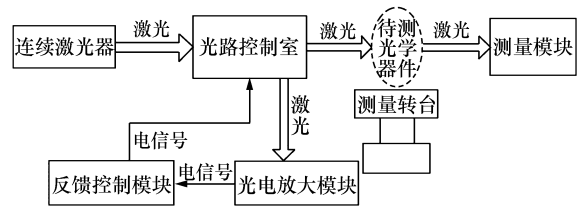


图1 透反射率测量系统组成

Fig. 1 Transmissivity and reflectivity measuring system

### 2.2 系统模块组成

根据实验系统以及待测光学器件对光源的不同要求,选取对应的连续激光器作为本测量系统的光源。

光路控制室垂直设置在连续激光器输出的激光光路中,依次包括排列的光阑、第一偏振片、声光调制器、第二偏振片和分束镜(如图2所示)。其中光阑用于滤除偏振片反射的激光,避免对激光器可能带来的损害;第一偏振片,用以满足声光调制器对入射激光信号在偏振方面的使用要求,第二偏振片用于消除激光偏振方向对分束镜的分光比例的影响,从而实现了分光比例恒定的目标,进而通过功率稳定模块对输出的线偏振光进行功率稳定,达到更好的稳定效果;声光调制器在接收到反馈控制模块输入的调制信号后,用于实时调节“0”级光的功率输出,实现功率稳定的目的;分束镜用于将已稳定的激光分束,一路反射进入光电放大模块进行后续的反馈控制,一路透射作为激光输出,用于光学器件透反射率的测量。

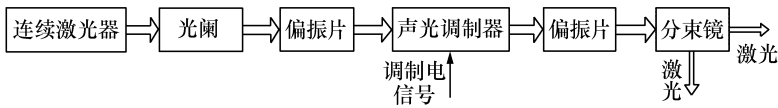


图2 光路控制的结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the optical path control

光电放大模块包括衰减片、反馈探测器和电流放大器(如图3所示)。反馈探测器采用基于GaP的互阻放大光电探测器,其对150~550 nm的紫外到可见光波段敏感,并具备探测性能稳定、暗电流小、探测精度高、响应时间短等优点。该反馈探测器的光敏面大于激光信号光斑的面积,以保证反馈探测器能够准确测量激光信号的功率。反射激光信号进入光电放大模块,垂直经过衰减片,将激光功率减少到反馈探测器可承受的范围,然后进入反馈探测器进行光电转换,输出电流信号经过电流放大器后输出为电压信号<sup>[12]</sup>。

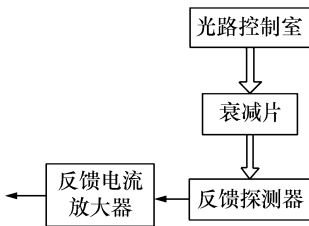


图3 光电放大模块的结构示意图

Fig.3 Schematic of the photoelectric amplifier module

反馈控制模块包括A/D转换器、FPGA电路、单片机模块和声光驱动器(如图4所示),反馈电流放大器输出的电压信号进入反馈控制模块,经过A/D转换器输出为24位串行数字信号,FPGA电路接收该数字信号,并输出为实时功率数字信号及电压信号,根据采样得到的激光功率值设定系统的输出功率,设定功率值一般为该采样功率值的70%~90%之间的某一数值,此时开启声光驱动器的电源使声光调制器处于工作状态,将设定功率值与实时采样功率值做差运算得到实时功率偏差值,PID控制算法利用此偏差信号计算得到实时的控制电压数字信号,经过D/A转换器(Digital to Analog Converter)转换为模拟电压信号,该模拟电压信号调制声光驱动器的输出射频

信号的功率,将调制后的射频信号加载在声光调制器上改变输出的1级激光的衍射效率,实现了对0级光信号功率的稳定控制。由于FPGA芯片实现PID控制算法所需时间很短,故可将功率调节过程看做实时进行,其中实时功率数字信号发送给单片机模块并显示<sup>[13]</sup>。

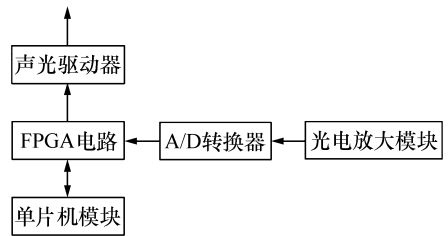


图4 反馈控制模块的结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the feedback control module

测量转台包括自下而上设置的固定装置、水平旋转台和夹持装置。夹持装置用于固定待测光学器件,安装在水平旋转台上,并可以绕固定装置水平旋转。测量时,将待测光学器件放置在光路控制室输出的透射激光信号光路中,调节水平旋转台可以改变透射激光信号入射到待测光学器件表面的角度。

测量模块包括测量探测器、测量电流放大器和六位半数字万用表(如图5所示)。在测量光路测量转台上未放置待测光学器件时,透射激光信号进入垂直放置在光路中的测量模块,经过测量探测器进行光电转换,输出电流信号经过测量电流放大器后输出为电压信号,使用六位半数字万用表采集该电压信号,即可得到此时测量光路上的功率 $E_1$ ;在测量光路测量转台上放置待测光学器件后,测量透过光学器件或经过光学器件反射得到的激光功率 $E_2/E_3$ ,根据公式 $T = E_1/E_2$ 计算得到该光学器件的透射率 $T$ ,根据公式 $R = E_1/$

$E_3$  计算得到该光学器件的反射率  $R$ 。

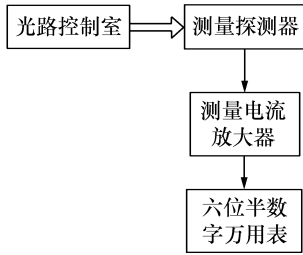


图5 测量模块的结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of measuring module

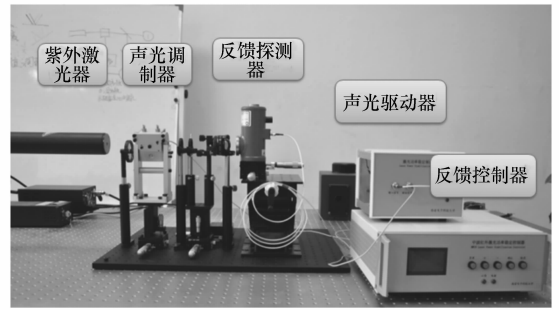


图6 激光功率稳定系统

Fig. 6 Laser power stabilization system

## 2.3 系统工作原理

连续激光器输出功率波动较大的激光信号, 经过第一偏振片后的激光信号通过处于工作状态的声光调制器后发生布拉格衍射, 原来的激光信号被分为0级光和1级光信号; 使用第二光阑将1级光信号滤除, 本系统只使用0级光信号。0级光信号通过第二光阑后达到空间滤波器; 空间滤波器改变了输入激光信号的光斑能量密度分布, 其输出的激光信号的光斑能量实现了均匀分布, 使得该系统应用不局限在光学器件透反射率的测量, 亦可以应用于光辐射计量等领域。输出的激光经过分束镜时将部分激光信号反射进入光电放大模块后输出电压信号作为反馈控制器的输入信号, 另一部分透射输出作为系统的输出激光信号, 使之通过测量光路; 再利用探测器测得在测量转台上未放置光学器件及放置后的激光功率, 然后计算得到光学器件的透反射率<sup>[14-15]</sup>。

## 3 系统搭建及实验结果分析

### 3.1 激光功率稳定系统

实验系统中, 最主要的部分即激光功率稳定系统, 如图6所示。实验过程中, 将反馈探测器与反馈探测器之前的分束镜垂直放置, 在分束镜的透射路中加入与反射路中同型号的功率探测器并调节好光路, 待激光功率系统正常工作, 得到输出功率稳定的激光后, 将光学器件通过固定件固定在激光输出和光功率探测的光路之间, 并调整所在光路直到满足实验要求, 即可通过插入光学器件前后测量的激光功率得到光学器件透反射率。

### 3.2 实验数据分析

实验使用波长为266 nm和379 nm的线偏振激光器作为输入光源, 激光功率经过电流放大后, 被六位半数字万用表采集并存储。每次实验采集时间为1 h, 即1 h的采样点为9 000个。以下对激光功率的实验分析使用的数据均为万用表采集直接得到的电压值。

#### 3.2.1 紫外激光器不加反馈控制时的功率数据

由图7和图8可见, 紫外半导体激光器存在较明显的功率漂移。经实验数据计算得到, 波长为266 nm的激光器的稳定度只有 $\pm 3\%/h$ 左右, 且有功率突变现象存在; 波长为379 nm的激光器的稳定度为 $\pm 1.5\%/h$ 左右, 主要表现为功率随时间缓慢漂移。

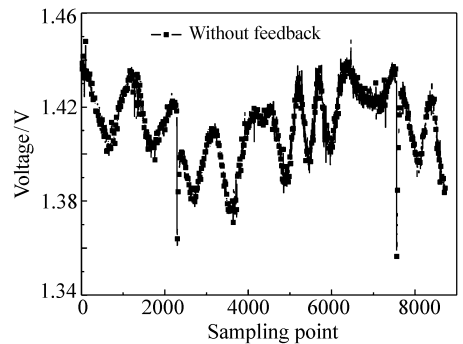


图7 266 nm 激光器输出功率原始波动

Fig. 7 Original fluctuating of 266 nm laser output power

#### 3.2.2 紫外半导体激光器加反馈控制后的功率数据

图9中波长为266 nm的紫外半导体激光器不开启激光功率稳定控制系统时直接输出的功率曲线是使用 without feedback 所标示的曲线, 曲线

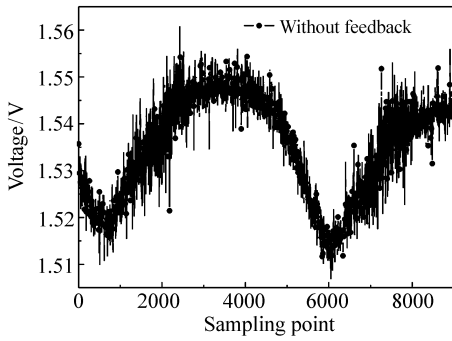


图8 379 nm 激光器输出功率原始波动  
Fig. 8 Original fluctuating of 379 nm laser output power

波动范围为 1.36 ~ 1.45 V, 稳定度为  $\pm 3.2\%/h$ , 激光功率存在非常明显的上下抖动问题。其他 3 条曲线为开启激光功率稳定控制系统后所得, 依据功率值的大小不同分别使用 power 1、power 2 和 power 3 标示, 功率值由实验人员根据实验条件自行设置。能够明显看出, 开启激光功率稳定控制系统后紫外半导体激光器的功率波动得到了很大程度地减小。为了方便对其进一步的分析, 将图 5 中 power 1 与 power 3 标示的两条功率曲线经过纵坐标放大后绘制于图 10 中。

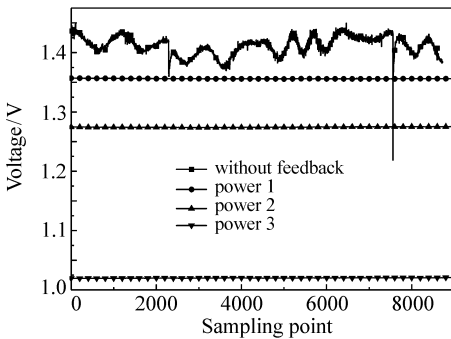


图9 波长为 266 nm 的紫外激光器的控制效果对比  
Fig. 9 Controlling effect comparasion with and without stablization system using 266 nm laser

在图 10 中, 由功率设定为 power 1 时的输出功率曲线, 可以得到 1 h 内输出功率对应的电压值最大为 1.357 0 V, 最小为 1.355 7 V, 电压最大变化为 1.3 mV, 功率稳定度为 0.021%/h; 由功率设定为 power 3 时的输出功率曲线, 可以得到 1 h 内输出功率对应的电压值基本保持在 1.019 4 ~ 1.020 8 V 之间, 最大电压变化只有 1.4 mV 左右, 功率稳定度为 0.033%/h。

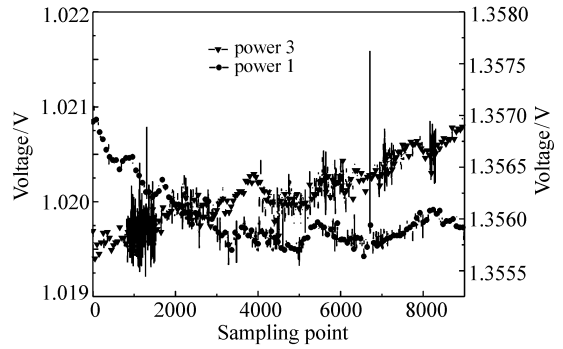


图10 图9中 power1 和 power3 坐标放大图  
Fig. 10 Enlarged picture of power 1 and power 3 in Fig. 9

在图 11 中, 波长为 379 nm 的紫外半导体激光器不开启激光功率稳定控制系统时, 功率曲线波动范围为 1.51 ~ 1.56 V, 稳定度为  $\pm 1.6\%/h$ , 激光功率存在非常明显的上下漂移波动现象。从图 11 中能够明显看到, 开启激光功率稳定控制系统后功率波动在很大程度上得到了减小。

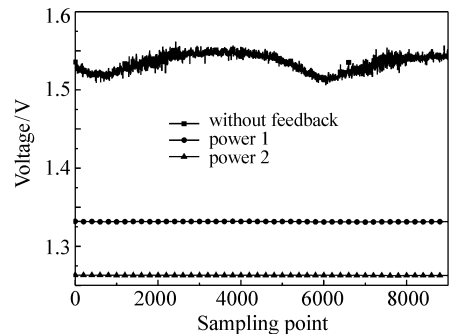


图11 波长为 379 nm 的紫外激光器的控制效果对比  
Fig. 11 Controlling effect comparasion with and without stablization system using 379 nm laser

在图 12 中, 由设定功率为 power 1 的曲线, 可以得到 1 h 内输出功率对应的电压值最大为 1.332 0 V, 最小为 1.330 8 V, 电压最大变化为 1.2 mV, 功率稳定度为 0.015%/h。对于设定功率为 power 2 的输出功率曲线, 可以得到 1 h 内输出功率对应的电压值基本保持在 1.263 2 ~ 1.262 5 V 之间, 最大电压变化只有 0.7 mV 左右, 功率稳定度为 0.011%/h。

以上实验分析表明: 本功率稳定系统可以适

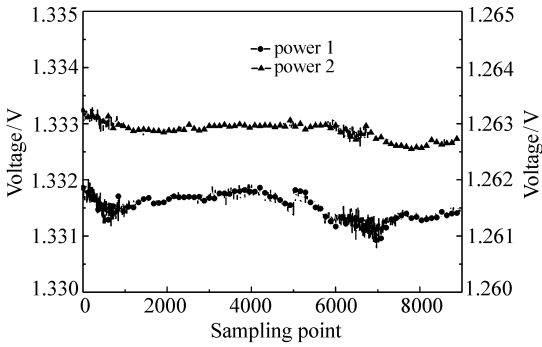


图12 图11中 power 1 和 power 2 坐标放大  
Fig.12 Enlarged picture of power 1 and power 2 in Fig.11

用于不同波长激光器的激光功率控制,能够长时间稳定工作,多次重新搭建系统均得到了输出激光功率稳定度优于 $0.05\%/h$ 的控制效果,该前段系统能够较好的应用在光学器件的透反射率测量系统中。

### 3.3 光学器件透反射率测量可靠性分析

测量光学器件的透反射率过程中,在每次测量透反射率时都需要一组激光输出功率和透射功率的具体数据,但是两次测量之间伴随着待测光学器件的移出与移入,而精密平移台存在 $1\ \mu\text{m}$ 的重复定位精度,从而导致测量经光学器件分光后透射的激光功率存在微小的同轴误差<sup>[16]</sup>,导致光学器件的透反射率精度要低于 $0.05\%$ ,但是 $1\ \mu\text{m}$ 的定位精度仅仅只会引入微小的误差,透反射率测量精度近似等同于激光功率稳定精度,完全能够满足对光学器件的透反射率测量要求。

该系统通过稳定激光功率,达到了精确测量光学器件透反射率的目的,较之现今流行的测量方法有着较高的测量精度与准确性,操作简单,系统可靠性较高,优势突出。

## 4 结 论

本文设计的光学器件透反射率测量系统能够实现光学器件透反射率的精确测量,试验过程中测量精度会保持在 $0.1\% \sim 0.05\%$ 。相较于光强测量法和双光路测量法等传统方法有着测量精度高,操作简单便捷,误差小等诸多优点。整个系统由于在光路控制室中设置有声光调制器,接收反馈控制模块处理后经过声光驱动器输出的超声波信号,能够实时调节激光功率,使得测量光路的激光信号为功率稳定度高的激光信号,稳定度提高至 $0.05\%/h$ ,有效减少了光源功率的波动,与现有技术直接使用激光光源作为测量光源相比,有效提高系统的测量精度。由于在反馈控制模块能够接收并实时显示透射激光信号的功率值,增强了系统的可读性,并且可以根据不同的待测光学器件对测量激光功率的不同要求,来设定相应的透射激光信号的功率值,增加了系统的适用性。并且该系统的前端激光功率稳定部分又可以作为双光路测量法的稳定光源,可以辅助进一步提高双光路测量法的测量精度。总体来说,该系统在光学器件透反射率的测试与标定等方面有着广泛且重要的应用价值。

### 参考文献:

- [1] 刘文智. 透反射率测量仪自动化软件设计[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.  
LIU W ZH. Design of software of automatic measurement system of transmissivity and reflectivity[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2006. (in Chinese)
- [2] 陈栋. 透反射率测量仪自动化硬件研制[D]. 长沙:国防科学技术大学,2006.  
CHEN D. Research on hardware of automatic measurement system of transmissivity and reflectivity[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2006. (in Chinese)
- [3] 张春香,杨琳,惠宏超,等. 双光路自相关系统透反射率的重复精度测试[J]. 中国激光,2011,9:198-203.  
ZHANG CH X, YANG H, HUI H CH, et al. . Repeatability of transmittance and reflectance measurement of two path and correlation system[J]. *Chinese J. Lasers*,2011,9:198-203. (in Chinese)
- [4] MIZRAKHI S V, KISELYOV V K, MIZRAKHI S V, et al. . Automated submillimeter laser power stabilizing[J]. *Telecommunications & Radio Engineering*,2007,66(1):89-96.
- [5] CHEN J, ZHANG R C, QIU H L, et al. . Design of power stability control system of semiconductor laser diode[J]. *J.*

Huaqiao University,2009,30(6):619-622.

- [6] 靳刚,温馨,杨保东,等.采用声光频移器反馈控制实现激光强度稳定[J].中国光学,2014,2:234-239.  
JI G,WEN X,YANG B D,*et al.*. Laser intensity stabilization by using of opto-electronic feedback control based on an acousto-optical frequency-shifting system[J]. *Chinese Optics*,2014,2:234-239. (in Chinese)
- [7] 谢冀江,李殿军,张传胜,等.声光调Q CO<sub>2</sub>激光器[J].光学精密工程,2009,5:1008-1013.  
XIE J J,LI D J,ZHANG CH SH,*et al.*. Acousto-optically Q-switched CO<sub>2</sub>laser[J]. *Opt. Precision Eng.*,2009,05:1008-1013. (in Chinese)
- [8] 潘其坤,谢冀江,阮鹏,等.声光调Q CO<sub>2</sub>激光器的输出特性[J].中国光学,2012,3:283-288.  
PAN Q K,XIE J J,RUAN P,*et al.*. Output performance of acousto-optic Q-switched CO<sub>2</sub>laser[J]. *Chinese Optics*,2012,3:283-288. (in Chinese)
- [9] 高苗,邵晓鹏,王琳,等.基于声光调制的中波红外激光功率稳定系统[J].红外与激光工程,2015,7:1975-1979.  
GAO M,SHAO X P,WANG L,*et al.*. Power stabilization system of medium wave infrared laser based on acousto-optic modulator[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2015,7:1975-1979. (in Chinese)
- [10] 孙权社,陈坤峰,史学舜.中红外激光器功率稳定器技术[J].红外与激光工程,2015,7:2127-2131.  
SUN Q S,CHEN K F,SHI X S. Mid infrared laser power stabilizer[J]. *Infrared and Laser Engineering*,2015,7:2127-2131. (in Chinese)
- [11] 单洪梁,陈扬光,陆玲影.光反馈稳定激光功率的研究[J].长春光学精密机械学院学报,1984,2:1-8.  
SHAN H L,CHEN Y G,LU G Y. Study on stable laser power of optical feedback[J]. *J. Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics*,1984,2:1-8. (in Chinese)
- [12] IVERSON E W,FENG M. Transistor laser power stabilization using direct collector current feedback control[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*,2012,24(24):4-6.
- [13] 陈栋,黄云,张斌,杨开勇.透反射率自动化测量系统设计[J].光学技术,2007,S1:210-213.  
CHEN D,HUANG Y,YANG K Y. Design of transmissivity and reflectivity automatic measuring system[J]. *Optical Technique*,2007,S1:210-213. (in Chinese)
- [14] 王彬,王秀琴.基于FPGA的激光器功率控制系统设计[J].软件导刊,2011,05:52-54.  
WANG B,WANG X C. Design of the laser power control system based on FPGA[J]. *Software Guide*,2011,05:52-54. (in Chinese)
- [15] 田志松,吴志军.基于声光调制的粒子图像速度粒度场成像系统开发[J].应用激光,2005,6:390-394.  
TIAN ZH S,WU ZH J. Development of an imaging system of the Particle Image Velocimetry and Sizer(PIVS) based on acousto-optic modulation[J]. *Applied Laser*,2005,6:390-394. (in Chinese)
- [16] 黄水花,陈栋,何焰蓝,等.透反射率自动化测量系统的原理及测量误差分析[J].光学与光电技术,2009,06:73-75.  
HUANG SH H,CHEN D,HE Y L,*et al.*. Measurement principle and errors analysis of the transmissivity and reflectivity automatically measuring system[J]. *Optics & Optoelectronic Technology*,2009,6:73-75. (in Chinese)

#### 作者简介:



苗少峰(1993—),男,安徽淮北人,硕士,主要从事光电成像硬件构建方面的研究。E-mail:miaosf0121@163.com



邵晓鹏(1973—),男,山东威海人,博士,教授,博士生导师,1997年、2002年、2005年于西安电子科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事计算成像,新体制光电成像(如超衍射极限成像、超分辨率成像和量子成像等)、光电图像处理与模式识别(光电成像在工业中的应用、遥感图像处理和光谱图像处理)等方面的研究。E-mail:xpshao@xidian.edu.cn