

# 光电信号接收器尺寸对光学薄膜弱吸收测量的影响

符燕燕<sup>1,2</sup> 李大伟<sup>1</sup> 刘晓凤<sup>1</sup> 赵元安<sup>1</sup> 郭 猛<sup>1,2</sup> 张 蕾<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 基于表面热透镜技术搭建了光学薄膜弱吸收测量系统,使用不同功率的抽运光辐照样品,并通过光束质量分析仪记录经样品表面反射后的探测光强度的空间分布,以探测光强度最强点所对应的像素坐标为中心两边对称取多个像素点表示不同尺寸的接收器,从而分析不同尺寸光电信号接收器得到的光热信号强度。结果表明,随着接收器尺寸的增加,探测面积覆盖范围超过探测光束峰值区域,得到的光热信号与抽运光功率的比值逐渐偏离线性,从而引入的测量误差也就增大。因此,实际测量中应在保证测量极限的前提下尽量缩小探测器尺寸以提高测量的准确度。

**关键词** 光学器件; 光学薄膜; 弱吸收测量; 表面热透镜; 接收器口径

中图分类号 O484.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0707001

## Size Effects of Photoelectric Signal Receiver on Weak Absorption Measurement for Optical Coatings

Fu Yanyan<sup>1,2</sup> Li Dawei<sup>1</sup> Liu Xiaofeng<sup>1</sup> Zhao Yuanan<sup>1</sup> Guo Meng<sup>1,2</sup> Zhang Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Science, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** Based on the weak absorption measurement system with surface thermal lens (STL) technique, different power pump laser is used to irradiate the sample and record the intensity distribution of probe beam with beam quality analyzer. Making the pixel coordinates of the strongest intensity point of the probe beam as the center, by taking multiple pixel from both sides of the center, different sizes of photoelectric signal receiver can be represented and photo-thermal signal intensity which obtained by different sizes of photoelectric signal receiver can be analyzed. The photo-thermal signal as a function of size of photoelectric signal receiver is experimental measured. The experimental results show that with the size of photoelectric signal receiver increasing, the coverage area of detection exceeds the probe beam peak area, and then the photo-thermal signal deviates from linearity gradually, which enlarges the measurement error. Therefore, to improve the accuracy of measurements, the actual size of photoelectric signal receiver should be minimized on the premise of guaranteeing measurement limit.

**Key words** optical devices; optical thin films; weak absorption measurement; surface thermal lens; size of photoelectric signal receiver

**OCIS codes** 310.6870; 350.2450; 250.0040; 190.4870

## 1 引 言

光学薄膜元件被广泛应用于各类光学系统中<sup>[1]</sup>。吸收损耗是评判光学薄膜元件质量的一个重要标准<sup>[2]</sup>。光学薄膜的吸收不仅会引起薄膜元件的热畸变,甚至直接影响传输光束质量、降低其激光损伤阈值<sup>[3-4]</sup>,特别是在传输光束功率较高时即使十分微弱的吸收也有可能引起灾难性的破坏<sup>[5]</sup>。因此,薄膜元件吸收损耗相关方面一直是研究的热点。

收稿日期: 2015-02-04; 收到修改稿日期: 2015-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(61308021)

作者简介: 符燕燕(1990—),女,硕士研究生,主要从事光学薄膜弱吸收测量技术方面的研究。E-mail: fuyanyan2012@163.com

导师简介: 李大伟(1978—),男,博士,副研究员,主要从事光学薄膜损伤测试及机理、激光预处理等方面的研究。

E-mail: lidawei@siom.ac.cn(通信联系人)

要降低吸收损耗首先要准确测量吸收,这严格依赖于测量技术。随着光学薄膜制备技术的发展,现阶段性能优异的常规介质薄膜,比如高反膜<sup>[6]</sup>、高透膜、滤光片等,吸收率已经低于 $10^{-6}$ 量级<sup>[7]</sup>,这对吸收测量技术提出了更高的要求。迄今为止出现了多种吸收测量技术<sup>[8]</sup>,其中光热技术因具有极高的灵敏度成为理想的测量手段,利用光热技术发展出了多种测量方法,如激光量热法<sup>[9]</sup>、光热辐射法、光热光偏转等,特别是表面热透镜技术(STL)<sup>[10-13]</sup>,其采用大于抽运光斑的单模探测激光进行测量,不仅提高了测量稳定性而且降低了光斑对准调节的困难程度,是测量光学薄膜弱吸收的重要手段之一。

表面热透镜法测量弱吸收是一种间接测量手段<sup>[14]</sup>。其首先基于一套光热形变简化理论<sup>[15]</sup>,假定薄膜样品吸收能量后产生的热包高度与其吸收率在一定范围内成线性关系。其次,热包对探测光束进行调制形成光热信号,这样通过获得探测光的光热信号即可根据抽运功率间接测量热包高度,最后进一步通过对比测量反推求得薄膜的吸收率。实际测量中,为了保证所测结果准确可靠,光热信号、抽运光功率以及样品吸收率之间的关系需满足上述假设<sup>[16]</sup>,这对弱吸收测量系统设计提出了苛刻的要求。本文基于高斯分布的抽运光束及探测光束,研究了测量系统中光热信号接收器尺寸对测量结果准确度的影响。

## 2 理论分析及实验

### 2.1 理论分析

抽运激光照射测量样品时,样品会吸收部分能量产生温升及体积膨胀,形成纳米量级以下的热包,被称为“光热形变”<sup>[17]</sup>。通过求解薄膜系统的温度场、应力场和形变场,可以较为严格地描述光热形变,但由于此类方程求解的复杂性使得难以获得解析解。因此,针对光学薄膜弱吸收测量的情况,范<sup>[18]</sup>构建了薄膜系统的三层理想模型并从热波传导理论<sup>[19]</sup>和线性膨胀理论出发,分析热量在薄膜系统中不同区域的分布情况,得到温升的近似表达式,建立了一套薄膜系统光热形变简化理论<sup>[15]</sup>。

在该模型中,当薄膜的吸收远大于基底的吸收时,基底吸收可忽略。如果膜层厚度远小于热扩散长度同时远小于吸收长度,基底厚度远大于基底材料的热扩散长度条件,则样品表面热包中心的最大形变高度可以近似表示为:

$$u_0 = \frac{AP_0(\alpha_T d + \alpha_s \mu_s)}{4fR_i^2(\rho_f c_f d + \rho_s c_s \mu_s)}, \quad (1)$$

式中 $A$ 为薄膜吸收率, $P_0$ 为抽运光功率, $\alpha_T$ 和 $\alpha_s$ 分别为薄膜和基底的线性膨胀系数, $d$ 为薄膜厚度, $\mu_s$ 为热波向基底的纵向热扩散长度, $f$ 为抽运光调制频率, $R_i$ 为热包半径, $\rho_f, \rho_s$ 和 $c_f, c_s$ 分别为薄膜和基底的密度和定压比热。

当调制频率很低,如在几十赫兹以下时, $\mu_s \gg d$ ,上式可以简化为:

$$u_0 = \frac{AP_0 \alpha_s}{4fR_i^2 \rho_s c_s}. \quad (2)$$

从上式可看出,低频测量时,薄膜表面的形变高度 $u_0$ 只与薄膜吸收率 $A$ 成正比,而与薄膜其他热物性质参数无关。

实验中采用的He-Ne探测激光为光斑良好的基模高斯光束,其强度可表示为:

$$E_0 = C \frac{\omega_0}{\omega_1} \exp(-ikz_{sw}) \exp\left(-\frac{ik}{2q} r^2\right) \exp\left[i \text{Arctan}\left(\frac{z_{sw}}{f}\right)\right]. \quad (3)$$

探测光束以近乎垂直的角度照射到样品表面,热包会对探测光束的强度进行重新分布,反射探测光产生衍射效应。此时,微小热包对光场的影响可等效为一个变换因子: $\exp[-i2ku(r,t)]$

接收器接收到的反射光场强分布可表示为:

$$E_1 = E_0 \exp[-i2ku(r,t)], \quad (4)$$

式中 $\omega_0$ 表示探测激光束腰半径, $\omega_1$ 表示样品表面探测激光光斑半径。

将菲涅耳衍射理论应用到表面热透镜技术中<sup>[15,20]</sup>,则光在空间内自由传播时其在任意平面内的场分布可以写成卷积的形式:

$$E(r,t) = \frac{\exp(ikz_{sd})}{i\lambda z_{sd}} E_1 \otimes \exp\left(\frac{ik}{2z_{sd}}\right) r^2 = C \frac{\exp[i\text{Arctan}(z_{sw}/f) + ik(-z_{sw} + z_{sd})\omega_0]}{i\lambda z_{sd} \omega_1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left\{-\frac{ik}{2q}(\alpha^2 + \beta^2) - i2ku(r,t) + \frac{ik}{2z_{sd}}[(\chi - \alpha)^2 + (\gamma - \beta)^2]\right\} d\alpha d\beta \quad (5)$$

对反射探测光光强进行数值模拟,获得当表面热包中心高度很小时的反射探测光斑中心的平均光强,并定义光热信号为:

$$S_{STL} = I_{\text{probe}} - I_{\text{probe0}} = CAP_{\text{pump}} I_{\text{probe0}} \quad (6)$$

式中  $C$  为实验仪器常数,  $A$  为样品吸收率,  $P_{\text{pump}}$  为照射到样品表面上的抽运光功率,  $I_{\text{probe0}}$  为表面热包高度为 0 时反射探测激光光斑中心的平均光强。从上式可见,当薄膜样品满足简化理论的前提条件下,实验仪器常数  $C$  保持不变,采用某一大吸收定标样品  $A$ ,选定合适的探测光强度  $I_{\text{probe0}}$ ,探测光光强的变化与抽运光能量成线性关系。由上述推导可见,一定的简化条件下光热信号与抽运光功率、样品吸收率成正比关系,但这要求严格测量探测光束中心光强,而在实际测量时,光电信号接收器总是具有一定的尺寸,不可能只探测中心位置光强,这就有可能给实际测量带来误差。

### 2.2 实 验

为了明确实际测量过程中,光电信号接收器的尺寸对光热信号的影响,开展了如下实验。实验装置如图 1 所示,其中 CCD 为电荷耦合器件。采用波长为 1064 nm 的连续输出激光器作为抽运光源,光束经扩束整形、功率调节以及透镜聚焦后以近于垂直的角度照射到样品表面。聚焦镜前放置分束镜,取出部分光束用于功率监测。选用 632.8 nm 波长的 He-Ne 激光束作为探测光,探测光束出射后经过衰减器衰减并经透镜聚焦后小角度入射到样品表面抽运光辐照的区域。光束质量分析仪接收探测光束经样品表面的反射光,从而记录其空间强度分布。

为获得较大的光热信号,实验样品选用 K9 玻璃基底上沉积的铬膜,膜厚约为 30 nm,整个样品直径 30 mm,厚度为 3 mm,对 1064 nm 光束的吸收率为 50.5%。实验中调整光束质量分析仪位置以获得合适的光斑尺寸,固定位置后调节合适的探测光强度,首先记录无抽运光照射时的探测光强分布,之后选择不同功率的抽运光辐照样品并分别记录相应的探测光强度分布。

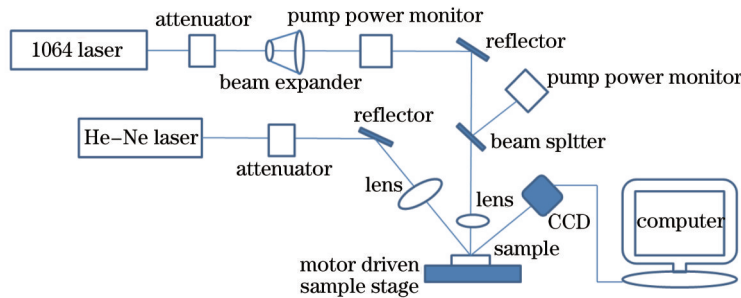


图 1 表面热透镜测量装置示意图

Fig.1 Experimental setup of surface thermal lensing technique

### 3 结果与讨论

图 2 给出光束质量分析仪记录的经样品表面反射后的探测光光斑空间分布。由前面的理论分析可知,

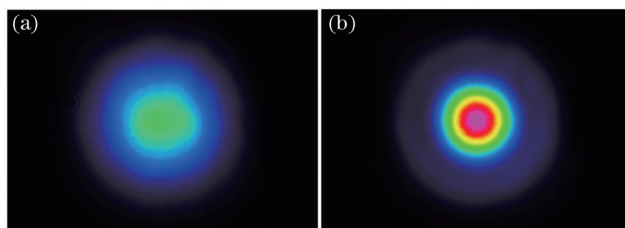


图 2 探测光束光斑图(a)无抽运光辐照(b)有抽运光辐照(抽运光功率为 64.0 mW)

Fig.2 Comparison of He-Ne laser spot image under un-pumped (a) and 64.0 mW pump laser (b)

在一定的条件下,光电信号接收器接收到的探测光光强的变化与抽运光能量满足线性关系。本实验中采用的两个抽运光功率为:22.9、64.0 mW。从图2可以看出,当抽运光辐照样品表面时,由于热包调制,探测光束的光强分布出现了明显变化,中心光强得到增强。

由于探测光束强度空间分布的圆对称性,取通过中心任意直线上的光强分布加以分析即可反映整个光斑的分布特性,这里取竖直方向上的光强分布,如图3所示。

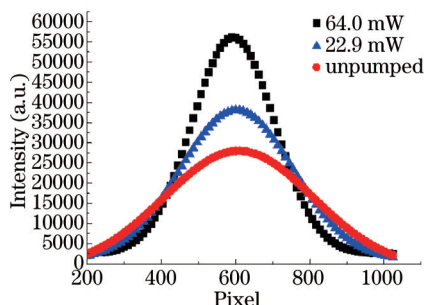


图3 不同功率抽运光照射下光电信号接收器接收到的探测光束竖直方向的强度分布

Fig.3 Intensity distribution in the vertical direction of probe-beam received by the photoelectric signal receiver under different pump powers

假设系统调试准确,探测光束光强最强点位置对应接收器的中心位置,则最强点纵坐标数值即可代表接收器尺寸无限小或是理想情况下测量得到的信号强度。其中,光束质量分析仪的每个像素点尺寸为 $6.7\ \mu\text{m}\times 6.7\ \mu\text{m}$ ,则以最强点所对应的像素坐标为中心两边对称取多个像素点即可表示不同尺寸的接收器,从而考察不同尺寸接收器接收到的信号强度。

图3中三条曲线以最高点所对应的横坐标为中心像素坐标,再在中心像素坐标两边依次对称取出25、50、75、100、125和150 pixel,则对应的总像素点个数是1、51、101、151、201、251及301 pixel,对应的接收器口径依次为6.7、341.7、676.7、1011.7、1346.7、1681.7以及2016.7  $\mu\text{m}$ 。对取出的各像素点所对应的光强求和取平均值作为不同接收器口径下接收到的光强信号。之后不同功率抽运光照射的光强信号数据与无抽运光照射时的对应数据相减作为相应接收器口径下的光热信号强度,得到结果如表1所示。

表1 不同口径的接收器及抽运光功率辐照下的光热信号强度

Table 1 Photothermal signal for different diameters of the receiver and pump power irradiation

Diameter of the receiver / $\mu\text{m}$	Photothermal signal (a.u.)	Photothermal signal ( $I_{\text{test}}$ )/(a.u.)
	(22.9 mW pump power)	(64.0 mW pump power)
6.7	10112	28113
341.7	10013	27727
676.7	9745	26636
1011.7	9309	24948
1346.7	8744	22819
1681.7	8079	20430
2016.7	7354	17958

由(6)式可知,在本次实验下,实验仪器常数 $C$ 、薄膜样品吸收率 $A$ 及探测光强度 $I_{\text{probe}0}$ 保持不变,此时光电信号接收器接收到的探测光光强的变化与抽运光能量成线性关系。根据辐照抽运光功率比值,结合22.9 mW下各口径接收器接收到的光热信号强度,计算出64.0 mW抽运光辐照下各口径接收器接收到的光热信号强度理论值 $I_{\text{standard}}$ ,之后利用表1中64.0 mW各口径接收器实际接收到的光热信号强度 $I_{\text{test}}$ 减去对应的理论值 $I_{\text{standard}}$ 算得偏差。为了便于比较,这里计算了偏差占光热信号强度理论值 $I_{\text{standard}}$ 的百分比即相对偏差,得到64.0 mW抽运光辐照下不同接收器口径探测到的光热信号偏离程度的结果图,如图4所示。

由图4可以看出,接收器尺寸无限小或是理想情况下,假设该情况下只测得最强点的信号强度,由于光热信号与抽运功率比值偏离线性引入的误差仅在0.5%左右,这证明了薄膜理想模型的适用性以及系统本身的准确性。而随着光热信号接收器探测口径的扩大,光热信号与抽运功率之间的比值偏差越来越大,从而给测量结果带来的误差也就越大。当接收器直径达到2 mm时引入的误差已经高达13%,而这仅仅是考察



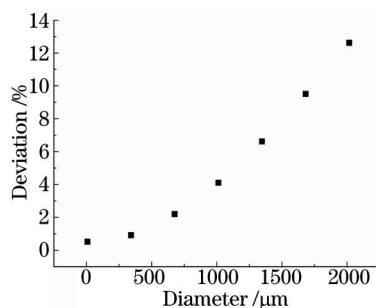


图4 64.0 mW 抽运光功率辐照下不同接收器口径引入的测量误差

Fig.4 Measurement deviation of different receivers diameters with 64.0 mW pump beam

了接收器垂直方向上的光热信号。可以预见,若是考察区域覆盖整个接收器,引入的误差增加将更为迅速,同样口径的接收器引入的误差也将更大。

需要说明的是,虽然结果中接收器尺寸与引入误差之间的关系仅在当前实验参数下成立,但揭示的变化规律则是普适的。实际测试中为了获得较高的测量极限,通常对探测光及抽运光进行聚焦,而表面热透镜技术本身的特性决定了探测器需要离开样品表面一定的距离才能获得较大的光热信号<sup>[15]</sup>。这给系统设计带来了矛盾,因为随着传输距离增加,光束尺寸迅速扩大从而导致单位面积光束能量降低,同样口径的接收器探测到的信号强度减小,从而降低系统的探测极限,若是采用较大口径的接收器则可以增大光热信号,但又会引入误差使得测量结果偏离较大。因此,实际测试中应在系统测量极限满足需求的条件下,尽量减小信号接收器的探测面积。

## 4 结 论

在采用表面热透镜技术搭建的光学薄膜弱吸收测量系统中,使用光束质量分析仪记录了不同功率抽运光辐照时探测光束的空间强度分布,以此为基础分析了光热信号接收器的探测尺寸对测量准确度的影响。结果表明,随着光热信号接收器口径的增加,抽运功率及其产生的光热信号之间的比值偏离线性越来越大,从而测量误差也随之增大。而为了获得较高的测量极限,通常会选择大口径的接收器,这时引入的测量线性偏差也比较大,这就降低了测量结果可信度。因此,实际测量中应在保证测量极限的前提下尽量缩小探测器尺寸。

## 参 考 文 献

- 1 Yang Lihong, Wang Tao, Su Junhong, *et al.*. Influence of laser conditioning on the damage properties of HfO<sub>2</sub> thin film[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(12): 1231001.  
杨利红,王涛,苏俊宏,等.激光预处理对HfO<sub>2</sub>薄膜损伤特性的影响[J].*光学学报*, 2013, 33(12): 1231001.
- 2 Wu Zhouling, Tang Jinfa, Shi Boxuan. Measurement of weak absorption of optical coatings by transverse photothermal deflection technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 1988, 8(9): 1044-1047.  
吴周令,唐晋发,施柏煊.用横向光热偏转技术测量光学薄膜的微弱光吸收[J].*光学学报*, 1988, 8(9): 1044-1047.
- 3 Dai Fu, Xiong Shengming, Gao Weidong. Temperature rise of optical coating irradiated by a high repetition frequency pulse laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 37(3): 509-512.  
代福,熊胜明,高卫东.高重复频率脉冲激光辐照光学薄膜的温升实验[J].*物理学报*, 2008, 37(3): 509-512.
- 4 Jin Tao, Jiang Shaoji. Laser damage issues of optical coating for the mid-infrared[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 680-683.  
金涛,江绍基.中红外高激光破坏阈值薄膜的研究[J].*红外与激光工程*, 2007, 36(5): 680-683.
- 5 Sparks M. Optical distortion by heated windows in high power laser system[J]. *Appl Phys*, 1971, 42(12): 5029-5046.
- 6 Cui Xiao, Tao Chunxian, Hong Ruijin, *et al.*. Influence of ion-beam assistance and annealing on output power of He-Cd laser reflector[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1107001.  
崔潇,陶春先,洪瑞金,等.离子束辅助及退火后处理对氦-镉激光器反射镜输出功率的影响[J].*中国激光*, 2013, 40(11): 1107001.

- 7 Willamowski U, Grofi T, Ristau D, *et al.*. Calorimetric measurement of optical absorption and transmissivity with sub ppm sensitivity [C]. SPIE, 1996, 2775: 147-148.
- 8 Yin Qingrui, Wang Tong, Qian Menglu. Acousto-Optic Photo-Thermal Technique and Application[M]. Beijing: Science Press, 1991: 62-65.  
殷庆瑞, 王 通, 钱梦騄. 光声光热技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 62-65.
- 9 Zhao Ling, Wu Xiaoye, Gu Yongqiang, *et al.*. Measuring the absorptance of deep ultraviolet fluoride coatings with laser calorimetry [J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0807001.  
赵 灵, 武潇野, 谷勇强, 等. 激光量热法测量深紫外氟化物薄膜吸收[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0807001.
- 10 Wu Z L, Kuo P K, Lu Y S, *et al.*. Absorption measurement of thin films by using photothermal techniques[C]. SPIE, 1995, 2714: 294.
- 11 Fan Shuhai, He Hongbo, Fan Zhengxiu, *et al.*. Theory and experiment of surface thermal lens technique used in absorption measurement of thin films[J]. Acta Physica Sinica, 2005, 54(12): 5774-5777.  
范树海, 贺洪波, 范正修, 等. 表面热透镜技术应用于薄膜微弱吸收测量的理论和实验[J]. 物理学报, 2005, 54(12): 5774-5777.
- 12 Hu Haiyang, Fan Zhengxiu, Zhao Qiang. Measuring weak absorption of thin film coatings by surface thermal lensing technique[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(2): 150-154.  
胡海洋, 范正修, 赵 强. 表面热透镜技术探测光学薄膜的微弱吸收[J]. 光学学报, 2001, 21(2): 150-154.
- 13 Wang Yingjian, Hu Haiyang, Li Qingguo, *et al.*. The study of weak absorption of the high reflection thin films coated on the Si plates at 1315 nm by STL [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2000, 12(s0): 87-90.  
王英剑, 胡海洋, 李庆国, 等. 用表面热透镜技术测量 1315 nm 高反射硅镜弱吸收的研究[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(s0): 87-90.
- 14 Satio H, Irikura M, Haraguchi M, *et al.*. New type of photothermal spectroscopic technique[J]. Appl Opt, 1992, 31(12): 2047.
- 15 Li B, Xiong S, Zhang Y. Fresnel diffraction model for mode-mismatched thermal lens with top-hat beam excitation[J]. Appl Phys B, 2005, 80(4-5): 527-531.
- 16 Liu M Q, Li B C, Wang Y R. Accurate determination of subnanoscale deformation with combined laser calorimetry and surface thermal lens[J]. Appl Phys Lett, 2009, 94(13): 131905.
- 17 Jackson W B, Amer N M, Boccara A C, *et al.*. Photothermal deflection spectroscopy and detection[J]. App Opt, 1981, 20(8): 1333-1344.
- 18 Fan Shuhai. High Sensitive Weak Absorption Apparatus for Optical Coatings[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, 2005: 39-48.  
范树海. 高灵敏度光学薄膜弱吸收测量仪的研制[D]. 上海: 上海光学精密机械研究所, 2005: 39-48.
- 19 Zhang Yingcong, Shen Hua, Zhu Rihong. Three-dimensional temperature field of material irradiated by continuous wave laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(8): 0806002.  
张英聪, 沈 华, 朱日宏. 连续激光辐照材料的三维温度场[J]. 中国激光, 2013, 40(8): 0806002.
- 20 Li B C, Eberhard W. Probe-beam diffraction in a pulsed top hat beam thermal lens with a mode-mismatched configuration[J]. Appl Opt, 1999, 38(24): 5241-5249.

栏目编辑: 张浩佳