

文章编号 1004-924X(2016)02-0278-08

基于指数法评估激光量热仪吸收测量不确定度

谷勇强*, 张立超, 武潇野, 梅 林, 时 光
(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点
实验室 超精密光学工程研究中心, 吉林 长春 130033)

摘要:为了掌握熔石英样品在紫外波段的吸收特性,研究了精确评估激光量热仪测量不确定度的方法。介绍了激光量热仪的吸收测量原理,选用指数法对吸收测量数据进行了拟合;通过分析各吸收率测量结果的影响分量,建立了测量不确定度评估模型;对各输入量的估计值以及估计值的标准不确定度逐一进行计算,并对影响吸收率测量结果的拟合计算参数 A 、 γ 进行了修正。考虑背景温度漂移对被测样品温度测量的影响,利用 Matlab 编程分析了线性、非线性温度漂移对吸收计算结果的影响,获得其相对标准不确定度及相对扩展不确定度分别为 2.6% 和 5.2%。最后,更换熔石英基底并进行多次吸收测量,计算了吸收率 10 次测量结果平均值的相对标准不确定度为 2.3%,相对扩展不确定度为 4.6%,与评估结果基本相同。

关键词:测量技术;激光量热仪;指数法;吸收测量;不确定度;温度漂移;熔石英

中图分类号: TN247; TB942 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0278

Evaluation of absorption measurement uncertainty of laser calorimeter by exponential method

GU Yong-qiang*, ZHANG Li-chao, WU Xiao-ye, MEI Lin, SHI Guang

(*Engineering Research Center of Extreme Precision Optics, State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*)

* *Corresponding author, E-mail: yqgu82@163.com*

Abstract: To better understand the absorption characters of fused silica in ultra-violet wavelength, a method to evaluate accurately the measurement uncertainty of a laser calorimeter was explored. The measurement principle of laser calorimeter was introduced firstly, and then the measured absorption data were fitted by the exponential method. After analysis of different effect factors on measuring results, a model for the measurement uncertainty was established, the estimated value and its standard uncertainty of the each input were calculated and the fitting calculation parameters A 、 γ effecting on absorption measuring results were corrected. By taking the influence of background temperature drift on the measurement uncertainty into account, the influences of linear and nonlinear temperature drifts on the absorption result were simulated by Matlab. The results show that the relative standard uncer-

收稿日期:2015-06-02;修订日期:2015-07-24.

基金项目:国家重大科技专项基金资助项目(No. 2009ZX02205)

tainty and relative extended uncertainty of the laser calorimeter are 2.6% and 5.2% respectively. Finally, the absorption measurement was performed for several times by replacing fused silica substrates, and the average values of absorption measuring results for 10 times show the relative standard uncertainty to be 2.3% and relative extended uncertainty to be 4.6%, which are conform to that of evaluated results well.

Key words: measurement technique; laser calorimeter; exponential method; absorption measurement; uncertainty; temperature drift; fused silica

1 引言

投影物镜系统是深紫外光刻系统最核心的部分之一^[1-2]。物镜元件在激光作用下的吸收损耗是系统的一项重要技术指标^[3]；一方面，光刻投影物镜系统极其复杂，包含数十个元件，若每个元件的吸收增加0.1%，则系统的整体透过率将下降百分之几；另一方面，经过长时间的激光照射，部分辐射能量转移至物镜元件中，由于元件的热变形，系统会出现一定的热像差，从而降低系统的成像质量^[4]。因此，提高元件吸收的测量精度，准确掌握物镜元件的吸收特性，是光刻投影物镜系统研究的重要内容之一。

激光量热法始于20世纪70年代^[5]，是一种日趋成熟的吸收测量方法。相对于传统的光度法，激光量热法的测量原理基于光热转换，更符合元件吸收过程的物理实质，被测样品的吸收率可以直接由实时监测并提取的温度信号、泵浦激光束的能量、样品比热容等数据计算出来^[6-7]。该方法容易进行标定，并已经被纳入ISO11551国际标准^[8]。在紫外波段，激光量热法也是表征光学材料或元件吸收特性的主要方法。目前，人们开展了很多关于激光量热仪测量精度的研究。J. W. Arenberg^[9]基于脉冲法和梯度法对于实际吸收测量中的不确定度进行了表述。刘浩^[10]等则重点从回归分析的角度对拟合参数 γ 和A进行了不确定度分析，获得了对指数法、脉冲法、梯度法3种数据处理方式的合成不确定度，并指出参数 γ 的拟合误差是造成指数法测量不确定度的主要因素。但是，却少有研究涉及如何提高193 nm紫外波段熔石英材料吸收测量的精度，降低各因素尤其是拟合参数 γ 的不确定度和充分评估背景温度漂移对测量不确定度的影响。

本文首先简单介绍了激光量热仪以及指数法的原理，然后根据指数法的数据处理公式，通过找出熔石英基底的质量、比热容、激光功率、环境温度等吸收率测量结果的影响量，建立了测量不确定度的评估模型，并对各输入量的估计值以及估计值的标准不确定度逐一进行计算，着重评估了样品仓内由于氮气气流及激光辐照等导致的背景温度漂移。利用Matlab软件编制程序，计算线性以及非线性背景温度漂移对指数法拟合结果(温度测量实验标准差、损耗系数 γ 、吸收率)的影响，进而对各不确定度分量进行合成，获得熔石英基底吸收率的合成标准不确定度和扩展不确定度。

2 原理

2.1 激光量热法原理

激光量热法通过测量样品在激光作用前后的温度变化曲线，利用指数法、脉冲法等方法拟合计算出被测样品的吸收率。典型的激光量热仪包括激光器、衰减器、光束整形镜组、功率计、绝热样品仓等部分，如图1所示，其中，样品仓是一隔热环境。为降低环境空气中氧气吸收对测量的影响，样品仓中充满高纯氮气，并且保持一定的正压，以减小测量过程中样品仓外的环境影响。被测样品

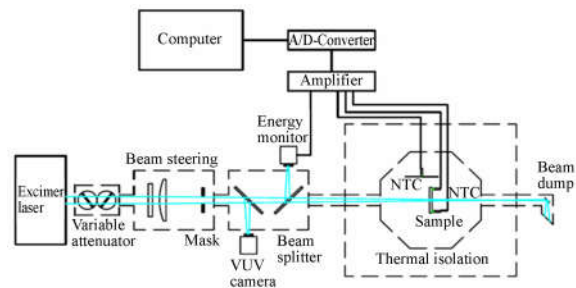


图1 激光量热仪结构图

Fig. 1 Experimental set-up of laser calorimetry

安装于绝热样品仓内带有高精度温度探测器的卡具上。激光器出射的特定波长的脉冲光斑通过衰减器和光束整形镜组调整光斑的能量和形状,照射到样品仓内被测样品的表面上。

在背景环境温度保持不变,样品导热系数无限大等理想情况下,以固定功率为 P 的激光光束照射样品,则样品温度与时间的关系为^[11]:

$$T(t) - T_c = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{1 - \exp[-\gamma(t - t_1)]\}, & t_1 < t < t_2 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{ \exp[-\gamma(t - t_2)] - \exp[-\gamma(t - t_1)] \}, & t > t_2 \end{cases} \quad (2)$$

记录激光照射过程中以及照射后样品的温度变化曲线,根据式(2),利用指数法、脉冲法等计算出样品的热损耗系数 γ 以及吸收率 α 。

2.2 指数法原理

指数法利用激光束照射过程中($t_1 < t < t_2$)传感器的温度与时间的关系曲线 $[T(t_k), t_k]$,通过最小二乘法进行拟合,拟合公式为:

$$\sum [T(t_k) - A_h - B_h \exp(-\gamma_h t_k)]^2 = \min, \quad (3)$$

其中: A_h, B_h, γ_h 为待定参数。

为了利用更多的有效温度数据,提高拟合结果的可信度,在进行数据处理时,对温度上升及下降过程同时进行拟合,则式(3)改写为:

$$\sum_{t_k \leq t_1} [T(t_k) - A - B \exp(-\gamma t_k)]^2 + \sum_{t_k \geq t_2} [T(t_k) - C \exp(-\gamma t_k)]^2 = \min. \quad (4)$$

在计算得出 A 和 γ 后,样品的热吸收系数可以表示为:

$$\frac{u_c(\alpha)}{\alpha} = \sqrt{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial m} u_m\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial P_{\text{aver}}} u_{P_{\text{aver}}}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial c_p} u_{c_p}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial f_c} u_{f_c}\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial \gamma} u_\gamma\right)^2 + \left(\frac{\partial \alpha}{\partial A} u_A\right)^2 + 2\rho \frac{\partial \alpha}{\partial \gamma} \frac{\partial \alpha}{\partial A} u_\gamma u_A = \sqrt{\left(\frac{u_m}{m}\right)^2 + \left(\frac{u_{P_{\text{aver}}}}{P_{\text{aver}}}\right)^2 + \left(\frac{u_{c_p}}{c_p}\right)^2 + \left(\frac{u_{f_c}}{f_c}\right)^2 + \left(\frac{u_\gamma}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{u_A}{A}\right)^2 + 2\rho \frac{u_\gamma u_A}{\gamma A}} \quad (6)$$

考虑未来的工作状态,采用工作波长与光刻投影物镜系统相同的 193 nm ArF 脉冲激光器作为测量光源,其输出功率为 8 W,脉宽为 8 ns,重复频率为 1~1 000 Hz 可调。被测熔石英样品的口径为 25.4 mm、厚度为 1 mm、质量约为 1.2 g,

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\alpha P}{mc} - \gamma(T - T_c), \quad (1)$$

其中: α, m, c, γ 分别表示被测样品的吸收率、质量、比热容以及热损耗系数, T 和 T_c 分别为样品温度和测量环境温度。假设在 t_1 时刻激光光束开始照射样品,在 t_2 时刻停止照射,则根据式(1),样品温度的变化为^[11]:

$$\alpha = \frac{f_c \gamma A \sum m_i c_i}{P_{\text{aver}}}, \quad (5)$$

其中 f_c 为综合修正因子,用来修正由样品实际热导率并非无限大等多种原因引入的系统误差。

3 不确定度分析

根据式(5),利用指数法计算吸收时,结果的不确定度影响因素包括被测样品质量 m 及热容 c_p 、激光功率 P_{aver} 、修正因子 f_c 以及拟合参数 A, γ 等。需要注意的是,温度测量、时间测量以及测量电路热电转换等的不确定度均属于 A, γ 的不确定度分量,对吸收率的测量结果会造成一定的间接影响。根据不确定度合成法则以及式(5),再考虑参量 A, γ 是同时拟合计算得到的,具有一定的相关性,因此,吸收测量结果的合成标准不确定度可以表示为:

表面粗糙度 RMS 优于 0.5 nm。这里对测量不确定度的影响量逐一进行分析。

3.1 熔石英基底质量 m

采用 B 类不确定度评定方式,根据天平的使用说明书,绝对称量误差为 ± 0.01 g,按照矩形分

布 k 取 $\sqrt{3}$, 因此 $u_1 = U_1/k = 0.01\text{g}/\sqrt{3} = 0.006\text{g}$ 。

采用 A 类不确定度评定方式, 多次测量熔石英基底的质量, 结果分别为 1.18, 1.18, 1.17, 1.17, 1.18, 1.17, 1.18, 1.19, 1.17, 1.18 g, 则计算质量 m 的平均值为 1.18 g, 标准差 σ 为 0.006 3 g, 取一位有效数字, 即 $u_2 = \sigma = 0.006\text{g}$, 故计算得质量 m 的标准不确定度为 0.008 g, 相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(m)$ 为 0.7%。

3.2 样品热容 c_p

查询厂家的技术文档, 所采用的熔石英基底的热容值为 0.770 J/(K · g)。同样按照矩形分布, 根据热容的有效数字位数计算其标准不确定度为 $0.0005/\sqrt{3} = 0.0003\text{J}/(\text{K} \cdot \text{g})$, 相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(c_p)$ 是 0.1%^[9]。

3.3 激光功率 P_{aver}

根据生产厂家提供的资料, 激光功率的测量扩展不确定度为 $\pm 3\%$, 扩展因子 k 为 2, 则 $u_{1\text{rel}} = U_1/k = 3\%/2 = 1.5\%$ 。利用功率计测量激光照射熔石英基底的功率值, 120 s 内的平均值为 0.120 W, 标准偏差为 0.000 6 W, 相对标准偏差为 0.5%, 故激光功率 P_{aver} 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_{\text{aver}})$ 为 1.6%。

3.4 修正因子 f_c

利用黑体对修正因子 f_c 进行测量。黑体的实际表面吸收率为 99.5%, 最大相对偏差为 2%, 置信概率为 99.5%, 同时考虑到黑体的吸收率不可能超过 100%, 故扩展因子 k 取 3, 则黑体的相对吸收不确定度为 $2\%/3 = 0.7\%$ 。激光照射能量密度设定为 $4\text{mJ} \cdot \text{cm}^{-2}/\text{pulse}$, 重复频率为 200 Hz。多次测量黑体的吸收率, 并根据式(4)~(7)计算修正因子 f_c 。10 次测量结果分别是: 104.8%, 103.6%, 104.3%, 103.9%, 104.7%, 105.5%, 104.8%, 104.9%, 104.4%, 103.8%。计算修正因子 f_c 的平均值为 1.05, 标准差为 0.006 5, 即相对不确定度为 0.6%, 则 f_c 的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(f_c)$ 是 0.9%, 即:

$$f_c = \frac{99.5\%}{\alpha} \quad (7)$$

$$T(t) - T_C = \begin{cases} \xi(t - t_0) - \frac{\xi}{\gamma}, & t \leq t_1 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{1 - \exp[-\gamma(t - t_1)]\} + \xi(t - t_0) - \frac{\xi}{\gamma}, & t_1 < t < t_2 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{\exp[-\gamma(t - t_2)] - \exp[-\gamma(t - t_1)]\} + \xi(t - t_0) - \frac{\xi}{\gamma}, & t > t_2 \end{cases}, \quad (9)$$

3.5 拟合参数 A, γ

根据参考文献[10], 采用线性回归分析法, 根据吸收测量不确定度算法流程图(图 2)计算拟合参数 A, γ 的相对不确定度, 具体计算结果参见 4.2.3 节。 A, γ 的相关系数 ρ 取最大值 1 时, 协方差项的不确定度值小于 0.1%, 由此表明二者的相关项对不确定度影响很小, 可以忽略不计。

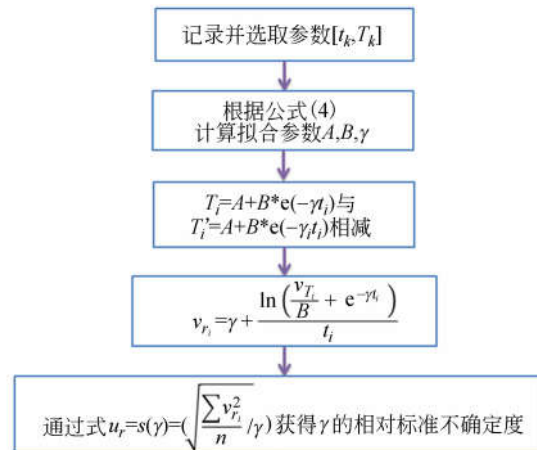


图 2 吸收测量不确定度流程图

Fig. 2 Flow chart of uncertainty measurement for laser calorimetry

根据以上分析及计算, 激光量热仪指数法测量吸收的不确定度的主要影响量是 γ 的不确定度。因此需对影响 γ 的主要因素进行分析, 并对 γ 进行计算和优化, 以减小 γ 引入的测量不确定度。

4 温度漂移及 Matlab 模拟

在熔石英样品吸收的测量过程中, 受氮气输入、激光辐射等影响, 样品仓内的背景温度会发生一定波动。当背景温度随时间呈线性关系时, T_C 随时间的变化可以表示为^[11]:

$$T_C(t) = T_C(t_0) + \xi(t - t_0). \quad (8)$$

根据式(1)和式(8), 被测样品的温度变化修正为^[11]:

其中: $T_C(t_0)$ 表示初始背景温度, ξ 为背景温度漂移系数。

记录激光照射前一段时间内的背景温度值, 利用线性函数拟合计算背景温度的漂移系数 ξ , 通过外推法修正吸收测量过程中样品的背景温度 $T_C(t)$, 可以在一定程度上提高数据拟合的可靠性。但是当激光开始照射后, 受到激光辐射的影响, 背景温度漂移系数 ξ 将发生变化, 利用上述方法修正温度测量结果就会存在较大的误差。因此, 在样品仓内设置一个参考点并实时测量吸收测量过程中参考点的温度, 将被测样品与参考点的温度差作为最终测量结果, 可以有效降低背景温度变化对测量结果的影响。图 3 是利用参考点修正后的测试曲线及拟合温度曲线。

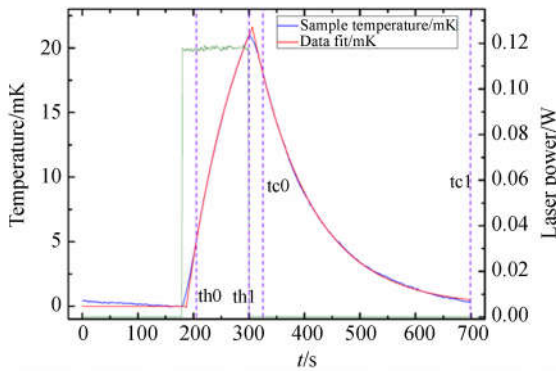
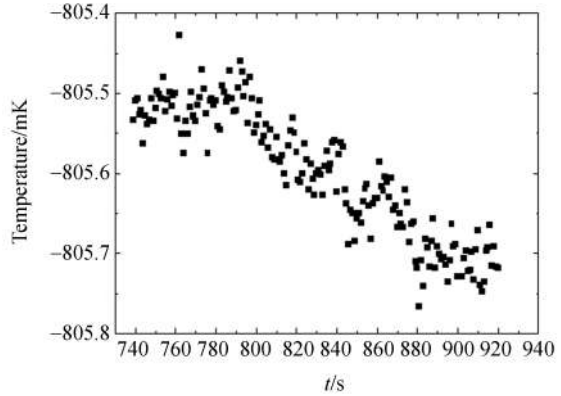


图 3 激光量热法温度测量曲线

Fig. 3 Temperature curve measured by laser calorimetry

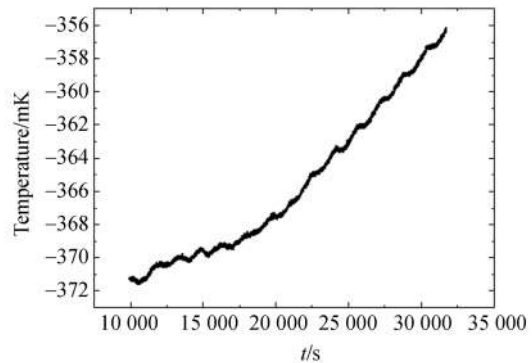
由于样品仓内各点气体温度流动性等原因, 仓内的温度均匀性难以保持绝对稳定, 因此参考点的温度与样品背景温度存在一定的差值, 并且该差值随时间变化。在数据的实际处理前, 应补偿样品背景温度与参考点之间的温度差, 并根据式(8)和式(9)对吸收测量数据进行修正。当样品仓内氮气的纯度足够高、热交换等待时间足够长时, 短时间内参考点与样品背景温度差随时间的变化如图 4(a) 所示, 近似呈线性关系, 斜率约为 $-2 \mu\text{K/s}$; 长时间内的温度差与时间可能为非线

性关系, 如图 4(b) 所示。另外在实际测试过程中, 由于激光作用的局域性, 参考点与实际熔石英样品附近背景之间的温度差异的变化趋势不可预估, 若一直采用线性函数对测量的温度进行补偿, 会产生一定的误差。



(a) 短时间

(a) In short time



(b) 长时间

(b) In long time

图 4 参考点与样品温度之差

Fig. 4 Temperature differences between samples and reference

考虑参考点与背景温度之差与时间为 N 次非线性函数关系时, T_C 随时间的变化修正为式(10), 则被测熔石英样品的温度变化可根据式(11)进行修正。

$$T_C(t) = T_C(t_0) + \xi_1(t - t_0) + \dots + \xi_N(t - t_0)^N, \quad (10)$$

$$T(t) - T_C = \begin{cases} \sum_{n=0}^N (-1)^n + \frac{\xi_n A_N^n}{\gamma^n} (t - t_0), & t \leq t_1 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{1 - \exp[-\gamma(t - t_1)]\} + \sum_{n=0}^N (-1)^n + \frac{\xi_n A_N^n}{\gamma^n} (t - t_0), & t_1 < t < t_2 \\ \frac{\alpha P}{\gamma mc} \{\exp[-\gamma(t - t_2)] - \exp[-\gamma(t - t_1)]\} + \sum_{n=0}^N (-1)^n + \frac{\xi_n A_N^n}{\gamma^n} (t - t_0), & t > t_2 \end{cases} \quad (11)$$

利用激光量热仪对熔石英样品进行了一次实际吸收测量。根据式(4)以及式(11),利用 Matlab 进行编程,计算测量数据,拟合不同级次温度漂移系数时吸收率及拟合残差的均方根(Root Mean Square,RMS)值,以分析不同级次的修正对拟合结果的影响。Matlab 拟合界面如图 5 所示, $N \leq 5$ 时的拟合结果如表 1 所示。

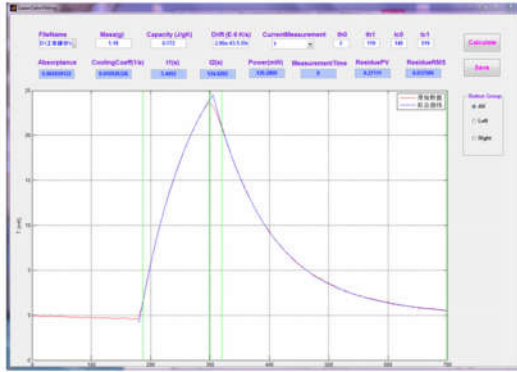


图 5 Matlab 拟合界面

Fig. 5 Interface of fitting by Matlab software

表 1 N 次温度变化拟合结果

Tab. 1 Results of N ordered temperature fitting coefficients

N	ξ_1	ξ_2	ξ_3	ξ_4	ξ_5	$\alpha(\%)$	RMS
1	0.543					0.263	0.056 7
2	-5.55	-2.86e-3				0.266	0.037 5
3	8.15e-2	1.83e-2	-6.44e-5			0.262	0.039 3
4	1.866	1.41e-2	-1.48e-4	2.73e-7		0.263	0.035 0
5	2.188	1.75e-2	-1.43e-4	5e-9	1e-9	0.265	0.032 8

利用不高于 5 次的非线性函数修正温度后,吸收率的计算结果相差约 30×10^{-6} ,即相对平均吸收率约为 1.2%,故可以认为参考点与实际背景的温度差随时间呈线性变化。针对线性温度漂移系数 ξ_1 展开进一步研究,以分析 ξ_1 对拟合残差、吸收率和热损耗系数 γ 的影响。改变 ξ_1 的值进行数据拟合,得到拟合残差、热损耗系数 γ 及吸收率与 ξ_1 的变化关系,如图 6 所示。

根据图 6,当 ξ_1 为 $2 \mu\text{K/s}$ 时,温度的实验标准差数值最小,据此评估参考点相对于背景温度的变化趋势,进而计算热损耗系数 γ 为 0.010,吸收率为 0.267%。在去除背景温度变化后,样品的实际温度随时间变化修正为数据 $[t_k, T]$,并利用修正后的数据,按照回归分析,通过最小二乘法拟合计算得到参数 A, γ 的值及其相对不确定度,

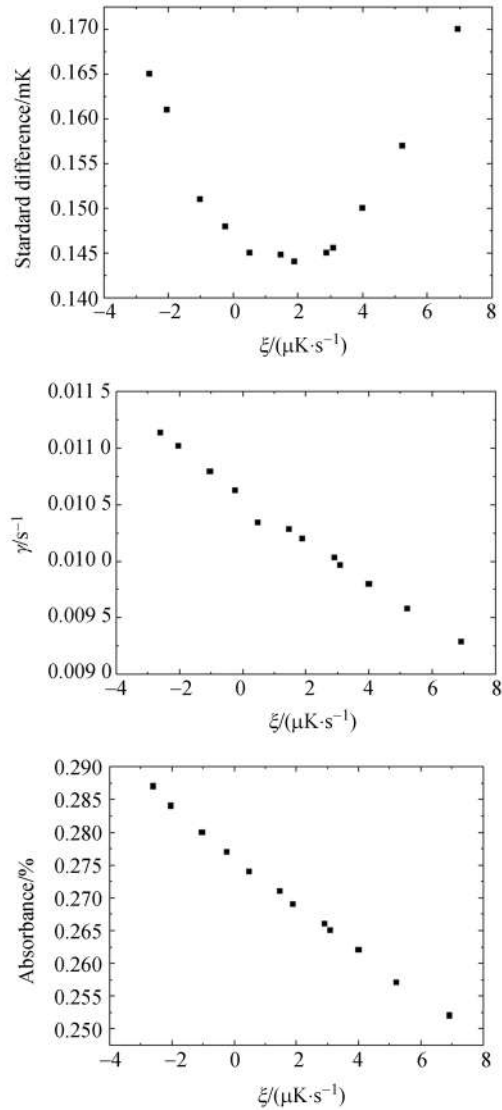


图 6 不同温度系数下拟合残差、损耗系数以及吸收率
Fig. 6 Fitting residuals, cooling coefficients and absorptions with different temperature drifts

结果分别为 0.8%, 1.5%。而未使用参数 ξ_1 对温度测量结果修正时,拟合参数 γ 的相对不确定度为 2.2%。在环境温度漂移较大时, γ 的相对不确定度增长非常迅速,当 ξ_1 达到 -6 时, γ 的相对不确定度为 5.6%。因此,为提高激光量热仪指数法测量吸收结果的可信度,在数据拟合计算时应充分考虑背景温度随时间的变化关系,利用式(11)计算多阶温度补偿系数 ξ_N 的大小,从而修正测量的样品温度 $T(t)$,以减小测量结果的不确定度。

综合由不确定度分析、模拟计算及实验测量等获得的数据,计算激光量热仪指数法测量熔石

英基底吸收的各不确定度分量,结果如表 2 所示。

表 2 激光量热法的测量不确定度

Tab. 2 Uncertainties of laser calorimetry measurement

输入量 X_i	估计值 x_i	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏系数 c_i	相对标准不确定度
m	1.18 g	0.009 g	1	0.7%
c_p	0.770 J/(K·g)	0.003 J/(K·g)	1	0.1%
P_{aver}	0.120 W	0.002 W	1	1.6%
f_c	104%	0.009	1	0.9%
A	0.304 K	0.002 4 K	1	0.8%
γ	0.01 s ⁻¹	0.000 27 s ⁻¹	1	1.5%
α	0.266%	—	—	2.6%

根据式(5),利用表 2 中的数据计算熔石英的吸收率,计算结果为 0.266%,相对合成不确定度 u 为 2.6%。当 $k=2$ 时,计算相对扩展不确定度 $U=5.2%$ 。

5 多次测量平均值的不确定度

多次测量并通过特定公式计算被测量的最佳

估计值时有两种方法:其一是计算各输入量多次测量结果的平均值,将平均值作为最佳估计值代入公式计算被测量的最佳估计值;其二是直接将各输入量的单次测量值代入公式以计算被测量的单次测量值,并将多个单次测量值的平均值作为被测量的最佳估计值。在熔石英基底的吸收测量中,采用第一种方法时,参数 A, γ 受拟合不确定度的影响很大,即使取 A, γ 的平均值作为最佳估计值,也会引入较大的不确定度分量。为准确测量吸收率,这里选取另一块熔石英基底样品并多次测量其吸收率,根据激光功率 P 的单次测量最佳估计值以及 A, γ 的拟合值,利用第二种方法分析吸收率测量结果的不确定度,并与第一种方法进行对比。其中,激光能量密度设定为 5 mJ·cm⁻²/pulse,激光照射频率设定为 1 000 Hz,照射时间和降温时间分别设定为 120 s 和 400 s。为有效消除剂量效应^[12-14],每组测试前均进行了总剂量为 5 kJ/cm² 的激光预处理。实验进行了 3 组,每组包括 10 次测量。测量结果及其平均值和标准差如表 3 所示。

表 3 吸收测量的重复性

Tab. 3 Repeatability of absorbance measurements

(%)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Aver	Std
0.344	0.342	0.344	0.342	0.341	0.340	0.335	0.333	0.335	0.333	0.339	0.004 4
0.337	0.334	0.336	0.335	0.336	0.333	0.338	0.338	0.335	0.337	0.336	0.001 7
0.340	0.339	0.341	0.339	0.340	0.341	0.343	0.344	0.344	0.343	0.341	0.002 0

计算测量 A 类不确定度的评定公式为:

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{m(n-1)}}, \quad (12)$$

其中: x_{ij} 表示第 i 组实验的第 j 个测量结果, \bar{x}_i 表示第 i 组实验中 n 个结果的平均值, m 为总的测量组数, n 表示每组的测量次数。将 10 次测量结果的平均值作为吸收的实际测量结果,则计算得到熔石英基底的吸收率 α 为 0.339%。根据式(12),计算吸收率测量结果的相对标准不确定度为 2.2%。根据不确定度的概念,影响量 m, c_p, f_c 在测量过程和吸收率计算过程中为固定值,而影响量 P, A, γ 则为变量,故以多次测量平均值为吸收值的不确定度中应包含 m, c_p, f_c 的不确定度分量。根据前一节的分析,分别计算出 m, c_p, f_c 的

相对标准不确定度分量,结果分别为 0.7%、0.1%、0.6%,合成吸收结果的不确定度分量,获得其合成相对不确定度 $u=2.3%$ 。同样当取扩展因子 $k=2$ 时,计算相对扩展不确定度 $U=4.6%$ 。

6 结 论

本文从激光量热法指数法的吸收率计算公式出发,通过分析吸收率测量结果的影响分量,建立了熔石英基底测量不确定度的评估模型,进而对各输入量的估计值以及其标准不确定度逐一进行计算。然后对吸收率测量结果的不确定度进行了评估,其中,重点对由数据拟合计算获得的参数 A, γ 的值进行了修正。利用 Matlab 软件编译程

序,计算了线性背景温度漂移以及高阶非线性温度漂移系数对测量不确定度的影响,并通过修正熔石英样品的温度测量曲线,降低了拟合不确定度对吸收测量结果的影响。在计算熔石英基底吸收率的同时,也得到了其相对标准不确定度及扩

展不确定度,分别为2.6%和5.2%。最后,对熔石英基底进行多组/次吸收测量,以10次测量结果的平均值作为吸收率,并计算了其相对标准不确定度为2.3%,相对扩展不确定度为4.6%,与评估结果基本相同。

参考文献:

- [1] 赵阳,巩岩.深紫外光刻照明系统光束整形单元的设计[J].光学精密工程,2011,19(1):29-34.
ZHAO Y, GONG Y. Design of beam shaping unit for deep ultraviolet lithographic illumination system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(1):29-34. (in Chinese)
- [2] 巩岩,张巍.193 nm 光刻曝光系统的现状及发展[J].中国光学与应用光学,2008,1(1):25-35.
GONG Y, ZHANG W. Present status and progress in 193 nm exposure system in lithography [J]. *Chinese Journal of Optics and Applied Optics*, 2008,1(1):25-35. (in Chinese)
- [3] 新京城,金春水,邓文渊.193 nm 光学薄膜激光量热吸收测试及系统矫正[J].分析仪器,2011(1):59-64.
JIN J CH, JIN CH SH, DENG W Y. Measuring absorption of 193 nm thin-film by laser calorimetry and system calibration [J]. *Analysis Instruments*, 2011(1):59-64. (in Chinese)
- [4] 杨光华,李艳秋.22 nm 极紫外光刻物镜热和结构变形及其对成像性能影响[J].光学学报,2012,32(3):0322005.
YANG G H, LI Y Q. Thermal and structural deformation of projection optics and its influence on optical image performance for 22 nm extreme ultraviolet lithography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):0322005. (in Chinese)
- [5] PINNOW D A, RICH T C. Development of a calorimetric method for making precision optical absorption measurements[J]. *Appl. Opt.*, 1973, 12(5):984-992.
- [6] RISTAU D, EBERT J. Development of thermo graphic laser calorimeter [J]. *Applied Optics*, 1986, 25:4571-4578.
- [7] DECKMANN M, WILLAMOWSKI U, RISTAUET D, et al. Antireflective coating on optical fibers for high-power solid-state lasers [J]. *SPIE*, 1992, 1848:265-280.
- [8] ISO 11551:2003(E). *Test Method for Absorptance of Optical Laser Components*[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2003.
- [9] ARENBERG J W. An error analysis of ISO 11551 [J]. *SPIE*, 2000,3902:324-331.
- [10] 刘浩,马平.激光量热计不确定度分析[J].应用光学,2011,32(5):942-948.
LIU H, MA P. Uncertainty analysis of laser calorimetry[J]. *Journal of Applied Optics*, 2011, 32(5):942-948. (in Chinese)
- [11] WILLAMOWSKI U. Measuring the absolute absorptance of optical laser components [J]. *Applied Optics*, 1998,37(36):8362-8370.
- [12] BALASA L, BLASCHKE L, IMPACT J, et al. Impact of SiO₂ and CaF₂ surface composition on the absolute absorption at 193 nm [J]. *SPIE*, 2011, 8190:81901T.
- [13] LI W J, LI B CH. Repetition rate dependence of absorption of fused silica irradiated at 193 nm[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2013,11(5):053002.
- [14] NATURA U, MARTIN R, von der GOENNA G, et al. Kinetics of laser induced changes of characteristic optical properties in lithosil with 193 nm excimer laser exposure[J]. *SPIE*, 2005, 5754:1312-1319.

作者简介:



谷勇强(1982—),男,河北赵县人,博士,助理研究员,2004年、2007年于中国科学技术大学分别获得学士、硕士学位,2013年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学加工方面的研究。E-mail: yqgu82@163.com



张立超(1979—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,2000年、2003年于吉林大学分别获得学士、硕士学位,2007年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事短波光学薄膜技术方面的研究。E-mail: zhanglc@sklao.ac.cn.

(版权所有 未经许可 不得转载)