

目 次

1 范围	1
2. 规范性引用文件.....	1
3. 术语和定义.....	1
4. 使用符号和量度单位.....	1
5. 测量方法.....	2
5.1 测量原理.....	2
5.2 测量光路和测试仪器.....	3
5.3 测试样品准备.....	7
6 测试程序.....	7
6.1 概述.....	7
6.2 光热信号幅值与相位测量.....	8
6.3 光热信号幅值和相位分布测量.....	8
6.4 光热信号幅值的标定.....	9
6.5 测量结果评估.....	10
7 结果评定.....	11
7.1 吸收的光热测量.....	11
7.2 吸收率的光热标定.....	12
7.3 吸收的二维/三维分布成像测量.....	13
7.4 成像区域和空间分辨率.....	14
8 测试报告.....	14
附录 A （资料性）标定的理论和实际考虑.....	16
附录 B （资料性）表面吸收和体吸收的分离.....	18
附录 C （资料性）测试报告.....	20

激光器和激光相关设备 激光光学元件吸收分布测量 方法 光热成像法

1 范围

本文件规定了激光光学元件的吸收测量和高空间分辨二维/三维扫描吸收分布成像测量的测试要求、测试系统、测试程序、数据采集和处理方法以及吸收率标定方法。

本文件适用于光学激光元件二维/三维吸收分布成像测量，即测量吸收与位置的函数，可用于高功率/高能激光系统中的大口径光学元件的吸收缺陷/吸收分布检测。

2. 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 3102.6-1993 光及有关电磁辐射的量和单位；

GB/T 15313-2008 激光术语；

GB/T 25915.1-2021 洁净室及相关受控环境 第1部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级

3. 术语和定义

GB/T 15313 界定的以及下列术语和定义适用于本标准。

3.1

吸收 absorption

激光光学元件吸收的辐射通量。

3.2

吸收率 absorptance

吸收辐射通量与输入辐射通量的比值。

3.3

吸收分布 absorption distribution

吸收率分布 absorptance distribution

测量的吸收（3.1）/吸收率（3.2）与样品位置的函数。

4. 使用符号和量度单位

表1界定了文件中出现的符号的含义和单位（若涉及）

表1 使用符号和量度单位

符号	单位	含义
A		被测样品的吸收率
A_0		标定样品的吸收率
S		被测样品的光热信号幅值

S_0		标定样品的光热信号幅值
P, P_0	W	泵浦激光功率
$\Delta I, I_0$		光热透镜中探测到的探测光强变化和直流探测光强度
I_1, I_2		光热偏转中双单元探测器中的两个光探测器探测的探测光强
D	m^2s^{-1}	被测样品热扩散系数
$\Delta\varphi(x, y)$		光热引起的探测光的光学相移
α_{th}	K^{-1}	被测样品的线性热膨胀系数
d_n/dT	K^{-1}	被测样品的折射率温度系数
ν		被测样品的泊松比
f	Hz	泵浦激光的调制频率
μ_{th}	m	被测样品热扩散长度
a	m	泵浦激光入射到被测样品的光斑直径
λ	m	探测光的波长
z	m	探测距离
$T(x, y, z)$	K	被测样品或者标定样品内部由于光热效应导致的温升
B, C		比例系数
β		根据标定样品的功率归一化光热幅值与测量的吸收率光学线性拟合的斜率

5. 测量方法

5.1 测量原理

5.1.1 概述

基于光热效应，光热技术对激光光学元件的弱吸收测量具有很高的灵敏度。在一个典型光热实验中，一束泵浦光用于辐照待测样品的表面，由于光吸收，样品内部产生热量，从而形成了一定的温度分布。对激光光学元件来说，样品由于热膨胀将会产生表面形变，而温度的梯度分布也会导致光学元件的折射率随温度分布产生梯度变化。结合光热技术，再利用另一束探测激光光束来检测被测样品表面形变或者折射率梯度变化，就可以对样品的吸收率（吸收）进行测量。通过对光热信号幅值标定就可以得到被测样品的绝对吸收值（吸收率）；通过测量样品不同位置的吸收/吸收率，就可以得到整个样品的吸收/吸收率的分布结果。

光热透镜（或热透镜 TL）和光热偏转（PTD）都可以用于激光光学元件吸收测量及吸收分布扫描测量，因为光热信号的幅值与激光光学元件的吸收/吸收率成线性比例关系，基于反射探测光束和透射探测光束的光热构型都可以用于激光光学元件的吸收测量和吸收分布成像。

5.1.2 光热透镜（TL）

在典型的光热透镜测量构型中，一束未聚焦的泵浦激光辐照在样品表面，由于吸收激光束能量而产生表面形变分布或体内折射率梯度分布，使得这一被照射区域类似一个负透镜

(或正透镜)。用另一束未聚焦的探测光束辐照在相同区域, 反射或者透射的探测光束中心光强的改变就代表光热信号。这种探测光光强的变化可以通过一个针孔光电探测器(一个光电探测器前方带一个小孔光阑)来探测。

5.1.3 光热偏转 (PTD)

在典型的光热偏转测量构型中, 聚焦泵浦激光辐照样品表面, 在被辐照区域由于吸收激光束能量产生表面形变或者体内折射率梯度分布。用另一束聚焦的探测光束辐照该区域, 在反射式光热偏转构型中, 反射的探测光束由于表面形变的斜率而产生偏转; 而在透射式光热偏转构型中, 透射的探测光束由于体内的折射梯度而产生偏转。这种探测光束的偏转代表了光热信号, 而且很容易用一个位移敏感的光电探测器(比如, 二象限探测器)来进行探测。

5.1.4 反射光热探测构型和透射光热检测构型的选取原则

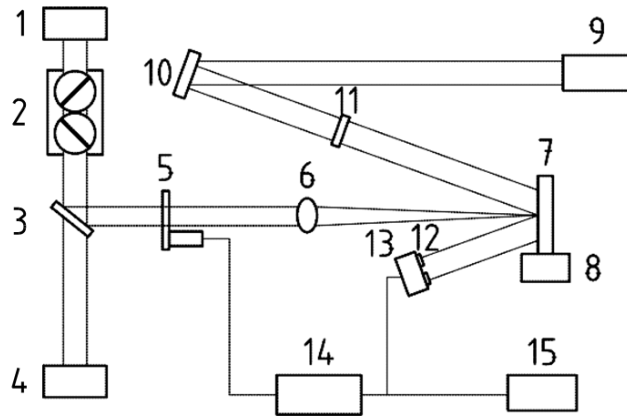
光热透镜和光热偏转两种构型在光路的复杂性、对准要求以及探测灵敏度上都非常类似, 因此都可以用于激光光学元件的吸收测量及吸收分布成像测量。但在反射式探测构型和透射式探测构型的选择上必须要做以下的考虑: 通常来说, 应该选择检测灵敏度更高的检测方案进行更灵敏、更精确的吸收测量。对于线性热膨胀系数大的激光构型元件, 反射式光热探测构型更合适。另一方面, 当元件的折射率温度系数比线性热膨胀系数大得多时, 则透射式探测构型更适用一些。当然, 如果被测样品对探测光束不透明时, 则应选择反射式探测构型。

在用光热方法测量样品吸收时, 以及要区分表面吸收和体吸收时, 则应当选择透射光热测量构型; 当体材料是各项同性且表面吸收可以忽略不计的情况下, 也可以采用反射式光热测量构型。

5.2 测量光路和测试仪器

5.2.1 光热探测光路

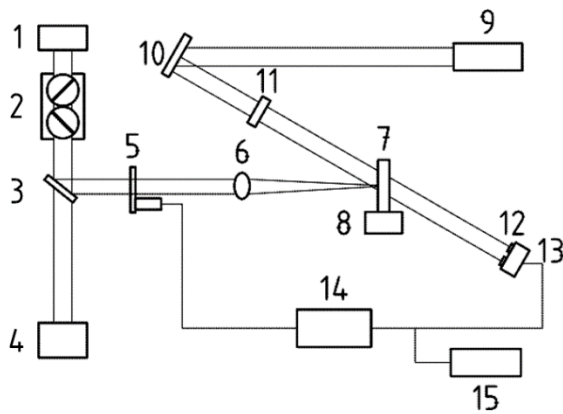
可用于激光光学元件吸收测量和吸收分布扫描成像的光热探测光路一共有四种, 分别是: 表面热透镜(STL), 透射式热透镜(TTL), 反射式光热偏转(或光热位移)(反射 PTD)和透射光热偏转(透射 PTD)。图 1~图 4 依次介绍了 STL、TTL、反射 PTD 和透射 PTD 这四种常用的光热探测的实验光路图。



标引序号说明:

- | | |
|-------------|-----------|
| 1 泵浦激光 | 9 探测激光 |
| 2 泵浦激光可调衰减器 | 10 反射镜 |
| 3 分束器 | 11 探测光衰减器 |
| 4 功率计 | 12 针孔 |
| 5 斩波器 | 13 光电探测器 |
| 6 透镜 | 14 锁相放大器 |
| 7 待测样品 | 15 示波器 |
| 8 位移台 | |

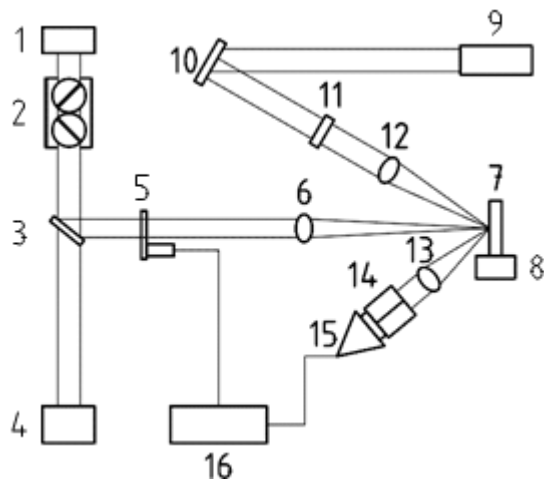
图 1 典型的表面热透镜 (STL) 实验光路图



标引序号说明:

- | | |
|-------------|-----------|
| 1 泵浦激光 | 9 探测激光 |
| 2 泵浦激光可调衰减器 | 10 反射镜 |
| 3 分束器 | 11 探测光衰减器 |
| 4 功率计 | 12 针孔 |
| 5 斩波器 | 13 光电探测器 |
| 6 透镜 | 14 锁相放大器 |
| 7 待测样品 | 15 示波器 |
| 8 位移台 | |

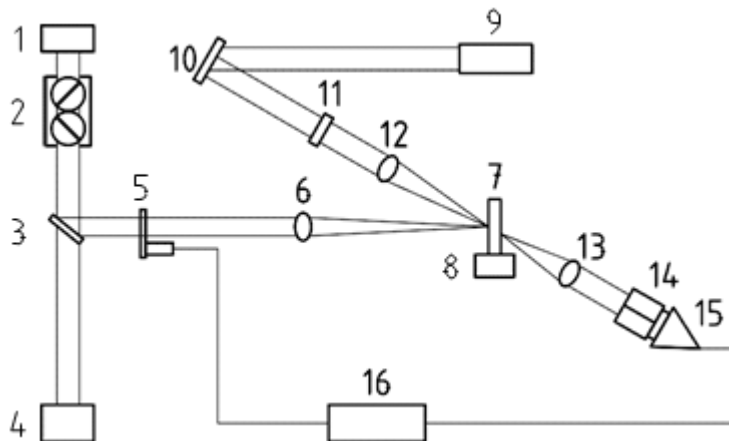
图 2 典型的透射式热透镜 (TTL) 实验光路图



标引序号说明:

- | | |
|-------------|-------------|
| 1 泵浦激光 | 9 探测激光 |
| 2 泵浦激光可调衰减器 | 10 反射镜 |
| 3 分束器 | 11 探测光衰减器 |
| 4 功率计 | 12, 13 透镜 |
| 5 斩波器 | 14 双单元光电探测器 |
| 6 透镜 | 15 差分放大器 |
| 7 待测样品 | 16 锁相放大器 |
| 8 位移台 | |

图 3 典型的反射式光热偏转实验光路图



标引序号说明:

- | | |
|-------------|-------------|
| 1 泵浦激光 | 9 探测激光 |
| 2 泵浦激光可调衰减器 | 10 反射镜 |
| 3 分束器 | 11 探测光衰减器 |
| 4 功率计 | 12, 13 透镜 |
| 5 斩波器 | 14 双单元光电探测器 |
| 6 透镜 | 15 差分放大器 |
| 7 待测样品 | 16 锁相放大器 |
| 8 位移台 | |

图 4 典型的透射式光热偏转实验光路图

5.2.2 泵浦激光

泵浦激光是一束连续波激光，用于加热被测样品。激光波长、入射角和偏振态要与被测样品的实际使用情况一致。泵浦光的偏振态（p 光或者 s 光）应由偏振器控制。如果在激光波长、入射角和偏振态这三项都能可以满足的情况下，就可以搭建出这三者的任意组合的测试系统。

泵浦激光的功率必须足够高，这样由于被测样品的吸收导致的表面形变或者内部折射率梯度分布引起的光热信号才可以被探测到；且泵浦激光的功率能够通过可变衰减器连续调节，并必须保证在功率调节过程中光束轮廓（光斑强度分布）不发生改变；泵浦激光功率通过一个机械斩波器或者声光调制器进行周期性调制，选择合适的调制频率可以获得光热信号的最佳信噪比。

如果吸收扫描成像测量的持续时间超过几分钟以上，就必须如图 1-图 4 中那样在光路中用一个功率计或者光电探测器对激光功率进行实时监控。如果需要消除功率起伏给吸收分布测量带来的影响，则应该将光热信号幅值对监测的激光输出功率进行归一化处理。

泵浦激光是聚焦后辐照到样品表面的，这样才能使样品内部产生足够的温升。在选择聚焦泵浦光斑的尺寸时要考虑到光热信号的信噪比以及吸收扫描测量的空间分辨率及扫描测量区域大小，同时要注意避免聚焦太集中时对被测样品造成激光损伤。

5.2.3 探测激光

探测激光选用的是连续波激光，用于对光热信号进行检测。通常用一高稳定性的氦氖激光器或二极管激光器作为探测激光，输出模式必须是 TEM₀₀ 模，输出功率应小一些（毫瓦量级），这样它将被测样品内由于吸收产生的热才可以忽略。

在热透镜测量构型中，探测光束通常是不聚焦的，或者在被测样品表面或内部两光束交叉区域探测光光斑尺寸至少是泵浦光束光斑尺寸的五倍以上；而在光热偏转测量构型中，探测光束则是聚焦光束，在被测样品表面或内部两光束交叉区域探测光束光斑尺寸至少要小于泵浦光束的光斑尺寸，通过调节探测光束与泵浦光束之间的间距使光热透镜或偏转信号幅值最大化，以获得最佳的信噪比。

在进行吸收率测量和吸收分布二维扫描测量时，探测光照射样品的入射角度通常采用小角度入射，比如小于 10°。在进行被测样品吸收分布三维扫描测量和区分被测样品表面吸收和体吸收时，调节探测光束和泵浦光束之间的夹角时需要综合考虑深度方向的分辨率和光热信号的信噪比。探测光束的入射角需要（在测试报告中）记录下来。

附录 B 详细描述了关于表面吸收和体吸收的分离。

5.2.4 位移平台

为了测量吸收分布，需要使用一个二维/三维的扫描运动平移台来移动样品，这样就可以获得样品吸收分布的二维/三维分布图。运动平移台需由计算机软件控制移动，其位移精

度应优于 10 μm 。

5.2.5 探测单元

在热透镜测量构型中,探测单元由一个小孔光阑、一个对探测光束波长敏感的光电测器和一个锁相放大器组成。通常,小孔光阑的尺寸应当与样品表面的形变或者体内折射率梯度变化区域的横向尺寸相当。

在光热偏转测量构型中,探测单元由一个对探测光束波长敏感的位置敏感探测器(二象限探测器)、一个差分放大器和一个锁相放大器组成。位移敏感探测器的探测靶面面积应大于探测光束的尺寸,以保证所有的探测光束功率都能被位置敏感探测器所接收。在被测样品和探测器之间可以用一个正透镜来调节进入探测器的探测光斑的尺寸,而差分放大器用来去除探测光束偏转信号中的直流分量。

在以上两种情况中,锁相放大器的参考频率应保持和泵浦光束的调制频率完全一样,锁相放大器的时间常数应当根据时间分辨率要求和光热信号的信噪比来设置。

5.2.6 数据采集与处理

在被测样品的每一个位置,通过锁相放大器在一段时间内多次测量光热信号的幅值和相位取平均值并记录下来。光热测量可以在几个不同样品位置重复测量,报告给出的吸收/吸收率的值是不同位置测量结果的平均值。在进行吸收扫描成像测量时,通过扫描平移台控制样品移动,这样就可以测量被测样品在不同位置处光热信号的幅值和相位,选取一定的扫描步长和扫描范围,就可以得到该区域的光热信号幅值的分布图,也就代表了该区域的吸收分布,同时也可以获得光热相位的分布图,有利于表征被测样品的热物理性质。

5.2.7 测试环境

测试地点应该洁净无尘、空气相对湿度介于 40%至 60%之间。空气中残余灰尘粒子个数应当满足 GB/T 25915.1-2021 中规定的 7 级净化间标准。

5.3 测试样品准备

一般来说,测试样品应当是表面平整的基片,比如未镀膜的,镀有高反或者增透膜的平片。当然,具有一定曲率表面的样品的吸收/吸收率同样也可以测量,只是在进行位置扫描时要注意保证不同曲率半径的点的光路是相同的。

测试样品或激光元件的存储、清洁和准备必须严格按照生产厂商的说明执行。

6 测试程序

6.1 概述

不管是表面热透镜测量构型、透射热透镜测量构型、反射光热偏转测量构型,还是透射

光热偏测量构型，都可以用来进行激光光学元件的吸收测量和吸收分布扫描测量，由测得的光热信号幅值确定吸收，通过标定得到被测样品的吸收率，对被测样品不同位置进行扫描测量获得被测样品的吸收分布图。

泵浦光照射被测样品的入射角要根据供应商提供的被测样品使用角确定。对小角度入射角使用的样品，测量吸收的角度一般在 1° - 10° 范围内选择，选取角度后记录下来。

6.2 光热信号幅值与相位测量

被测样品的吸收是用图 1-图 4（表面热透镜、透射热透镜、反射光热偏转、透射光热偏转）所示的四种光热测量方法中的一种测量获得的。在通过锁相放大器读出光热信号幅值之前，光热测量构型的实验参数需要优化，光热测量光路需要仔细调节对准。泵浦光束的调制频率、泵浦光束与探测光束之间的间距、探测距离（即从被测样品到光电探测器的距离）以及光电探测器的横向位置等参数都需要仔细调节，以获取最大的光热信号幅值和信噪比。通常，每个测量位置的光热信号幅值需要记录至少 5 次以上并取平均值。

以熔石英、BK7 或者蓝宝石为基底的激光光学元件，建议泵浦光束的调制频率设置在 50Hz-500Hz 之间，锁相放大器的时间常数设置在 0.1s-1s 之间。采用光热透镜测量构型时，泵浦光束和探测光束应完全重叠，光电探测器的横向位置应与探测光斑尽可能同心以获取最大的光热信号幅值。探测距离根据公式（1）来进行调整：

$$z = B \cdot \frac{\pi a^2}{\lambda} \quad (1)$$

式中 a 为泵浦光束在被测样品表面或内部相互作用区域的半径， λ 为探测光束波长， B 是一个值在 1-10 之间的系数，具体数值与泵浦光束的光斑半径和调制频率有关。

采用光热偏转测量构型时，探测光束与泵浦光束应分开约一倍泵浦光束光斑半径的间距。调整位置敏感探测器的横向位置，使得差分放大器上的直流输出接近零。探测距离一般不小于 10cm，根据泵浦光束的光斑大小和调制频率调节。

6.3 光热信号幅值和相位分布测量

通过电控扫描平移台控制被测样品的位置。在控制软件中设置被测样品的扫描测量区域和扫描步长，对样品进行光热扫描测量，记录每个扫描位置所对应的光热信号幅值和相位。光热信号幅值分布代表了被测样品的吸收分布，光热相位分布则可用于分析样品的热物理性质特性分布。例如，图 5 所示分别为用反射式光热偏转测量构型和表面热透镜测量构型得到的被测样品吸收分布图。

通过紧聚焦泵浦光束并对被测样品进行三维位置扫描，可以得到被测样品的三维吸收分布。图 6 所示为一块融石英基底样品的体吸收三维分布的例子。

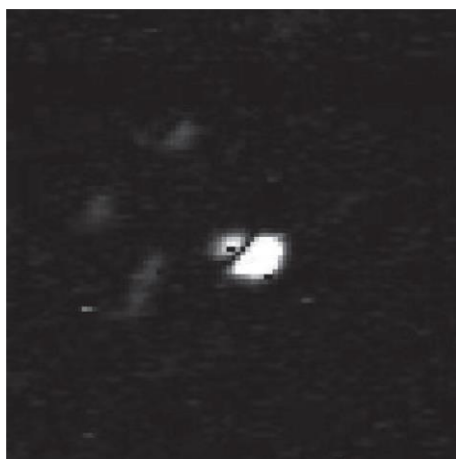


图5 表面热透镜 (STL) 获得的吸收分布扫描测量结果示意图
(扫描范围: 5mm×5mm)

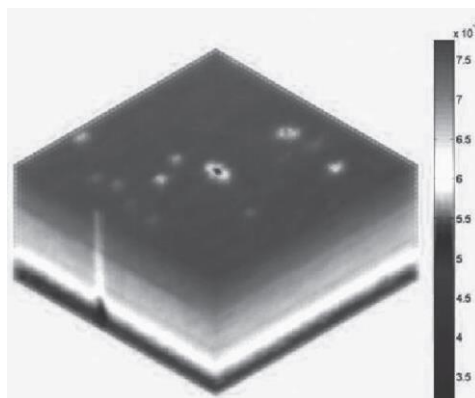


图6 光热透镜法三维扫描测试光学基底吸收分布示意图

6.4 光热信号幅值的标定

由于光热信号幅值与被测样品吸收的线性比例关系,通过采用已知吸收率标定样品对被测样品光热信号幅值进行标定,就可以确定被测样品的绝对吸收率。在进行光热信号幅值标定时,建议选择与被测样品具有相同或相似热物理性质的标定样品(例如相同的基底材料),并在相同实验条件下进行光热信号幅值的标定过程。标定样品的吸收率值可以通过分光光度法、激光量热法等手段获得。

选取标定样品时建议选择跟被测样品具有相同功能的样品。即,对未镀膜的待测样品选取未镀膜的标定样品,镀高反膜的待测样品选取镀高反膜的标定样品,镀增透膜的待测样品选取镀增透膜的标定样品。对镀增透膜标定样品,必须准确知道其基底的吸收系数和增透膜的吸收率,除非基底的吸收远小于增透膜吸收,以致由于基底吸收产生的光热信号幅值可以忽略不计。

建议分别准备一相对高吸收(最大到接近 0.1)和一低吸收(10^{-5} — 0.001)的标定样品。高吸收标定样品的吸收率值可以通过商用分光光度计或者分光光度方法测量得到,低吸收标定样品的吸收率值建议采用测量激光光学元件吸收率的国际标准 ISO11551——激光量热法

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/005313214242011141>