

文章编号 1004-924X(2010)12-2521-09

# 用于材料反射率测量的共轭反射计设计与分析

吴丽雄<sup>1,2</sup>, 王立君<sup>1</sup>, 林新伟<sup>1</sup>, 刘峰<sup>1</sup>

(1. 西北核技术研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024;

2. 国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 为了研究激光辐照过程中材料的耦合特性及耦合特性随温度的变化规律, 设计了一套主体为半球壳, 可用于激光辐照过程中材料反射率在线测量的共轭反射计实验装置, 研制完成的初样其主体内壁在可见-长波红外光谱范围内镜面反射率优于 70%。介绍了测量原理和测试系统的设计方案, 采用光线追迹模拟方法研究了主体部分的设计参数, 分析了开孔位置、入射方向、光斑尺寸、收集孔径以及内壁反射特性对测量收集效率的影响。结果表明: 在设计指标下选用探测光束直径为  $\Phi 10$  mm、收集孔径为  $\Phi 38.1$  mm 时, 收集效率可达到完全收集的 97.8%, 满足测量要求。另外, 用短波激光测量内表面光洁度有更高要求; 理想面型条件下, 限定范围内的收集效率主要由内壁镜面反射率决定; 因此, 半球壳内壁的面型、光洁度、反射率及其均匀性是影响测量精度的主要因素。

**关键词:** 共轭反射计; 反射率测量; 激光辐照; 耦合特性; 收集效率

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20101812.2521

## Design of conjugated reflectometer for reflectance measurement

WU Li-xiong<sup>1,2</sup>, WANG Li-jun<sup>1</sup>, LIN Xin-wei<sup>1</sup>, LIU Feng<sup>1</sup>

(1 *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest*

*Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China; 2 College of Opto-electric*

*Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)*

**Abstract:** A conjugated reflectometer was designed to measure both the total hemispherical reflectance and the specular reflectance of samples in real-time, and it could also be used for temperature-dependent reflectance measurement. The primary component of the conjugated reflectometer is a hemi-ellipsoidal shape shell (axis ratio 10 : 9 : 9) with relatively high specular reflectance ( $>70\%$  in the spectral ranges from visible light to long-wave infrared) on its inner surface. The measuring principle and configuration of the reflectometer were introduced. The main influencing factors of collection efficiency including the position of incident port, incident direction, incident beam diameter, collecting aperture, and the reflection property of interior surface of the hemi-ellipsoidal shell were analyzed and simulated by the ray tracing method qualitatively. Obtained results indicate that a collection efficiency of 97.8% ratio to entire collection can be obtained by the detecting laser beam with a diameter of 10 mm

**收稿日期:** 2010-05-10; **修订日期:** 2010-07-23.

**基金项目:** 国防预研基金资助项目 (No. 51311020301); 激光与物质相互作用国家重点实验室研究基金资助项目 (No. SKLLIM0906)

and collecting aperture of 38.1 mm. Furthermore, the higher degree of fineness is required for a shorter wave measurement; and the collection efficiency for certain area is mainly decided by the specular reflectance of inner surface with a perfect shape. It is concluded that the key factor for the accuracy and reliability of measurement is the machining precision of interior surface of hemi-ellipsoidal shell, therefore, the shape accuracy, degree of fineness and the reflectivity of inner surface are all very important.

**Key words:** conjugated reflectometer; reflectance measurement; laser radiation; coupling characteristics; collection efficiency

## 1 引言

材料的激光耦合系数反映了材料对激光的吸收特性,是开展激光辐照效应实验研究以及相关理论分析和数值计算的基本物理量,其除了与材料的基本物质结构有关外,还与材料的温度、表面状态等因素有关。研究激光辐照过程中材料的耦合特性变化以及耦合特性随温度的变化规律,对分析激光与物质相互作用机理具有重要的现实意义。

耦合系数测量分直接法和间接法两种。对于吸收激光能量转换为内能的材料,可采用直接法即通过测量激光辐照材料引起的温升,计算其吸收的激光能量,与总能量进行比对获得激光耦合系数。受材料尺寸、热特性、入射激光参数和环境条件等因素影响,直接法测量耦合系数难度大且代价较高;在存在相变或者化学变化的情况下,直接测量就更加难以实现。因此,通常采用间接法测量材料激光耦合系数,即通过测量反射与透射,间接获得耦合系数。

对不透明材料,耦合系数测量可归结为反射率的测量。测量反射率的设备大致可分为两类,一类是积分球或半积分球,另一类是具有共轭点的椭球、抛物面或椭球-抛物面组合体<sup>[1]</sup>。椭球/半椭球曲面具有一对共轭焦点,从一个焦点发出的光经内壁反射后汇聚在另一焦点上,椭球法就是利用这一特性实现材料反射率测量的。积分球法测量材料激光反射率通常直接采用积分球或双积分球,国内外的相关文献较多<sup>[2-7]</sup>。基于椭球法测量材料反射率的研究,国外有较多报导<sup>[6-11]</sup>,国内尚未见报导。

测量反射率随温度的变化,需对样品加热使

材料处于不同的温度状态。利用积分球测量时,可采用脉冲加热法<sup>[12]</sup>,但该方法不适用于非导电材料。常规加热法通常在样品背面采用接触式加热或辐射加热,不适合在积分球内部使用。激光辐照加热可实现较高升温率,但较高功率密度下易发生烧蚀造成污染,不适合多次反射的积分球使用。用椭球法测量时,椭球壁与样品相隔,加热样品对椭球面型几乎不会产生影响,可采用常规方法加热,也可实现在较高功率激光作用下材料反射率的在线测量,获取激光辐照过程中材料反射率的变化信息。由于激光在半椭球内壁只经过一次反射,减少了内壁吸收引起的能量损失,同时降低了待测材料热分解产生杂质对测试结果的影响,降低了测量的不确定度。

共轭反射计是基于椭球法测量材料反射率的实验装置,本文将介绍其测量原理及测试系统设计方案,并对其主体部分进行光线追迹模拟,分析开孔位置、入射方向、光斑尺寸、收集孔径以及内壁反射特性等对测量结果的影响。

## 2 测量原理

反射计的主体是一个内壁具有较高镜面反射率的半椭球壳体,利用椭球曲面的聚焦特性实现材料的激光反射率测量,图 1 为测量原理图。其中,窗 1 为加热激光入射窗,窗 3 为探测激光入射窗,窗 4 为探测激光镜面反射光的出射窗。

反射计测量分静态和在线两种方式。静态测量时,将待测样品和探测组件分别置于半椭球的两个焦点处。探测光照射到待测样品上,经样品表面反射后到达球壳内壁,反射、汇聚进入探测组件,测量反射光通量即可得到样品的半球反射率。为避免汇聚光掠入射、收集不全等,引入积分球或

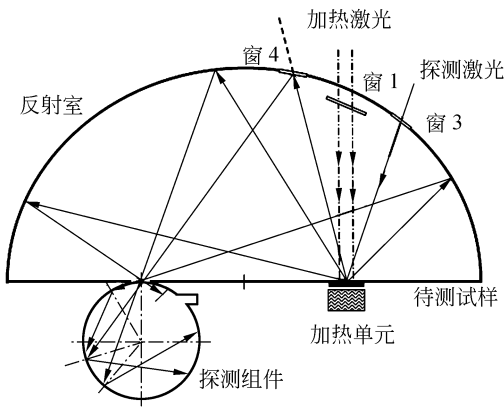


图 1 反射计测量原理图

Fig. 1 Measuring principle of conjugated reflectometer

积分球组收集、匀化汇聚光。

在静态测量方法基础上,从窗 1 引入一束激光辐照样品表面,根据探测器测量的反射光强度变化,可得到激光作用过程中材料反射率的变化情况,实现反射率的在线测量。为区分加热光和探测光,可对探测光进行调制。

利用激光辐照或背面加热单元加热,都能使待测样品处于不同的温度状态,在不同的温度下测量样品的反射率,就可以得到反射率随温度的变化关系。若在镜面反射光出射窗 4 处增设探测设备,还能同时得到样品的镜面反射率。

椭球法测量分绝对法和相对法两种。绝对法测量需要事先知道半椭球内壁的收集效率。假设入射光通量为  $\Phi$ ,反射光通量为  $\Phi_o$ ,内壁收集效率为  $\eta$ ,则被测样品的半球反射率  $\bar{\rho}_s$  的表达式为:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\Phi_o}{\eta \cdot \Phi_i} \quad (1)$$

式中反射光通量  $\Phi_o$  相当于入射至探测组件的光通量。

不考虑积分球入射孔径限制引起的反射光能量损失,可将  $\Phi_o$  视为积分球的入射光通量。为了简化,这里只讨论单积分球的情况。积分球内壁辐照度  $L$  的表达式为:

$$L = \frac{\Phi_o}{\pi A_s} \cdot M \quad (2)$$

其中,  $A_s$  为积分球内表面积,  $M$  为积分球放大系数,  $\pi$  为总立体角。仅将积分球用以收集匀化光束时,  $M$  只与积分球内表面反射率及开孔系数

有关。

对探测器来说,当入射立体角为  $\Omega$  时,其有效面积  $A_d$  上的总辐射通量  $\Phi_d$  为:

$$\Phi_d = L \cdot A_d \cdot \Omega \quad (3)$$

考虑到激光器输出的不稳定性,对探测光进行分束监测。假设监测光路分束比为  $k$ ,测光通量为  $\Phi_m$ ,则入射光通量为:

$$\Phi_i = \Phi_m \cdot k \quad (4)$$

由式(1)~(4),得到考虑探测组件和测量光路后样品的半球反射率表达式:

$$\bar{\rho}_s = \frac{\Phi_d}{\Phi_m} \cdot \frac{1}{k} \cdot \frac{1}{\eta} \cdot \left( \frac{\pi A}{M} \cdot \frac{1}{A_d \Omega} \right) \quad (5)$$

其中,  $\Phi_d$  和  $\Phi_m$  可实时测量,  $\eta$  和  $k$  可通过标定得到,探测组件的相关参数即括号项在系统确定后可视为常数。

由于半椭球的收集效率难以精确测量并经常标定,因此使用反射计时多采用相对法测量。测量时,在样品端放置已知反射率为  $\rho_r$  的标准板,测得积分球探测孔光通量  $\Phi_{d,r}$ ,监测光通量  $\Phi_{m,r}$ ;将标准板换成待测样品,测得积分球探测孔光通量  $\Phi_{d,s}$ ,监测光通量  $\Phi_{m,s}$ ,则待测样品的反射率  $\rho_s$  的表达式为:

$$\rho_s = \rho_r \cdot \frac{\Phi_{d,s}}{\Phi_{d,r}} \cdot \left( \frac{\Phi_{m,r}}{\Phi_{m,s}} \cdot \frac{k_r}{k_s} \right) \cdot \frac{\eta_r}{\eta_s} \quad (6)$$

入射光通量在较小范围内波动时,可认为分束比保持不变,即  $k_r/k_s = 1$ ,式(6)近似为:

$$\rho_s = \rho_r \cdot \frac{\Phi_{d,s}}{\Phi_{d,r}} \cdot \frac{\Phi_{m,r}}{\Phi_{m,s}} \cdot \frac{\eta_r}{\eta_s} \quad (7)$$

若半椭球内壁面型理想且反射率均匀,则  $\eta_r/\eta_s = 1$ ,式(7)近似为:

$$\rho_s = \rho_r \cdot \frac{\Phi_{m,r}}{\Phi_{m,s}} \cdot \frac{\Phi_{d,s}}{\Phi_{d,r}} \quad (8)$$

从表达式(5)和(7)可看出,若不考虑探测仪器及测量方法带来的误差,收集效率对反射计系统测量精度和不确定度有决定性影响。

### 3 系统设计

系统组成如图 2 所示。图 3 为反射计测量系统的实验光路图。反射计由机械主体、加热单元、真空系统和探测组件 4 部分组成。机械主体分半

球形室和柱形室两部分:半球形室为激光加热和反射率的测量室,含真空室外壳、半椭球反射室和底座等;柱形室由筒壁与后盖组成,提供测量信号引出和真空系统接口。加热单元由样品台、加热器、热偶及温控表等组成,用以测量和控制样品的温度和升温速率。

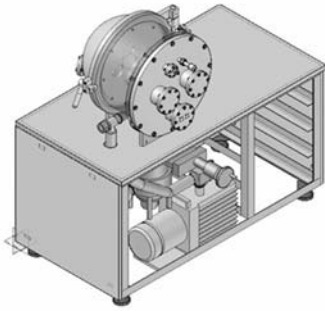


图 2 反射计的系统组成示意图

Fig. 2 System configuration of conjugated reflectometer

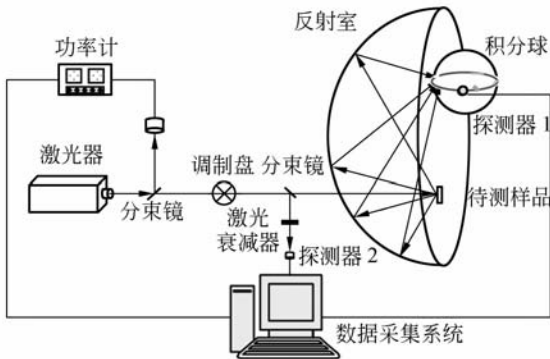


图 3 实验光路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optical path

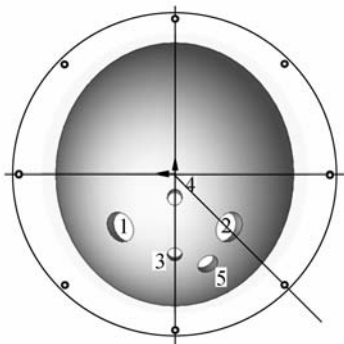


图 4 半椭球反射室开孔示意图

Fig. 4 Distribution of ports on hemi-ellipsoidal dome

图 4 为半椭球反射室的开孔示意图。

反射室内壁三轴比为 10 : 9 : 9, 共开有 5 个孔, 孔的轴线均通过放置样品的焦点。其中, 孔 1, 2 设计为加热激光的入射和镜面反射光出射窗, 孔 3, 4 为探测激光的入射窗及其镜面反射光出射窗, 孔 5 对应于照明和观察窗, 各孔均配有封光板。半椭球内壁镀有金属反射膜及保护膜, 保证其在较宽波长范围内具有较高的镜面反射率和抗激光损伤阈值, 并且满足一定的使用温度要求, 便于清洗和维护。

## 4 光线追迹模拟

图 5 是建立的光线追迹模型示意图。按设计的结构和尺寸建模, 只保留半椭球反射室, 并且假定半椭球内壁和样品都是均匀的。分析时, 改变探测光入射到进入积分球期间接触过的各反射面的反射特性以及入射的激光参数, 模拟得到各处的光强分布。采用均匀光束入射, 追迹光强衰减到初始 1% 就不再计入。

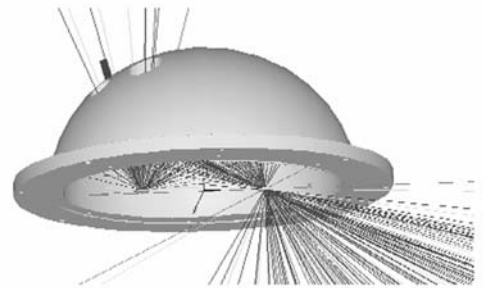


图 5 光线追迹模型示意图

Fig. 5 Analysis model for ray tracing

### 4.1 开孔的影响

由于半椭球内壁不是完整的曲面, 开孔的尺寸、数量以及位置都可能会对收集效率造成影响。假定半椭球内壁为理想镜面, 样品表面理想漫反射, 入射光束直径为 5 mm, 得到不同开孔条件下半椭球曲面的收集效率结果如表 1 所示。

表 1 不同开孔条件下的收集效率

Tab. 1 Collection efficiency with different ports

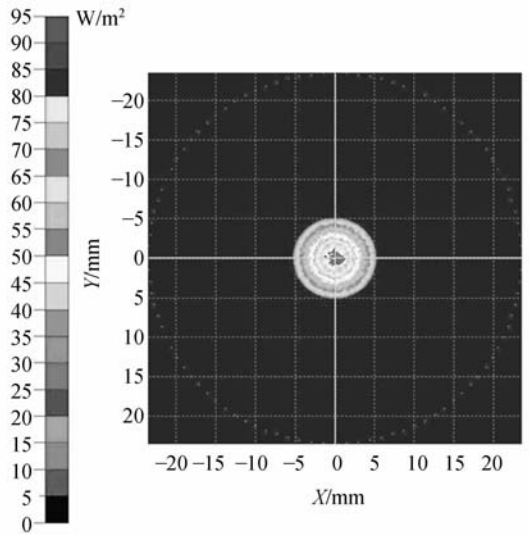
入射窗口	仅开孔 3	开孔 1, 3	开孔 1, 2, 3	开孔 1, 2, 3, 5	开孔 1, 2, 3, 4, 5
窗 1	—	96.13%	93.97%	93.60%	92.20%
窗 3	99.27%	96.10%	93.97%	93.60%	92.20%

从表 1 可以看出,开孔数量增多,总收集效率下降,在主反射光方向开孔时,收集效率下降得较多。因此,应尽可能减少开孔面积,并尽量避免在主反射光方向开孔。为叙述方便,下文中将把仅开孔 3 的情况简称为结构 A,开孔 1,2,3,5 的情况简称为结构 B,未开孔的情况称为连续面。

### 4.2 入射方向

根据图 4,反射计有 4 个光窗,窗 3 和 4 沿长轴方向开孔,窗 1,2 沿垂直长轴方向对称分布。图 6 给出了激光从不同窗口入射时样品端光强的二维分布图。

可以看出,激光从窗 3,4 入射在样品上得到的探测光斑比窗 1,2 入射的更为对称,也就是说沿长轴方向开的孔更加适合用以探测光入射。追



(b) 窗 3,4 入射

(b) Through window 3 or 4

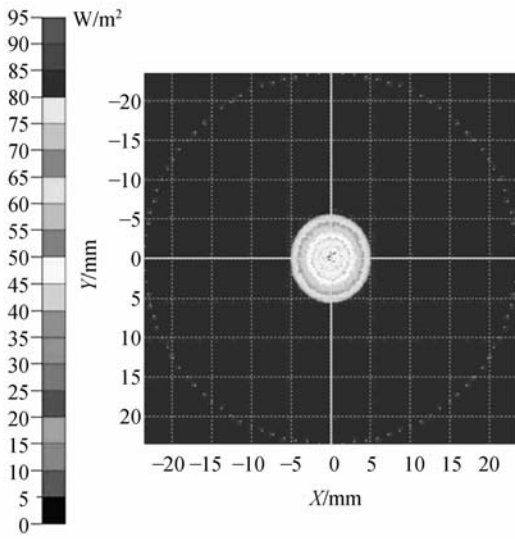
图 6 不同光窗入射时样品端的光强分布

Fig. 6 Irradiance distribution of sample plane through different incident windows

迹结果也表明几种方向入射在内壁和探测端得到的光强分布基本相同。因此,可选择窗 3 作为探测光入射窗,将窗 1 选为加热光入射窗。

### 4.3 光斑与收集孔径

表 2 给出了半椭球内壁为理想镜面,在样品端放置标准漫反射板(99 %漫反射+1 %吸收),不同直径光束从窗 3 入射的追迹结果。下文中所有光强分布曲线,粗线代表 X 方向即长轴方向,细线表示 Y 方向即平行短轴方向;图像标尺均为 50 mm×50 mm。



(a) 窗 1,2 入射

(a) Through window 1 or 2

表 2 不同光束尺寸下探测端的光强分布

Tab. 2 Irradiance distribution of detector plane at different incident beam diameters

入射光束直径		2 mm *	5 mm	10 mm	20 mm
探测端 收集斑 布图像	光强分 布图像				
	光强分 布曲线				

从表 2 的光强分布图像可以看出, 汇聚斑沿轴线方向呈近似椭圆的对称分布。入射光束直径  $\Phi 5 \text{ mm}$  时, 汇聚斑横向扩展达到  $30 \text{ mm}$ 。随着光束尺寸增大, 汇聚斑逐渐弥散变大。也就是说, 探测光束越小汇聚效果越好, 对测量越有利。但考虑到样品的不均匀性, 探测光束不宜太小。图 7 给出了结构 B 下不同光束尺寸和收集孔径的收集效率。

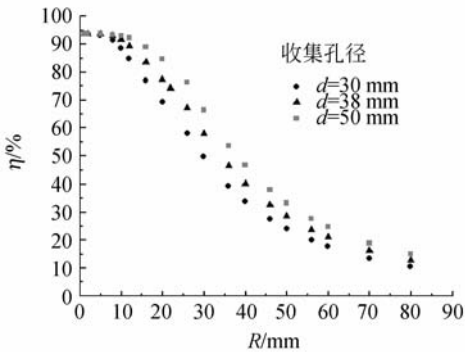


图 7 不同光束尺寸与收集面积的收集效率

Fig. 7 Collection efficiency with different incident beam diameters and collecting apertures

可以看出,  $\Phi 20 \text{ mm}$  光斑入射时,  $\Phi 50 \text{ mm}$  孔径收集能量约为全收集的  $91\%$ ,  $\Phi 30 \text{ mm}$  孔径约收集全部能量的  $74\%$ 。也就是说, 从能量收集的角度, 希望收集孔径尽可能大, 而实际上, 收集孔径受内部空间及积分球设计要求的限制。因此, 有必要对探测光束尺寸与收集孔径进行权衡选择, 使二者相互匹配。通常情况下, 积分球入孔可选为  $38.1 \text{ mm}$  ( $1.5 \text{ inch}$ ), 若采用入射光束尺寸  $\Phi 10 \text{ mm}$ , 收集效率为全收集的  $97.8\%$ , 基本可满足使用要求。

#### 4.4 内壁反射特性

理想情况下, 半椭球曲面的焦点是空间中的两个点, 内壁面型偏差将会导致焦点离散。反射计在测量原理上要求半椭球内壁为理想镜面反射, 划痕、缺陷等的存在会改变反射光方向, 引起光的散射、衍射等。

初期研制中, 测量了内表面存在划痕区域的局部收集效率。如图 8(a) 所示, 激光以一定角度斜入射, 经透镜聚焦至样品端, 发散并辐照于半椭球内壁, 经内表面反射、汇聚至探测端, 取两焦点处功率比值即可得到局部收集效率。图 8(b) 所示为  $\Phi 20 \text{ mm}$  划痕区域, 测量结果为波长  $1.3 \mu\text{m}$  激光局部收集效率约为  $72.5\%$ ,  $10.6 \mu\text{m}$  激光局部收集效率约为  $90.7\%$ , 这表明短波激光测量时对内表面光洁度有更高的要求。

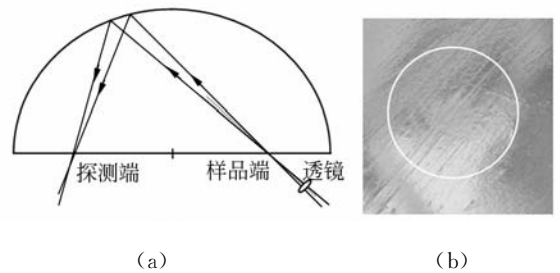


图 8 局部收集效率测量光路与检测部位照片

Fig. 8 Partial collection efficiency measuring path and detecting area

另外, 由于材料反射光分布受其表面形貌影响较大, 半椭球内壁不均匀将会降低待测样品和标准板的可比性。因此, 半椭球内壁面型、镜面反射率及其均匀性都是影响测量精度的重要因素。

目前, 还未能找到合适的模型对它们进行定量分析。改变半椭球内壁镜面反射和漫反射的比例, 从某种程度上可以间接分析内壁反射特性对收集效率和探测端光斑分布的影响。表 3 给出了样品端放置标准漫反射板, 直径  $\Phi 5 \text{ mm}$  的探测光从窗 3 入射, 收集孔径为  $\Phi 50 \text{ mm}$  时, 不同内壁反射特性下的追迹结果。

从表 3 的光强分布结果可看出, 内壁反射特性的变化并未改变汇聚斑形状; 漫反射比重增加, 使汇聚斑强区功率密度下降, 杂散光增强。

图 9 给出了结构 B 下收集效率随内壁镜面反射率的变化关系, 图中点为追迹结果。可以看出, 在内壁及样品反射率分布均匀时, 限定范围内的收集效率主要由内壁镜面反射率决定。

表 3 不同内壁反射特性下探测端的光强分布及收集效率

Tab. 3 Collection efficiency and irradiance distribution of detector plane at different interior surface reflection properties

内壁反射特性	理想镜面	70 % 镜面反射+30 % 漫反射	50 % 镜面反射+50 % 漫反射	
光强分布图像				
收集斑光强分布曲线				
收集效率	连续面 结构 A 结构 B	100 % 99.3 % 93.6 %	70.4 % 70.0 % 66.0 %	50.7 % 50.4 % 47.5 %

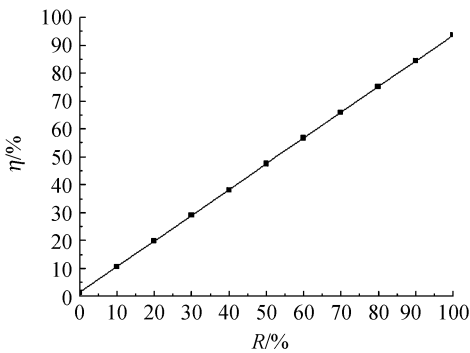


图 9 收集效率随内壁镜面反射率的变化关系

Fig. 9 Collection efficiency versus specular reflectivity of interior surface of hemi-ellipsoidal dome

在上述的追迹模拟中没有考虑底板和孔壁等的影响。事实上,通过追迹可以发现:底板对收集效率的影响不到 1%,其漫反射对汇聚光有少量贡献,镜面反射使半椭球内壁光强分布出现局部增强;通光孔壁对收集效率影响小于 0.1%,所以基本上都可以忽略。

### 5 结 论

本文设计了在激光辐照过程中在线测量材料耦合特性的共轭反射计。介绍了测量原理和设计方案,对系统的主体部分进行了光线追迹模拟,并分析了主要设计参数对收集效率的影响。

通过分析得到以下结论:基于椭球法测量原理的反射计设计时应尽量减少开孔面积并避免在主反射光方向开孔;探测光入射窗最好沿长轴方向开孔;收集孔径与探测光束尺寸是矛盾的两个方面,需要根据实际情况进行综合考虑;半椭球内壁镜面反射率的大小对限定范围内的收集效率起决定性影响,其内壁应具有尽可能高的镜面反射率;内壁存在的划痕、缺陷等会引起光的散射、衍射,短波激光在测量时对内表面光洁度要求更苛刻。总的来说,反射计测量系统的设计对半椭球壳体加工制作提出了很高的要求,半椭球内壁的面型、光洁度、反射率及均匀性都是需要特别关注的技术指标。在探测光路中引入积分球或积分球组收集匀化汇聚光,会带来经积分球衰减后弱信号的采集处理等问题,在设备的研制与后续使用方面,还需开展更深入的研究。

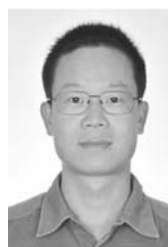
## 参考文献:

- [1] 闵桂荣. 卫星热控制技术[M]. 北京:宇航出版社, 1991.  
MIN G R. *Technology of Satellite Thermal Control* [M]. Beijing: China Astronautics Publishing House, 1991. (in Chinese)
- [2] 张永强, 王贵兵, 唐小松, 等. 两种纤维增强复合材料连续激光烧蚀阈值测量及吸收特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(2): 199-202.  
ZHANG Y Q, WANG G B, TANG X S, *et al.*. Ablation threshold measurement and absorption characteristic analysis of two fiber reinforced composites irradiated by CW laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(2): 199-202. (in Chinese)
- [3] 王贵兵, 刘仓理. 芳纶纤维复合材料对激光的吸收特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(11): 1065-1067.  
WANG G B, LIU C L. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyarylamide fibers irradiated by high power laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(11): 1065-1067. (in Chinese)
- [4] 杨本永, 张黎明, 沈政国, 等. 光学传感器星上定标漫射板的特性测量[J]. 光学精密工程, 2009, 17(8): 1851-1858.  
YANG B Y, ZHANG L M, SHEN Z G, *et al.*. Characteristic measurement of diffuser panel used for on-board calibration for satellite optical sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1851-1858. (in Chinese)
- [5] BERGSTROM D, POWELL J, KAPLAN A. The absorptance of steels to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature [J]. *Applied Surface Science*, 2007, 253(1): 5017-5028.
- [6] JOHN T NEU. Measurement of hemispherical directional reflectance in the infrared [J]. *SPIE*, 1993, 1995: 101-120.
- [7] BERGSTROM D, KAPLAN A, POWELL J, *et al.*. Laser Absorptance Measurements in Opaque Solids [C]. *Proc. of 10th Nordic Laser Materials Processing Conference*, 2005: 91-115.
- [8] ANDREW L S, DONALD F S, R E C, *et al.*. Temperature Effects on Reflectance and Emittance Measurements of Martin Black and Enhanced Martin Blacks Surfaces [J]. *SPIE*, 1996, 2864: 387-405.
- [9] FREEMAN R K, RIGBY F A, DOERR S E, *et al.*. Reflectance of Laser Damaged Spacecraft Thermal Control Materials [J]. *SPIE*, 1998, 3343: 983-994.
- [10] FREEMAN R K, RIGBY F A. Temperature-Dependent Reflectance of Plated Metals and Composite Materials Under Laser Irradiation [J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, 14(3): 305-312.
- [11] ZHANG Z, MODEST M F. Temperature-Dependent Absorptance of Ceramics for Nd:YAG and CO<sub>2</sub> Laser Processing Applications [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1998, 120(2): 322-327.
- [12] 范毅, 李成伟, 戴景民, 等. 利用积分球反射法的动态热物性测量装置研制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35(16): 671-673.  
FAN Y, LI C W, DAI J M, *et al.*. Development of millisecond pulse-heating apparatus by reflectometric technique [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(16): 671-673. (in Chinese)

## 作者简介:



吴丽雄(1980—),女,福建福鼎人,博士研究生,助理研究员,2001年于浙江大学获学士学位,2004年于西北核技术研究所获得硕士学位,主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail: wlx97zju@163.com



林新伟(1974—),男,湖北枝江人,硕士,副研究员,1997年于南开大学获学士学位,2003年于西北核技术研究所获硕士学位,主要从事激光辐照效应方面的研究。E-mail: lin\_xw@163.com



王立君(1967—),男,黑龙江海伦人,研究员,1988年于兰州大学获学士学位,1996年于国防科技大学获硕士学位,主要从事激光辐照效应的模拟实验技术研究。E-mail: wanglijun0317@126.com



刘峰(1962—),男,陕西榆林人,博士,研究员。1983年于兰州大学获学士学位,1991年西北核技术研究所获硕士学位,2006年于西安电子科技大学获博士学位,主要从事强激光大气传输及目标效应的理论和数值模拟方面的研究。E-mail: liufeng-laser@163.com

## ● 下期预告

# 双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪的温度特性

范林勇,江微微,赵瑞峰,裴丽,简水生

(1. 北京交通大学 光波技术研究所,北京 100044;

2. 北京交通大学 全光网络与现代通信网教育部重点实验室,北京 100044)

为了制作出性能稳定,插入损耗较小,适用于温度传感的双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪,对该器件从理论和实验上分别进行了分析。通过将一根单模双芯光纤熔接在两根单模光纤之间,实验制得双芯光纤马赫-曾德尔干涉仪型梳状滤波器。用干涉原理分别分析了该器件的传输谱的自由空间谱宽与波长、双芯光纤的长度和两纤芯间的有效折射率差的关系。实验检测了所制器件的温度特性。随着温度的升高,所制器件的传输谱发生红移(即向长波长方向移动)。在相同温差下,不同波长处的波长漂移值不同,短波长处波长漂移较小,长波长处波长漂移较大。在固定波长处,该器件的传输谱的波长漂移的实验数据与温度变化具有较好的二次曲线关系。该器件的温度灵敏度和波长有关,不同波长处灵敏度不同;固定波长处,灵敏度与温度成正比。通过对单模光纤与双芯光纤熔接处的拉锥处理,可以有效降低所制器件的插入损耗,实验制得插入损耗约为 7 dB 的梳状滤波器。该器件体积小、制作容易、与光纤系统具有良好的匹配性,可以应用于光纤温度传感。