

# 多种光学支架的太赫兹反射特性测量

李运达 李琦 薛凯 王琪

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081)

**摘要** 光学支架是太赫兹(THz)实验系统的重要组成部分,通过研究一些常用的光学支架对 THz 光的反射特性,并以此为依据采取合理的措施降低反射影响,对提高实验精度具有重要意义。对一些常用的光学支架,如方形滤波片固定座、三角块、不锈钢接杆和杆座等,进行了反射率测量实验,采用对比测量法,通过计算获得了不同支架在  $45^\circ$  入射角时对 2.52 THz 光的近似反射率。实验结果表明,光滑的不锈钢接杆反射率较大,实验测得直径为 25 mm 的不锈钢接杆的反射率最高可达约 43%;表面不平整的直径为 25 mm 的喷漆杆座的反射率较低,为 0.62%;而表面有菱形条纹的直径为 28 mm 的升降杆座的反射率仅为 0.35%。

**关键词** 测量;太赫兹;反射率;光学支架;气体激光器

中图分类号 TN29 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201239.s111001

## THz Reflection Properties Measurement of Several Kinds of Optical Brackets

Li Yunda Li Qi Xue Kai Wang Qi

(National Key Laboratory of Science and Technology on Tunable Laser, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150081, China)

**Abstract** Optical brackets are important parts of a terahertz (THz) experiment system. It is of great significance to improve the experimental accuracy by studying the reflection properties of the common optical brackets and taking proper measures to reduce reflection impacts. In this paper, a variety of common optical brackets, such as a square filter fixed bracket, a triangle block, two stainless steel connected rods and several rod bases *et al.*, are measured in the reflection experiments by using contrast measurement method. The reflectivity of the optical brackets with incident angles of  $45^\circ$  using 2.52 THz laser have been obtained approximately. It can be inferred from the results that the smooth stainless steel connecting rods have a relatively higher reflectivity. The reflectivity of the rod with a diameter of 25 mm is about 43%. For the painting rod base with uneven surface and a diameter of 25 mm, the reflectivity is 0.62%. The reflectivity of the diamond-shaped stripe area of the lift rod base is only 0.35%.

**Key words** measurement; terahertz; reflectivity; optical brackets; gas laser

**OCIS codes** 110.6795; 120.5700; 140.4130

## 1 引言

太赫兹(THz)技术是当今激光技术中的前沿课题之一,在物体成像、生物医学、安全检查和军事应用等方面都有很大的应用潜力<sup>[1~5]</sup>。在 THz 光谱技术中,大多数是研究样本的透射光谱。但在某些实际应用中,由于材料透光性较差、样本体积较大或受空间位置限制,其透射光谱无法测量,但是可以通

过测量材料对 THz 光的反射光谱研究材料的反射和散射特性。由于利用脉冲 THz 光可以获得样本反射光谱的振幅和相位信息,学者已经做了很多利用飞秒激光器激发电导天线产生的脉冲 THz 光获取半导体等不同样本材料的反射光谱以及测量粗糙平面反射特性的实验,用于研究材料性质、反射率以及散射影响等<sup>[6~10]</sup>。采用连续单频气体 THz 源

收稿日期: 2012-02-01; 收到修改稿日期: 2012-03-01

作者简介: 李运达(1989—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹成像技术方面的研究。E-mail: liyunda\_hit@yahoo.cn

导师简介: 李琦(1963—),女,博士,教授,主要从事激光雷达与太赫兹成像等方面的研究。

E-mail: hit\_liqi@yahoo.cn

虽然无法获得反射光的相位信息,但是由于实验光路简单,操作方便<sup>[11,12]</sup>,在进行材料反射特性测量方面具有很大的应用潜力。

各种光学支架是太赫兹实验系统的重要组成部分,在实验中由于某些原因使 THz 光照射到其表面,产生的反射光可能会直接影响到实验结果的准确性。所以通过研究一些常用的光学支架对 THz 光的反射特性,并以此为依据选择合理的措施降低反射影响,对减少系统误差和提高实验精度具有重要意义。

2.52 THz(118.83 μm)辐射是较常用的连续激光光源,但对这一波段的材料反射特性的研究较少,对各种光学支架反射特性的测量国内更未见报道,因此本实验中选择 2.52 THz 光进行样本反射特性的测量研究。

本文首先介绍了连续 THz 反射特性的实验光路;然后分别对几种实验室中常用的光学支架进行了测量,通过计算获得相应的反射率,并对实验结果进行了分析。

## 2 实验装置及反射率计算方法

连续 THz 反射特性测量系统原理框图如图 1(a)所示,实验光路如图 1(b)所示。实验中采用美国相干公司的 CO<sub>2</sub> 激光抽运连续 THz 激光器

SIFIR-50 作为光源,工作频率为 2.52 THz,输出功率约为 50 mW。图中的 P 表示离轴抛物面镜。THz 光透过硅片经过 P1 和 P2 将光束扩束准直,然后再经过 P3 照射到硅片上分为参考光和探测光。参考光被功率计测量,探测光聚焦到样本表面,入射角为 45°,其反射光再经过 P4 和 P5 组成的收集系统收集并聚焦到单元探测器,探测器与示波器相连。样本放置在精密转台上,可以通过微调入射角进行相应的测量。实验中采用两台 He-Ne 激光器作为指示光源。利用像元数为 124 pixel×124 pixel 的面阵探测器 Pyrocam III,采用刀口法测量可知 P3 后束腰位置光斑尺寸:水平方向约为 1.08 mm,垂直方向约为 1.16 mm。因为实验中 THz 光的入射角为 45°,所以实际测量光斑的水平方向尺寸将增大。实验中单元探测器的光敏面直径为 2 mm,故聚焦到探测器的光斑尺寸必须要小于 2 mm,否则将产生较大的系统误差。从样本表面反射的 THz 光经 P4 聚焦后的束腰光斑采用刀口法测量光斑尺寸为水平方向 3.35 mm,垂直方向 3.13 mm,超过了探测器的接收范围,所以需要利用 P5 压缩束腰尺寸。此时水平方向为 0.70 mm,垂直方向为 1.02 mm,小于探测器的光敏面直径。另外,实验系统中反射光的接收方向是固定不变的。

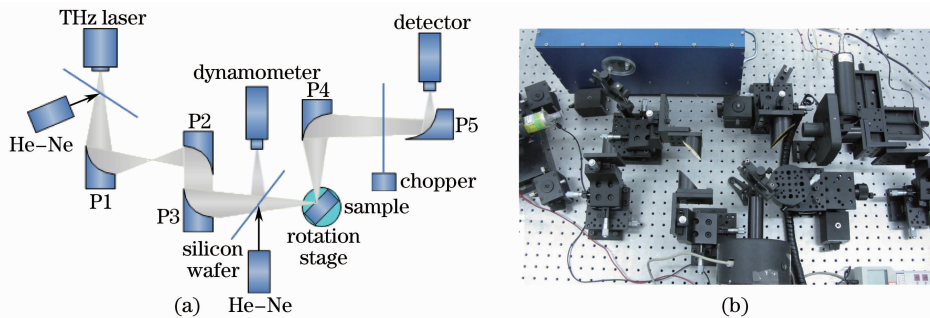


图 1 太赫兹反射特性测量原理框图及实验光路。(a)原理框图;(b)实验光路

Fig.1 Schematic diagram of THz reflection properties measurement and photo of the system.

(a) Schematic diagram; (b) experiment system

根据现有实验条件,实验中采用功率计和探测器分别对参考光和探测光进行测量。为了较准确地获得测量样本的反射率,实验中采用对比测量法,即以全反镜作为定标样本,通过对比待测样本的测量结果和定标样本测量结果,计算得到待测样本的最终测量结果。

测量原理如下<sup>[13,14]</sup>:由于功率计在激光功率较低时误差较大,所以激光器输出 THz 光功率不能太低,但探测器的量程有限,为避免探测器饱和,定标

时在探测器前需加衰减材料。衰减材料的透射率用  $T$  表示。实验中,当对定标样本进行测量时,单元探测器所能接收的 THz 光功率主要由离轴抛物面镜的反射率  $R_p$ 、作为定标样本的反射率  $R_n$ 、衰减材料的透射率  $T$ ,以及光路中其他系统误差引起的对 THz 光的损耗  $E$  所决定。设示波器示数为  $V_i$ ,功率计示数为  $W_d$ ,则

$$V_i/W_d = kER_p^2R_nT, \quad (1)$$

式中系数  $k$  为探测器和功率计测量数据的转换关

系,单位是  $\text{mW/V}$ 。

当对待测样本进行实验时,由于样本反射率一般较小,探测器接收到的 THz 光功率较低,无须加衰减材料。此时,示波器示数  $V'_t$  和功率计示数  $W'_d$  满足

$$V'_t/W'_d = kER_p^2 R_s, \quad (2)$$

式中  $R_s$  为待测样品的反射率。

由(1)式和(2)式可以得到不加衰减材料时待测样本的反射率计算公式

$$R_s = \frac{TR_n}{V'_t/W'_d} \frac{V'_t}{W'_d} = B \frac{V'_t}{W'_d}. \quad (3)$$

当待测样品反射率较高时,单元探测器前仍需加衰减材料。此时待测样本的反射率公式表示为

$$R_s = \frac{R_n}{V'_t/W'_d} \frac{V'_t}{W'_d} = A \frac{V'_t}{W'_d}. \quad (4)$$

具体定标过程为:

1) 测量加衰减材料前后与单元探测器连接的示波器峰峰值数据,记录若干组数据,计算得到衰减材料透射率  $T$ ;

2) 将一反射率约为 98% 的全反镜放在成像位置,转动精密转台保证 THz 光的入射角约为  $45^\circ$ 。同时读取功率计示数和与单元探测器连接的示波器峰峰值,采集 10 组数据;

3) 进行数据处理获得参数  $A$  和  $B$  的值。

### 3 实验测量

实验中利用 A4 纸作为衰减材料,测得其透射率  $T$  约为 0.4214。由于实验中绝大多数样本材料的反射率都不高,不需要采用衰减材料,所以采用(3)式计算样本反射率。在定标过程中,将测得的 10 组数据进行计算并将结果取平均值可以得到系数  $B$  为 0.2189  $\text{mW/V}$ 。

在本实验中分别对常用的光学支架,如方形滤波片固定座、三角块、接杆和杆座等,进行了实验测量。图 2 和图 3 分别为实物照片。

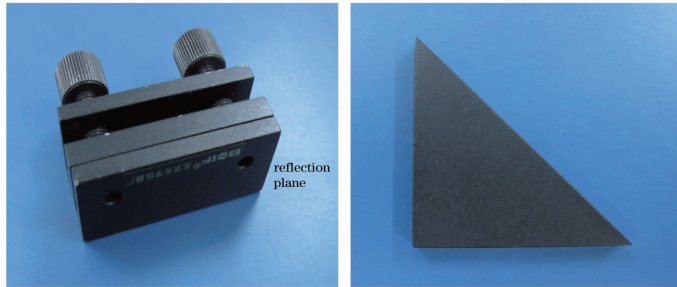


图 2 固定座和三角块照片

Fig. 2 Photos of a square filter fixed bracket and a triangle block



图 3 升降杆座、喷漆杆座和不锈钢接杆照片

Fig. 3 Photos of three lift rod bases, a painting rod base and two stainless steel connected rods

首先对滤波片固定座和三角块进行反射率测量,它们是由铝合金做成的,并且表面经过了阳极氧化发黑处理。将固定座和三角块分别放置在成像物面,通过调节精密转台测量样本在不同入射角度下功率计和探测器示数,角度间隔分别为  $0.5^\circ$  和  $1^\circ$ , 每个入射角下分别测量了 10 组数据。计算可得样本在接收方向固定时不同入射角下的反射率如图 4 所示。由图中可以看到,在入射角为  $45^\circ$  时固定座表面反射率约为  $0.9\%$ ,三角块表面反射率约为  $2\%$ ,表明三角块的表面均匀性比固定座更好。从

图 4 还可以看出不同入射角对应的反射率的计算结果不是完全对称的,并且固定座和三角块的反射率极大值位置相差  $1^\circ$ 。两个测量样本反射率极大值位置出现偏差,主要是由于从参考位置开始向一个方向转动物体然后再向相反方向转动角度时,会出现一定的角度偏差,并且将不同样本放置在精密转台上时,难以将样本准确放置在相同位置。另外,由于不同样本的形状和厚度不同,THz 光照射位置会有差异,也会对测量结果产生一定的误差影响。

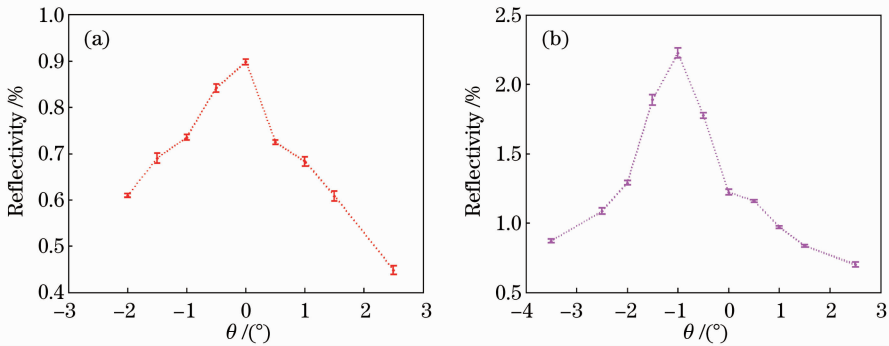


图 4 不同入射角下的样本反射率。(a)固定座;(b)三角块

Fig. 4 Reflectivity of samples at different incidence angles. (a) Fixed bracket; (b) triangle block

然后分别对直径为 25 mm 的升降杆座的光滑部分以及直径为 28 mm 带菱形条纹和竖条纹的部分,直径为 25 mm 表面喷漆的杆座以及直径为 25 mm 和 12 mm 的光滑接杆进行了实验测量。其中升降杆座是由铝合金制成的,并且表面经过了阳极氧化发黑处理,接杆材料是不锈钢。首先调整样

本位置直到探测器示数最大,然后分别记录探测器和功率计示数,每个样本测量 10 组数据,再将样本旋转一定角度进行重复测量,然后将实验数据代入(3)式,将计算结果取平均值后再计算标准差,可以得到不同圆柱表面在  $45^\circ$  入射角时的反射率,如表 1 所示。

表 1 不同圆柱形样本反射率测量结果

Table 1 Reflectivity measurement results of different column samples

| Samples          | Smooth rod base  | Diamond stripes rod base | Vertical stripes | 25 mm connected rod | 12 mm connected rod | Painting connected rod |
|------------------|------------------|--------------------------|------------------|---------------------|---------------------|------------------------|
| Reflectivity / % | $24.61 \pm 0.48$ | $0.3475 \pm 0.0069$      | $11.65 \pm 0.06$ | $43.25 \pm 0.72$    | $22.17 \pm 0.08$    | $0.62 \pm 0.24$        |

由表 1 所示结果可知,表面光滑的直径 25 mm 不锈钢接杆的反射率最大,可以达到  $43.25\%$ ,对于同样表面光滑的 12 mm 接杆,反射率仅为  $22.17\%$ 。反射率明显降低,原因在于随着样本直径减小,入射光斑在样本表面不同位置处入射角差异变大,相应的反射光偏离角度也变大,且实验中用于接收反射光的离轴抛物镜有效孔径尺寸有限,所以能接收到的 THz 光功率减少。对于 25 mm 直径升降杆座的光滑部分,测得的反射率约为  $24.61\%$ ,比 25 mm 不锈钢接杆反射率小。这是由于升降杆座的光滑性比接杆低,而且表面的黑色氧化层对 THz 光也有一定的吸收作用。升降杆座竖条纹位置的反射率为

$11.65\%$ ,菱形条纹部分反射率仅为  $0.3475\%$ ,这是由于随着样本表面粗糙度的增大,散射作用越发明显,使得沿着接收方向能够被接收到的 THz 光功率越少,反射率越低。实验测得表面喷漆的杆座的反射率为  $0.62\%$ ,反射率也相对较小,可能是因为样本表面不是很光滑,散射作用明显。从图 4 也可以看到表面的不平整和喷漆部位对 THz 光有一定的吸收作用。

综上所述可知,不同光学支架对 THz 光的反射作用差异较大。由不锈钢接杆的实验结果可知,圆柱直径的改变与反射率近似成比例;另外,样本表面的氧化层和喷漆对 THz 光的吸收作用比较明显,样

本表面越粗糙引起的散射作用越大。

## 4 结 论

利用聚焦光束初步对实验室中一些常用的光学支架,如方形滤波片固定座、三角块、不锈钢接杆和杆座等,进行了反射率测量实验,采用对比测量法,通过计算获得了不同调整架在  $45^\circ$  入射角时对 2.52 THz 光的近似反射率。实验结果表明,不锈钢接杆由于表面光滑且对 THz 光的吸收作用较弱,反射率较大,实验测得直径 25 mm 的不锈钢接杆的反射率可以达到 43.25%;表面较为粗糙直径 25 mm 表面喷漆杆座的反射率降低为 0.62%;而表面有菱形条纹直径 28 mm 的升降杆座的反射率仅为 0.35%。因此,通过增加样本表面粗糙度、覆盖氧化层或者喷涂油漆等,可以减小样本反射率。由于在太赫兹实验中,光学支架表面反射将会引起实验系统误差,所以应该尽量选择表面粗糙、直径较小或者有吸收层的支架。

本实验只是针对聚焦光束在  $45^\circ$  入射角时的样本反射特性的初步研究,对于更一般情况,例如近似平行光入射时,后向散射特性有待进一步研究。

## 参 考 文 献

- Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(2): 023001  
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(2): 023001
- Zhao Shusen, Chen Sijia, Shen Jingling. Identification of terahertz absorption spectra of illicit drugs using support vector machines[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(3): 752~757  
赵树森, 陈思嘉, 沈京玲. 用支持向量机识别毒品的太赫兹吸收光谱[J]. 中国激光, 2009, **36**(3): 752~757
- Ding Shenghui, Li Qi, Yao Rui *et al.*. Preliminary study on THz confocal imaging[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(s1): 100402

- 丁胜晖, 李琦, 姚睿等. 太赫兹共焦成像的初步研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(s1): 100402
- Yang Kun, Zhao Guozhong, Liang Chengsen *et al.*. Comparison between pulse terahertz imaging and continuous-wave terahertz imaging[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(11): 2853~2858  
杨昆, 赵国忠, 梁乘森等. 脉冲太赫兹波成像与连续波太赫兹成像特性的比较[J]. 中国激光, 2009, **36**(11): 2853~2858
- Zhang Liangliang, Zhang Yan, Zhong Hua *et al.*. Terahertz focal-plane multiwavelength phase imaging [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(s): 276~279  
张亮亮, 张岩, 钟华等. 太赫兹焦平面多波长相位成像[J]. 中国激光, 2009, **36**(s): 276~279
- S. C. Howells, L. A. Schlie. Transient terahertz reflection spectroscopy of undoped InSb from 0.1 to 1.1 THz[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1996, **69**(4): 550~552
- L. Fekete, J. Y. Hlinka, F. Kadlec *et al.*. Active optical control of the terahertz reflectivity of high-resistivity semiconductors[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(15): 1992~1994
- Y. Dikmelik, J. B. Spicer. Effects of surface roughness on reflection spectra obtained by terahertz time-domain spectroscopy [J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(24): 3653~3655
- L. M. Zurk, G. Sundberg, S. Schecklman *et al.*. Scattering effects in terahertz reflection spectroscopy [C]. *SPIE*, 2008, **6949**: 689305
- M. R. Leahy-Hoppa, M. J. Fitch, R. Osiander. Terahertz reflection spectroscopy for the detection of explosives[C]. *SPIE*, 2008, **6893**: 689305
- Li Qi, Yao Rui, Yin Qiguo *et al.*. Recent advance of CO<sub>2</sub>-pumped THz imaging [J]. *Laser Technology*, 2009, **33**(2): 151~155  
李琦, 姚睿, 尹奇国等. CO<sub>2</sub> 激光泵浦 THz 成像研究新进展[J]. 激光技术, 2009, **33**(2): 151~155
- S. H. Ding, Q. Li, Y. D. Li *et al.*. Continuous-wave terahertz digital holography by use of a pyroelectric array camera[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(11): 1993~1995
- Yi Hengyu, Lü Baida. The advance of techniques of reflectivity measurement[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(5): 459~462  
易亨瑜, 吕百达. 反射率测量技术研究的进展[J]. 激光技术, 2004, **28**(5): 459~462
- Gong Yuan, Li Bincheng. Continuous-wave cavity ring-down technique for accurate measurement of high reflectivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(9): 1247~1250  
龚元, 李斌成. 连续激光光腔衰荡法精确测量高反射率[J]. 中国激光, 2006, **33**(9): 1247~1250