

三种背景材料的连续太赫兹后向散射特性测量研究

李琦 杨永发 赵永蓬 陈德应

哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150081

摘要 准平面波辐射下的背景材料太赫兹后向散射特性的测量方法对测量结果影响很大。为减小连续激光器输出功率波动对测量结果的影响,在每次测量泡沫塑料板时,均先测量墙的后向散射。同时,为了消除墙对测量结果的影响,以最大后向散射为基准,给出不同泡沫塑料板及同种背景材料转动不同方位角的相对后向散射强度。实验结果显示,三种泡沫塑料板相对墙的散射测量误差明显降低,从而提高了后续的后向散射强度测量的准确性。

关键词 材料; 太赫兹; 散射; 背景材料

中图分类号 TN29 **文献标志码** A

doi: 10.3788/LOP52.011201

Measurement Investigation of Continuous Wave Terahertz Back Scattering Characteristics in Three Kinds of Background Materials

Li Qi Yang Yongfa Zhao Yongpeng Chen Deying

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

Abstract The methods of measuring the terahertz backward scattering characteristics of the background materials which are irradiated by quasi-plane wave have a great influence on the measuring results. To reduce the influence of the fluctuation of continuous wave laser output on measuring results, the backward scattering of the wall is measured before the foam plastic boards. Meanwhile, to eliminate the impact of wall on measuring result, the relative backward scattering intensity of different foam plastic boards and different azimuth angles of the same material are given, which is based on the biggest backward scattering intensity. The experimental results show that the scattering measurement errors of the three kinds of foam plastic boards which are relative to the wall have a significant decrease and thus the measurement accuracy of the relative backward scattering intensity in the follow-up parts is increased.

Key words materials; terahertz; scattering; background materials

OCIS codes 110.6795; 120.5700; 140.4130

1 引言

在太赫兹探测^[1-4]技术的实际应用中,经常遇到目标的散射回波测量或背景的散射回波的消除等问题。对准平面波照射下的背景材料后向散射特性的测量具有重要的实用价值。迄今,已有较多基于飞秒激光器产生脉冲太赫兹辐射获取样本材料的反射光谱以及测量粗糙平面反射特性的实验报道^[5-9]。

2.52 THz 辐射是较常用的连续激光源,但对这一波段的背景材料散射特性的研究还不多。本课题组于 2014 年搭建了基于准平面波的 2.52 THz 背景材料后向散射特性测量实验装置,准平面波束宽约 13 mm,作用距离约 2.5 m,并初步实验测量了基于墙的三种背景材料后向散射特性^[10]。但由于每种材料测量时墙的后向散射测量只一次,与不同角度测量时间间隔较大,导致因激光器输出不稳定造成的相对墙的测量误差较大。另外,由于墙质不均匀且受环境湿度的影响较大,因此相对墙的测量结果不太具有普遍意义。而脱离任何参照物的背景材料本身的相对散射特性更具有普适性。为此,本文以背景材料最大后向散射为基准,给出三种不同材料及同种材料不同角度的相对后向散射。为减小激光器输出功率波动对测量结果的影响,

收稿日期: 2014-06-15; 收到修改稿日期: 2014-07-15; 网络出版日期: 2014-11-12

作者简介: 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: liqi2013@hit.edu.cn

在每次背景材料测量中,均先测量墙的后向散射。同时,计算了测量误差。

2 测量原理

背景材料的后向散射特性测量装置如图 1 所示^[10]。太赫兹光源为 Coherent 公司 SIFIR-50 激光器,工作频率 2.52 THz,输出功率约 50 mW。离轴抛物面镜 PM1 和 PM2 组成共焦准直镜组。BS1 为高阻单晶硅片,厚度约为 0.5 mm,对 2.52 THz 光的透射率(T)约为 99%。He-Ne 激光用作指示光,用于系统光路的调节。准直后的束宽约为 13 mm 的平面波经全反镜 M1 照射待测物体, M1 中心至靠于墙的物体的距离即作用距离约 2.5 m。由焦距约 10 mm 的离轴抛物面镜 PM3 将散射角约 3° 的散射回波,聚焦到单元高莱探测器上,由示波器读取峰-峰值。斩波器频率 10 Hz。

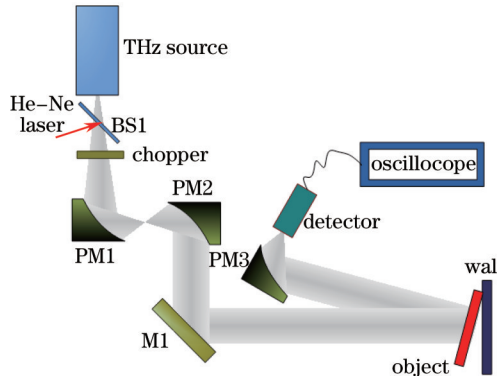


图 1 后向散射特性测量示意图

Fig.1 Measurement sketch of back scattering

为减少激光器输出功率波动对测量结果的影响,以墙为参照物获得每种材料的相对墙散射特性结果。设测得墙的散射回波平均值为 S_w 、标准差为 V_w ,其他待测物体的散射回波平均值 S_m 、标准差为 V_m 。则待测物体相对墙的平均散射回波强度 R_w 可表示为^[10]

$$R_w = \frac{S_m}{S_w}, \quad (1)$$

其标准差 V_{rw} 可表示为

$$V_{rw} = \sqrt{\frac{1}{S_w^2} V_m^2 + \frac{S_m^2}{S_w^4} V_w^2}. \quad (2)$$

然后,以相对墙的最大散射 R_{wmax} 为基准,获得每种材料的相对散射特性。其计算公式为

$$R = 10 \lg \left(\frac{R_w}{R_{wmax}} \right) (\text{dB}), \quad (3)$$

其标准差 V_r 为

$$V_r = \frac{10}{\ln 10} \sqrt{\frac{1}{R_w^2} V_{rw}^2 + \frac{1}{R_{wmax}^2} V_{rwmax}^2} (\text{dB}), \quad (4)$$

式中 V_{rwmax} 为 R_{wmax} 的标准差。

3 测量结果及分析

研究的背景分别选择涂料覆盖的墙壁、三种包装用的泡沫塑料板,泡沫塑料板均放置在墙前。三种泡沫塑料板对 2.52 THz 的透射率分别约为 50%、40%和 1%^[10]。为了便于阐述三种泡沫塑料板的测量结果,仅以材料的太赫兹透射率加以区分。实验中,按照第 2 节介绍的测量方法,测量了三种材料转动不同方位角及所对应的不同时刻墙的散射幅值。图中所给数值均为以标准差为误差棒的多次测量的均值。

图 2 和图 3 分别给出不同方位角的三种泡沫塑料板和所对应时刻的墙的幅值。由图 2 可以看出,泡沫塑料板的散射幅值较文献[10]增大约 1 倍。由图 3 可以看出,在测量三种泡沫塑料板不同角度时,所对应的墙的散射均值在 94~123 mV 范围变化,说明在测量材料不同角度时也测量此时的墙的散射是非常必要的。另

外,对比文献[10]中墙的均值31.6 mV,可以看出,不同环境及可能存在的测量点偏差导致其墙的测量结果相差较大。因此,不能完全以墙这种非标准体作为相对测量参照物评价其他材料的散射特性。

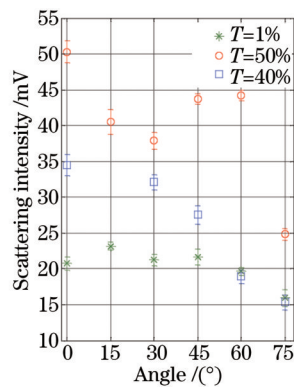


图2 不同方位角的三种泡沫塑料板的散射幅值

Fig.2 Scattering intensity of three kinds of the foam plastic boards at different azimuth angles

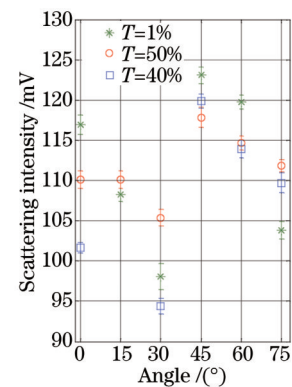


图3 不同方位角不同时刻墙的散射幅值

Fig.3 Wall scattering intensity at different times and azimuth angles

图4给出在图2和图3基础上利用(1)式和(2)式计算得出的不同方位角时三种泡沫塑料板相对墙的散射强度。由图4和图2对比可以看出,由于增加了不同方位角的墙的测量,三种材料的散射特性相对关系有所不同;如,透射率 $T=50\%$ 的泡沫塑料板不同方位角时的相对墙的散射强度差距相对缩小。由图4可以看出,透射率 $T=50\%$ 的泡沫塑料板散射最强,透射率 $T=1\%$ 的泡沫塑料板绝大多数角度时散射最弱。透射率 $T=40\%$ 的泡沫塑料板散射除方位角 15° 外基本随着方位角的增加而降低。透射率 $T=1\%$ 的泡沫塑料板在 45° 方位角之前,没有呈现随方位角增大散射下降的趋势,透射率 $T=50\%$ 的泡沫塑料板在 45° 和 60° 散射反而升高,可能是由于目标本身材质不够均匀,导致不同部位回波不尽相同所致。因此在测量不均匀材质时保证准确测量同一面积至关重要。另外,直接用示波器测量,信号源的涨落和噪声被全部采集到测量信号中;此现象尤其在信号 20 mV 以下明显影响测量结果;导致 60° 时 T 等于 1% 和 40% 的两种泡沫塑料板的测量结果非常接近,甚至出现 75° 时 $T=1\%$ 泡沫塑料板的结果高于 $T=40\%$ 的现象。图4和文献[10]中所得结果(图4)相比,相对值均有较大降低,这主要是因为本次实验中墙的测量值增大大约2倍。另外,值得注意的是,图4中标准偏差一般均明显小于文献[10]中所得结果,这说明此方法测量准确性有所提高。

图5给出在图4的基础上利用(3)式和(4)式计算得出的待测物体相对散射强度。此结果给出三种泡沫塑料板散射强度随材料所置的方位角的变化关系。以透射率 $T=50\%$ 的材料 0° 时的相对散射强度为基准,即 0 dB 。到 75° 时 $T=50\%$ 的材料衰减大于 3 dB ; $T=40\%$ 的材料在 75° 时相对其 0° 时衰减近 4 dB ,相对 $T=50\%$ 的材料 75° 时衰减约 2 dB 。

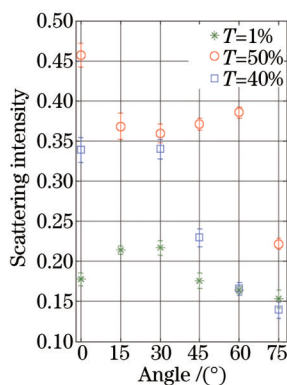


图4 不同方位角的相对墙的散射强度

Fig.4 Relative-to-wall scattering intensity at different azimuth angle

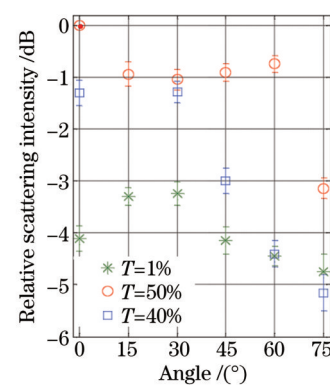


图5 不同方位角的相对散射强度

Fig.5 Relative scattering intensity at different azimuth angle

4 结 论

背景材料的太赫兹散射特性测量具有重要的应用价值,而准确测量非常困难。这与测量方法、辐射源稳定性、所测材料均匀性、参照物、背景抑制等有关。为了克服连续太赫兹激光波动对测量的影响,采用了在每次测量背景材料测量中均先测量墙的后向散射方法。同时,由于墙质不均匀且受环境湿度的影响较大,因此计算了无任何参照物时的背景材料的相对散射特性。实验结果表明,墙和背景材料随着环境不同,散射测量结果不同;材料相对墙的散射测量误差明显降低,从而提高了后续相对后向散射强度测量准确性;在测量不均匀材质时保证准确测量同一面积至关重要。为了提高弱后向散射信号测量精度,今后还拟通过锁向放大器将信号从噪声中分离出来。

参 考 文 献

- 1 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on the passive terahertz image target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0211002.
张 馨, 赵源萌, 邓 朝, 等. 被动式太赫兹图像目标检测研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0211002.
- 2 Li Qi, Xue Kai, Li Huiyu, *et al.*. Advances in research of terahertz radar cross section measurements[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(6): 060001.
李 琦, 薛 凯, 李慧宇, 等. 太赫兹雷达散射截面测量研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(6): 060001.
- 3 Li Xinlei, Li Biao. Review on progress of real-time THz sensing and imaging technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(9): 090008.
李昕磊, 李 彪. 实时太赫兹探测与成像技术新进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(9): 090008.
- 4 Zhao Yaqin, Zhang Liangliang, Zhu Dechong, *et al.*. Single-pixel terahertz imaging based on compressed sensing [J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s111003.
赵亚芹, 张亮亮, 祝德充, 等. 基于压缩传感的单点太赫兹成像[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s111003.
- 5 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.
- 6 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.
- 7 Yamac Dikmelik, James B Spicer. Effects of surface roughness on reflection spectra obtained by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Opt Lett*, 2006, 31(24): 3653-3655.
- 8 L M Zurk, G Sundberg, S Schecklman, *et al.*. Scattering effects in terahertz reflection spectroscopy[C]. SPIE, 2008, 6949: 694907.
- 9 Megan R Leahy-Hoppa, Michael J Fitch, Robert Osiander. Terahertz reflection spectroscopy for the detection of explosives[C]. SPIE, 2008, 6893: 689305.
- 10 Li Qi, Yang Yongfa, She Jianyu, *et al.*. Measurement of 2.52 THz relative back scattering characteristics in several kind of background materials [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s1): s112002.
李 琦, 杨永发, 余剑雨, 等. 几种背景材料的2.52太赫兹相对后向散射特性测量[J]. *光学学报*, 2014, 34(s1): s112002.