

文章编号: 2095-4980(2022)12-1245-05

太赫兹探测器相对光谱响应校准技术

刘红元, 吴斌, 王洪超, 李京松, 杨延召, 蔡高航

(中国电子科技集团公司 第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

摘要: 随着太赫兹探测技术的发展, 精确测量太赫兹探测器的光谱响应变得越来越重要。分析了太赫兹探测器相对光谱响应的测量原理, 搭建了一套太赫兹探测器相对光谱响应测量系统, 对系统测量不确定度来源进行分析, 选用太赫兹探测器对测量系统不确定度进行验证。通过分析实验数据可知, 在 1~10 THz 范围内, 系统的扩展不确定度为 9.2%, 可以满足目前太赫兹探测器相对光谱响应测量的需求。

关键词: 太赫兹探测器; 光谱响应度; 交替法; 测量不确定度

中图分类号: TN215; O433.1

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021401

Relative spectral response calibration technology of terahertz detector

LIU Hongyuan, WU Bin, WANG Hongchao, LI Jingsong, YANG Yanzhao, CAI Gaohang

(The 41st Research Institute of CETC, Qingdao Shandong 266555, China)

Abstract: With the development of terahertz detection technology, it becomes more and more important to accurately measure the relative spectral response of terahertz detector. The measuring principle of the relative spectral response of terahertz detector is analyzed, and a relative spectral response measurement system of terahertz detector is set up, the uncertainty of the measurement system is verified by using terahertz detector. According to the analysis of experimental data, the uncertainty of measurement is 9.2% in the range of 1 THz~10 THz, which can meet the requirements of relative spectral response measurement of terahertz detectors.

Keywords: terahertz detector; relative spectral response; alternate method; uncertainty of measurement

太赫兹(Terahertz, THz)波是指频率在 0.1~10 THz(或 0.3~10 THz)范围的电磁波, 波长为 3 mm~30 μm , 处于微波与红外光波之间, 属于远红外波, 是电子学和光子学的交叉区域。太赫兹波的高透射性和非电离性使太赫兹成像技术在无损检测、航天飞机缺陷检查、武器装备缺陷检测、军事侦察和危险物品检测等方面具有广泛应用前景, 因此急需大力发展太赫兹探测技术, 提升太赫兹无损探伤与缺陷检测仪器的自主创新能力^[1-3]。

太赫兹探测器的参数很多, 相对光谱响应为最主要的参数之一, 表征了太赫兹探测器响应波段内光电转换效率, 影响和制约太赫兹探测器的探测灵敏度, 是太赫兹武器装备进行系统设计时必不可少的指标。传统的光电探测器的相对光谱响应校准方法为: 采用宽光谱光源和单色仪产生单色光, 利用替代法测量得到光电探测器的相对光谱响应^[4-9]。目前, 红外探测器的相对光谱响应测量技术比较成熟, 但对于太赫兹波段, 相对响应率测量还没有好的方法。由于在太赫兹波段缺乏连续可调谐的太赫兹光源以及单色仪, 因此无法采用传统校准探测器相对光谱响应的方法来实现对太赫兹探测器相对光谱响应的校准^[10]。

针对太赫兹探测器相对光谱响应测试存在的问题, 本文搭建了一套太赫兹探测器相对光谱响应测量系统, 以满足太赫兹探测器相对光谱响应的测量需求。从实验结果分析可知, 系统可满足目前太赫兹探测器的研制、生产、检测和应用, 可以为材料选取、工艺改进、数据补偿、光学系统设计、图像处理提供指导, 同时也是推断太赫兹武器装备效能的重要依据。因此, 太赫兹探测器相对光谱响应的测量对于器件设计、成像装备系统设计以及器件使用者, 都具有非常重要的指导意义。

收稿日期: 2021-11-26; 修回日期: 2022-01-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(62127804)

1 测量原理

该系统采用交替法测量太赫兹探测器的相对光谱响应, 测量原理框图如图 1 所示。黑体辐射源发出的辐射光经过光阑孔对光斑进行限制, 去除额外的杂散光, 通过太赫兹窄带滤波片轮后将产生单色的太赫兹光; 再次经过光阑孔后, 单色太赫兹光照射到太赫兹探测器或太赫兹功率计上, 太赫兹探测器(或太赫兹功率计)被固定在位移台上; 太赫兹探测器输出信号经过数据采集系统, 控制器控制滤波片轮转动。测量时通过控制器旋转滤波片轮, 产生某一单色太赫兹光, 照射到太赫兹探测器上, 通过数据采集系统采集信号, 再经过位移台将太赫兹功率计移动到相同位置处测量该波长的辐射功率, 通过相对响应率计算式(1), 得到某一波长的相对响应率。通过控制器旋转滤波片轮, 将得到整个光谱范围内的相对光谱响应, 其中窄带滤光片轮上安装有 1 THz, 2 THz, ..., 10 THz 窄带滤光片。

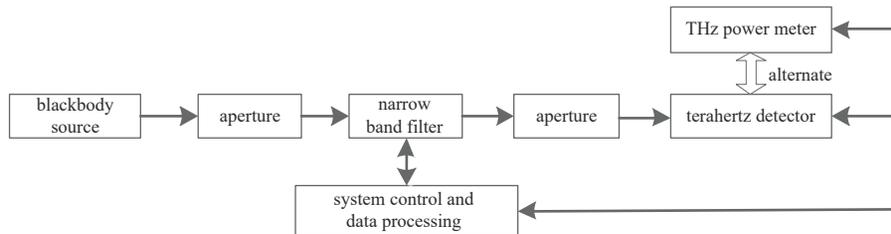


Fig.1 Block diagram of measuring relative spectral responsivity of terahertz detector

图1 太赫兹探测器相对光谱响应测量原理框图

太赫兹探测器相对光谱响应定义为: 在特定波长 f_i 的照射下, 太赫兹探测器输出的电信号与对应光功率之比。采用交替法, 太赫兹探测器的相对光谱响应计算公式为:

$$R(f) = K \frac{U_{x1}(f) - U_{x0}}{P_{s1}(f) - P_{s0}} \quad (1)$$

式中: K 为转换因子; $U_{x1}(f)$ 为扣除暗信号前, 频率 f 所对应的被测太赫兹探测器测量值; U_{x0} 为被测太赫兹探测器测量的暗信号; $P_{s1}(f)$ 为扣除暗信号前, 频率 f 所对应的辐射功率; P_{s0} 为太赫兹功率计的暗信号; f 为带通滤光片输出中心频率。

2 测量不确定度分析与评定

根据太赫兹探测器相对光谱响应计算公式, 考虑系统各个组成部分, 以及测量过程中人员、环境等各个因素对测试结果的影响, 太赫兹探测器相对光谱响应测量不确定度来源主要有: 太赫兹功率计、黑体辐射源稳定性、窄带滤光片中心波长带宽、窄带滤光片均匀性、测试方法、测试环境等方面。

2.1 太赫兹功率计

本系统中, 太赫兹辐射功率采用太赫兹功率计直接测量得到。该太赫兹功率计直接溯源到中国计量院, 扩展不确定度为 5.0%, 按均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 则在本系统中太赫兹功率计测试引入的不确定度为: $5.0\%/(2 \times \sqrt{3})=1.5\%$ 。

2.2 黑体辐射源稳定性

太赫兹辐射源采用腔式黑体辐射源, 通过参阅腔式黑体辐射源相关资料, 黑体辐射源在 200 °C 时, 10 min 内的稳定性为 0.1%, 按均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 则黑体辐射源稳定性测试最大引入不确定度为: $0.1\%/\sqrt{3}=0.06\%$ 。

2.3 窄带滤光片中心波长

本系统中单色光由窄带滤光片产生, 窄带滤光片输出中心波长是影响结果的因素之一。通过参阅窄带滤光片相关资料, 窄带滤光片输出中心波以及带宽的误差最大为 2%, 按均匀分布, $k=\sqrt{3}$, 则窄带滤光片透射非均匀性测试最大引入不确定度为: $2\%/\sqrt{3}=1.2\%$ 。

2.4 窄带滤光片带宽

本系统中单色光由窄带滤光片产生, 窄带滤光片输出带宽也是影响结果的因素之一。采用型号为 S150 的美

国赛默飞生产的傅里叶红外变换光谱仪对窄带滤光片的透过率进行测量，最大的峰值 3 dB 带宽，窄带滤光片输出带宽的误差估计为 6%，按均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则窄带滤光片带宽测试最大引入不确定度为： $6\%/\sqrt{3}=3.5\%$ 。

2.5 窄带滤光片透射非均匀性

本系统中单色光采用黑体辐射源和窄带滤光片产生，窄带滤光片孔径为 47 mm，通过参阅窄带滤光片资料，透射非均匀性为 2%，按均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则窄带滤光片透射非均匀性测试最大引入不确定度为： $2\%/\sqrt{3}=1.2\%$ 。

2.6 测试方法及测试环境

本系统采用黑体辐射源和窄带滤光片产生单色光，采用该方法，产生的红外辐射较多。由于目前大多太赫兹探测器对红外辐射也有响应，因此环境对测试影响较大，估计为 4%，按均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，则测试环境引入的不确定度为： $4\%/\sqrt{3}=2.3\%$ 。

根据上面的分析和评定结果，太赫兹探测器相对光谱响应的合成不确定度为：

$$u_c = \sqrt{(1.5\%)^2 + \dots + (2.3\%)^2} = 4.8\% \tag{2}$$

当置信概率为 95%，包含因子 k 值为 2，扩展不确定度为： $U=2 \times u_c=9.6\%$

3 实验

3.1 窄带滤光片透过率测量

在太赫兹探测器相对光谱响应测量过程中，共选用了 10 个窄带滤光片对辐射的复色光进行滤波，窄带滤光片如图 2 所示。课题组采用型号为 SI50 美国赛默飞生产的红外傅里叶变换光谱仪对窄带滤光片进行测量，选取了 2 THz, 5 THz 和 10 THz 透过率测量曲线，如图 3(a)~(c) 所示。由透过率测量曲线可知，窄带滤光片在中心频率位置处透过率基本上都大于 80%。



Fig.2 Terahertz narrow band filter
图2 窄带滤光片

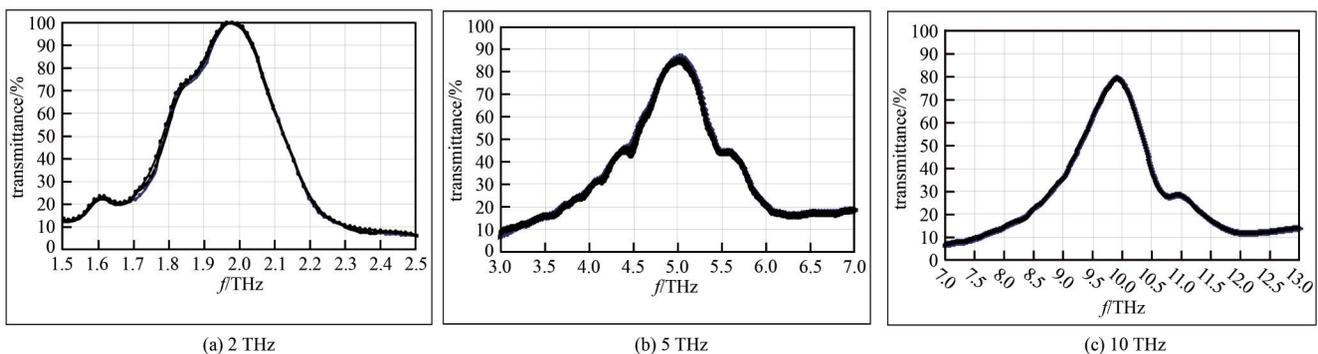


Fig.3 Narrow band filter transmittance
图3 窄带滤光片透过率测量

3.2 太赫兹探测器相对光谱响应测量

为试验验证，选用近年来国际研究发展较快的基于氧化钒微测辐射热计太赫兹探测器。该类探测器由红外探测器演变而来，是在传感器的微桥结构上耦合金属涂层或超材料吸收天线，提升传感器在太赫兹波段的光学吸收效率，实现高灵敏度太赫兹探测。选用的太赫兹探测器阵列规模为 640×512 ，中心距为 $20 \mu\text{m}$ 。根据太赫兹

探测器的频率范围 1~10 THz, 选用 1 THz, 2 THz, ..., 9 THz, 10 THz 窄带滤光片, 该窄带滤光片由俄罗斯 Tydex 公司生产, 测量时选用的黑体辐射温度为 400 °C, 太赫兹探测器相对光谱响应测量实物如图 4 所示, 相对光谱响应测量曲线如图 5 所示, 连续测量 6 次, 测量的 10 个频率点中最大的重复性为 1.74%, 小于 $(2/3)u_c$ 合成不确定度, 说明本系统的测量不确定度评定是合理的, 可以满足太赫兹探测器相对光谱响应校准的需求。

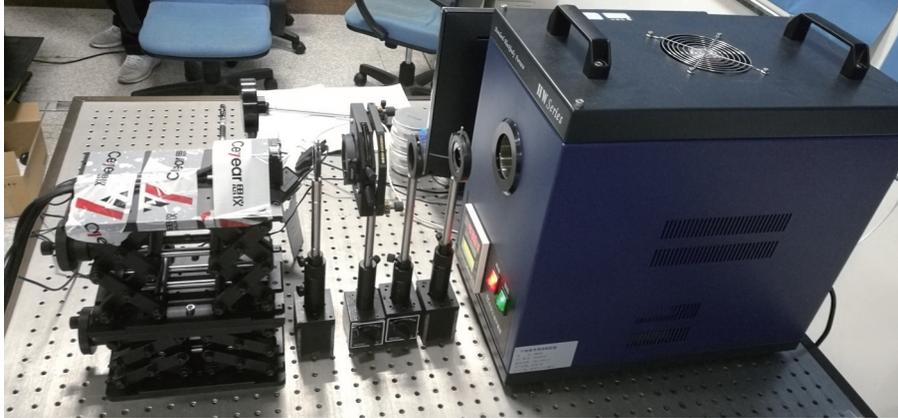


Fig.4 Terahertz detector relative spectral response measurement setup

图4 太赫兹探测器相对光谱响应测量实物图

4 结论

本文分析了太赫兹探测器相对光谱响应的测量原理, 搭建了一套太赫兹探测器相对光谱响应测量系统, 并对系统测量不确定度来源进行了分析。选用太赫兹探测器对测量系统不确定度进行了验证, 通过实验数据可知, 在 1~10 THz 范围内, 系统的扩展不确定度为 9.6%。该系统可为生产和使用太赫兹探测器的厂家和用户提供更准确的数据, 可以满足太赫兹探测器相对光谱响应测量的要求。目前对于太赫兹探测器的光谱响应测试还没有好的方法, 本文采用的方法还有一定的局限性, 特别是环境温度辐射对于测试的影响, 今后课题组还会探索新的测试方法, 以满足更高要求的太赫兹探测器相对光谱响应测试需求。

参考文献:

- [1] 王瑞君, 王宏强, 庄钊文, 等. 太赫兹雷达技术研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2013, 50(4):4-20. (WANG Ruijun, WANG Hongqiang, ZHUANG Zhaowen, et al. Research progress of terahertz radar technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50(4):4-20.)
- [2] 赵明明, 余建军. 太赫兹通信系统的研究现状与应用展望[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(6):931-937. (ZHAO Mingming, YU Jianjun. Terahertz communication system: present and outlook[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018, 16(6):931-937.)
- [3] 杨光鲲, 袁斌, 谢东彦, 等. 太赫兹技术在军事领域的应用[J]. 激光与红外, 2011, 41(4):376-380. (YANG Guangkun, YUAN Bin, XIE Dongyan, et al. Analysis on the use of THz technology in the military application[J]. Laser & Infrared, 2011, 41(4):376-380.)
- [4] 闫丰, 周跃, 章明朝, 等. CCD 器件相对光谱响应测试仪[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(10):2865-2868. (YAN Feng, ZHOU Yue, ZHANG Mingchao, et al. Test equipment for relative spectral response of CCD[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(10):2865-2868.)
- [5] 陈郁, 贺香荣, 邵秀梅, 等. 基于 LabVIEW 的短波红外焦平面相对光谱响应光谱测试系统[J]. 光学与光电技术, 2013, 11(6):25-28. (CHEN Yu, HE Xiangrong, SHAO Xiumei, et al. Measurement system of relative spectral response for SWIR FPA based on LabVIEW[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2013, 11(6):25-28.)

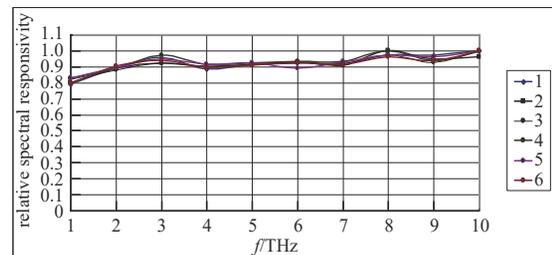


Fig.5 Measurement curves of terahertz detector relative spectral response

图5 太赫兹探测器相对光谱响应测量曲线