

# 太赫兹辐射功率计量研究进展与国际比对

邓玉强, 孙青, 于靖, 徐楠, 林延东

中国计量科学研究院光学与激光计量科学研究所, 北京 100029

**摘要** 太赫兹技术的重要应用急需准确的太赫兹辐射功率计量作为支撑和保障, 国际计量局组织开展了国际首次太赫兹辐射功率测量比对。为实现太赫兹辐射功率准确测量, 保障我国太赫兹功率计量取得国际等效互认, 报导了全吸收型太赫兹辐射功率计, 对太赫兹辐射功率计的计量性能和测量不确定度进行详细分析和实验测试。利用一种具有镜反射的太赫兹辐射计, 对全吸收型太赫兹辐射计的计量性能进行实验验证, 保障了太赫兹辐射功率计响应度量值的准确性和不确定度分析的合理性。利用自主研发的太赫兹辐射计参加国际首次太赫兹功率比对, 取得了国际等效一致。

**关键词** 测量; 辐射计量; 远红外和太赫兹; 光学标准与测试; 太赫兹光谱学

**中图分类号** O436

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201744.0314001

## Progress of Terahertz Radiometry and International Comparison

Deng Yuqiang, Sun Qing, Yu Jing, Xu Nan, Lin Yandong

*Division of Optics, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*

**Abstract** The wide application of terahertz technology demands accurate and traceable measurement of terahertz radiometry. The first international terahertz power comparison took place under the guideline of the consultative committee for photometry and radiometry of the international committee for weights and measures. A highly absorptive terahertz radiometer is fabricated for the comparison and the uncertainty of terahertz measurement is analyzed and experimentally investigated, for realizing the terahertz measurement accurately and guaranteeing the internationally equivalence and mutual recognition of Chinese terahertz measurements. Also, for confirming the measurement accuracy and uncertainty analysis of the terahertz radiometer, a terahertz radiometers with specular reflection is constructed, and the comparison measurements with the highly absorptive terahertz radiometer is performed. The self-made terahertz radiometer is used in the first international terahertz comparison, and excellent agreement is obtained.

**Key words** measurement; radiometry; far infrared or terahertz; optical standards and testing; terahertz spectroscopy

**OCIS codes** 120.5630; 040.2235; 120.4800; 300.6495

## 1 引言

太赫兹是指频率在 0.1~10 THz 的电磁辐射, 在电磁波谱上位于光学的红外和电磁学的毫米波之间的频段<sup>[1-2]</sup>。长期以来, 由于缺乏有效的产生和探测技术, 太赫兹成为电磁波谱中有待全面认识的最后一个频率窗口<sup>[3-4]</sup>。20 世纪 80 年代以来, 随着飞秒脉冲激光技术的发展, 在室温下产生了宽带宽、高强度、高信噪比的太赫兹电磁辐射, 促进了太赫兹技术研究和应用的发展。目前太赫兹技术已广泛应用于材料成分识别、

**收稿日期:** 2016-09-18; **收到修改稿日期:** 2016-11-01

**基金项目:** 国家自然科学基金(11274282, 61205099, 61371055)、国家质量监督检验检疫总局公益性行业专项(201410025)、国家质量基础专项(2016YFF0200306)、国家重大科学仪器开发专项(2016YFF0100505)、上海市科委项目(15DZ0500104)、中国计量科学研究院基本科研业务费(AKY1160, AKY0748)

**作者简介:** 邓玉强(1976—), 男, 博士, 研究员, 主要从事飞秒激光测量和太赫兹计量方面的研究。

E-mail: yqdeng@nim.ac.cn

生物样品测试、食品安全检查、药品成分分析、疾病预防筛查、天文观测和环境监测等领域<sup>[5]</sup>。

随着太赫兹技术研究和应用的日益深入和广泛,各类太赫兹产品,如太赫兹辐射源、太赫兹探测器、太赫兹光谱仪、太赫兹成像仪等不断出现并广泛应用到各个领域。同时,对仪器的测量准确性和量值溯源提出了迫切需求,以保障不同仪器之间测量量值的准确统一和实验测试结果的可靠有效。然而,历史上的太赫兹空隙导致了太赫兹计量空白,国际上缺乏太赫兹计量方法和计量标准装置,太赫兹测量量值难以溯源至国际单位制,测量不确定度无法评估<sup>[6]</sup>。为实现太赫兹量值溯源到国际单位制,保障太赫兹测量结果准确可靠,国际计量机构开始重视太赫兹计量研究。太赫兹辐射功率是太赫兹的基本参数之一,因此太赫兹功率计量备受关注和重视。

近年来国际计量界在太赫兹功率计量领域取得了显著性进展,国际计量局组织开展了国际首次太赫兹功率量值比对。我国作为仅有的三个参比国家之一,在首次国际比对中取得了优异的成绩。本文首先对太赫兹功率计量研究进展进行简单的介绍。然后使用研制的全吸收型太赫兹辐射功率计,对太赫兹辐射功率计的计量性能和测量不确定度进行分析和实验评估。利用镜反射型太赫兹功率计的实验比对,验证了太赫兹辐射功率溯源的准确性。参加了国际首次太赫兹功率比对,取得了国际等效一致。

## 2 太赫兹辐射功率计量研究进展

随着太赫兹技术的发展,国际计量领域对太赫兹功率计量溯源给予重视。2009年英国国家物理实验室(NPL)的 Naftaly 等<sup>[7]</sup>利用双面抛光的高阻硅片作为标准器,开展了太赫兹功率计线性度计量的研究。高阻硅片对太赫兹辐射没有吸收,仅存在透射和反射效应,因此,透射比可用菲涅耳反射定律计算,作为太赫兹功率计线性校准的参考值。但是该方法仅能校准太赫兹功率计的线性度,无法实现太赫兹功率计响应度的绝对测量和校准。

2009年德国物理技术研究院(PTB)的 Werner 等<sup>[8]</sup>将太赫兹辐射功率溯源至低温辐射计,在国际上首次实现了 2.52 THz 辐射的量值溯源。然而,低温辐射计腔体的吸收比在太赫兹波段无法准确测定,产生了 7%的测量不确定度。尽管低温辐射计窗口透过率、功率漂移、噪声、偏振、替代探测器等其他不确定度分量仅为千分之几,但是最终得出了 7.3%的合成不确定度(包含因子  $k=1$ ),其中低温辐射计腔体吸收比成为最大的不确定度分量<sup>[8]</sup>。

为了提高探测器在太赫兹波段的吸收比,2011年美国标准技术研究院(NIST)的 Lehman 等<sup>[9]</sup>报道了一种垂直生长的碳纳米管阵列材料,实验测量 1.5 mm 高的碳纳米管阵列在 0.76 THz 频率的吸收比达到 99%。然而,碳纳米管制备工艺复杂,需要对生长基底作催化预处理,并需要长时间精细控制生长过程的气流、温度、压力和时间等参数,而且碳纳米管生长到一定长度后容易碳化,导致生长失败,1.5 mm 高的碳纳米管很难成功制备。太赫兹具有较大的光束尺寸,也需要较大面积的碳纳米管阵列。大面积的碳纳米管阵列容易破碎,难以移植到太赫兹辐射计的吸收靶面,导致辐射计制作失败,限制了这种材料的应用。

为了探索新的吸收材料,实现太赫兹波段辐射功率的准确测量,2013年中国计量科学研究院(NIM)的 Deng 等<sup>[10]</sup>研制了一种在太赫兹波段吸收比高、吸收光谱宽的材料,在宽太赫兹波段实现了太赫兹辐射的高效吸收。利用该材料作为吸收体研制了太赫兹辐射计,将功率响应度溯源到国家激光功率基准,实现了太赫兹辐射功率的绝对测量,也使我国成为国际上第三个实现太赫兹辐射功率量值溯源和独立复现的国家。

与此同时,国外太赫兹功率计量技术也在不断发展。2013年 PTB 的 Steiger 等<sup>[11]</sup>采用抛光的 NG1 玻璃作为体吸收材料,研制了一种镜反射型太赫兹辐射计。在 NG1 体吸收玻璃后表面镀金反射膜,太赫兹仅在体吸收材料中存在表面镜反射和吸收,通过测量 NG1 玻璃在太赫兹波段的反射比和在 He-Ne 激光波长的反射比,将太赫兹辐射计功率响应度溯源到激光功率测量标准。2014年日本先进工业科研院(AIST)的 Iida 等<sup>[12]</sup>利用相似的技术,以 NG1 玻璃作为体吸收材料,利用电功率替代复现太赫兹功率响应度量值,对辐射计和测量系统进行多层隔热封装,实现了  $1 \mu\text{W}$  以下的 1 THz 辐射功率的测量。

NG1 玻璃对频率高于 0.7 THz 的辐射具有较高的吸收,当太赫兹辐射入射到玻璃前表面后,折射到 NG1 玻璃,再经后表面反射回前表面的剩余辐射很小,可以忽略。而对于频率低于 0.7 THz 的辐射吸收减弱,当频率小于 0.7 THz 的辐射入射到玻璃前表面,折射进入 NG1 玻璃,再经后表面反射回前表面仍有较大

的辐射残余,与第一次在前表面反射的太赫兹辐射发生干涉<sup>[11]</sup>。干涉效应使总反射比难以准确测定,限制了镜反射的体吸收材料在 0.7 THz 以下频段辐射测量的应用。因此具有镜反射的 NG1 玻璃仅适用于频率高于 0.7 THz 的辐射测量,对频率低于 0.7 THz 的辐射测量可能引起较大的误差。

为了实现宽光谱的太赫兹辐射测量,2015 年 PTB 的 Müller 等<sup>[13]</sup>研制了一种新的太赫兹探测器。在热释电聚偏氟乙烯薄膜的两个表面镀金属氧化膜,通过精确控制膜层厚度,调节薄膜电阻与真空阻抗的一半相匹配,根据麦克斯韦方程可获得 50% 的吸收,25% 的透射和 25% 的反射。这种热释电聚偏氟乙烯薄膜探测器在 0.3~30 THz 的宽光谱范围内具有平坦的响应特性,因此 PTB 在 0.762 THz 的比对测量中,使用这种探测器作为标准探测器<sup>[14]</sup>。

在 2005 年第 270 次香山会议之后,我国太赫兹技术的研究掀起了空前热潮。随着太赫兹技术研究的广泛和深入,对太赫兹测量仪器的计量校准提出了迫切需求。2012 年清华大学的 Wang 等<sup>[15]</sup>提出了一种太赫兹辐射脉冲能量的校准方法,利用斩波器衰减对高莱探测器校准,量值溯源到辐射量热计。但是作为标准辐射计的量热计没有进行量值溯源和测量不确定度分析,因此不能实现太赫兹辐射的绝对测量。2013 年 NIM 研制了在太赫兹波段的高吸收率材料和太赫兹辐射计,我国具备了太赫兹辐射功率绝对测量能力<sup>[10]</sup>。此后,中国电子科技集团公司第四十一研究所的吴斌等<sup>[16]</sup>基于 NIM 的太赫兹辐射测量技术开展了太赫兹辐射功率计量的研究。2013 年,国防科技工业光学一级计量站的李宏光等<sup>[17]</sup>利用低温黑体发射宽光谱太赫兹辐射,通过普朗克定律求得辐射光谱强度,利用窄带滤光片滤出太赫兹频段辐射,实现了基于黑体辐射源的太赫兹辐射功率和辐射亮度校准。

### 3 全吸收型双腔太赫兹辐射计研制

为了保障国际首次太赫兹功率比测量值准确可靠,对 2013 年自主研制的太赫兹辐射计作了大量改进<sup>[10]</sup>。太赫兹光束尺寸较大,为了使太赫兹辐射充分吸收,采用大面积热电堆作为传感器,传感器为 45 mm×45 mm 的矩形。高灵敏度传感器使功率响应度由 172 mV/W 提升至 355 mV/W。为了使辐射计具有更好的稳定性,采用高纯无氧铜作为热沉,热沉为直径为 75 mm,高为 50 mm 的圆柱体,具有较大的热容和良好的热稳定性。高灵敏度传感器的一端粘贴在热沉上,另一端喷涂研制的太赫兹高吸收率涂层<sup>[10]</sup>,在吸收层前端罩有一个半球形反射聚光罩,其内壁为抛光的半球形金属反射面,并镀金。照射在吸收涂层上的太赫兹辐射会产生微量反射,聚光罩使反射辐射再次会聚到吸收层上进行吸收,以提高探测器腔体吸收比,使太赫兹辐射计近似为全吸收。

太赫兹辐射功率通常非常微弱,为了降低环境温度变化对辐射计测量结果的影响,制作了两个完全一致的辐射计吸收腔,形成一对孪生补偿结构。研制的太赫兹辐射功率计结构如图 1 所示。一只吸收腔用于测量被测太赫兹辐射功率,另一只吸收腔用于测量背景温度变化。

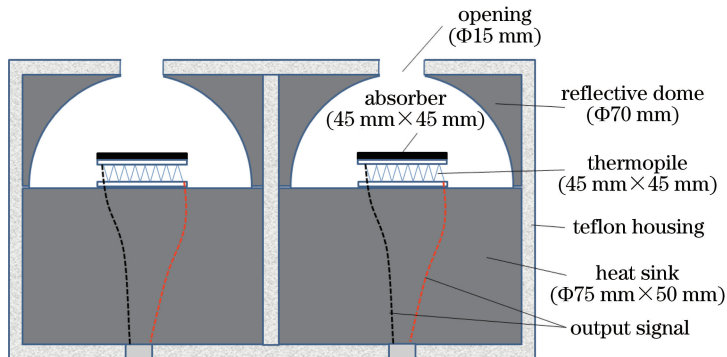


图 1 全吸收型太赫兹辐射计结构图

Fig. 1 Schematic of the all absorptive terahertz radiometer

对辐射计的两只吸收腔分别进行标定,测量太赫兹辐射和测量背景的吸收腔响应度分别为  $S_{\text{THZ}}$  和  $S_{\text{Bg}}$ 。利用电压表同时测量两只吸收腔的响应电压,则整个太赫兹辐射计测量的太赫兹功率可计算为

$$P_{\text{THz}} = \frac{V_{\text{THz}}}{S_{\text{THz}}} - \frac{V_{\text{Bg}}}{S_{\text{Bg}}}, \quad (1)$$

式中  $V_{\text{THz}}$  为测量太赫兹辐射腔的响应电压,  $S_{\text{THz}}$  为测量太赫兹辐射腔的功率响应度,  $V_{\text{Bg}}$  为测量背景辐射腔的响应电压,  $S_{\text{Bg}}$  为测量背景辐射腔的功率响应度。

最后,用聚四氟隔热罩对整个太赫兹辐射计封装,以隔离外界环境和辐射计之间的热交换,降低外界环境温度波动对辐射计测量的影响。

采用孪生补偿结构的探测器有效克服了环境温度不稳定的影响。图 2 是在未接收太赫兹辐射的情况下,利用孪生补偿辐射计监测环境温度变化的结果。实验室通过监控温度和反馈气流控制环境温度稳定。当温度高于设定值时,吹入冷气降温;当温度低于设定值时,吹入暖风升温,约 20 min 为一个周期,持续运行。太赫兹辐射计对温度变化敏感,采用单个吸收腔受环境温度影响严重。图 2 中的实线和短横虚线分别为两只吸收腔测量的输出响应电压,辐射计输出响应电压在  $-1.5 \sim 1.0$  V 之间周期波动,环境温度变化对太赫兹辐射计的测量性能产生严重影响。而采用孪生补偿结构的太赫兹辐射计,因两个接收腔具有同样的结构和性能,对环境温度漂移产生接近一致的响应。图 2 中点虚线为补偿后的输出响应电压,可见,通过孪生补偿辐射计将环境温度漂移影响了降低一个量级,明显提高了辐射计抗环境影响的能力。

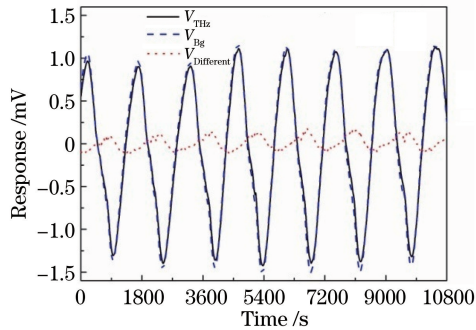


图 2 太赫兹辐射计测量环境影响的结果

Fig. 2 Surroundings fluctuation measurement results with the terahertz radiometer

#### 4 太赫兹辐射计量值溯源与不确定度分析

利用自制的反射式太赫兹光谱仪对研制的吸收材料在太赫兹波段的光谱反射比进行测量。吸收材料在  $0.05 \sim 2.5$  THz 的宽光谱范围都具有极低的反射比。在  $0.32$  sr 范围内,  $0.2 \sim 0.5$  THz 光谱范围反射比低于  $0.3\%$ ,  $0.5 \sim 2.0$  THz 光谱范围反射比小于  $0.1\%$ , 在  $2.0$  THz 以上的频段, 仍然具有极低的反射比, 测量的光谱反射比与仪器本底噪声接近一致。

利用积分球方法测量了吸收材料样品在  $2\pi$  半空间的反射比, 利用 He-Ne 激光, 在  $632.8$  nm 波长进行了两次测量, 反射比测量结果分别为  $0.98\%$  和  $1.18\%$ 。吸收材料样品制备在金属基底上。He-Ne 激光和太赫兹辐射都不能穿透金属, 因此反射比和吸收比之和为 1。可见, 研制的吸收材料在 He-Ne 激光和太赫兹频段都具有很高的吸收比。因此, 可将太赫兹辐射功率计在太赫兹频段的功率响应度溯源到 He-Ne 激光功率计量标准。

低温辐射计是目前国际上测量 He-Ne 激光功率最准确的设备, 测量不确定度在  $0.01\%$  以内。利用低温辐射计对研制的太赫兹辐射计功率响应度进行标定。经低温辐射计标定的太赫兹辐射计两个吸收腔的功率响应度分别为  $337$  mV/W 和  $355$  mV/W。

太赫兹辐射功率计的测量不确定度来源包括: 上级溯源标准、辐射计在 He-Ne 激光波长的反射比、在太赫兹波段的反射比、探测器面响应均匀性、测量重复性、稳定性、响应度非线性、读数分辨率等。

低温辐射计在 He-Ne 激光波长的测量不确定度为  $0.01\%$ , 传递后的不确定度为  $0.02\%$ 。研制的吸收体在 He-Ne 激光波长的反射比小于  $1.18\%$ , 利用聚光罩提高辐射计腔体吸收率, 由 He-Ne 激光吸收比引起的测量不确定度为  $0.59\%$ 。利用太赫兹时域光谱仪对样品在太赫兹频段的反射比进行多次测量, 将测量的立

体角扩展到  $2\pi$  半空间,在 0.762 THz 和 2.52 THz 的反射比分别小于 1.60%和 2.08%,考虑到聚光罩对腔体吸收率的提升,由太赫兹吸收比引起的测量不确定度在 0.762 THz 和 2.52 THz 分别为 0.80%和 1.04%。利用多次测量和统计分析得到辐射计测量重复性引起的不确定度为 0.31%,稳定性不确定度分量为 0.27%。对辐射计探测器靶面不同位置进行多次测量,面响应不均匀性为 0.70%。在 1、2 和 10 mW 功率水平对辐射计精确定标,功率 1~10 mW 响应度非线性为 0.34%。辐射计在接受辐射后,响应电压以 e 指数的趋势接近于稳态值。辐射计的响应时间为 16 s,在 60 s 接近稳态时读取响应电压值,估计读数引起的不确定度分量为 0.20%。

对上述分析的测量不确定度各分量进行汇总,汇总的不确定度分量来源和大小如表 1 所示。其中,A 类不确定度分析为用统计分析方法获得的不确定度量值,B 类不确定度分析为根据测试证书或经验等非统计计算方法获得的不确定度量值<sup>[18]</sup>。在 2.52 THz 和 0.762 THz 合成的标准相对不确定度分别为 1.35%和 1.50%。扩展的相对不确定度分别为 2.7%和 3.0%,包含因子  $k=2$ ,对应的置信概率为 95%。

表 1 太赫兹测量不确定度  
Table 1 Uncertainty of terahertz measurement

Source	Type	2.52 THz	0.762 THz
Laser power standard	B	0.02%	0.02%
Absorption at 632.8 nm	B	0.59%	0.59%
Absorption at THz frequency	B	0.80%	1.04%
Repeatability	A	0.31%	0.31%
Instability	A	0.27%	0.27%
Uniformity	A	0.70%	0.70%
Nonlinearity	A	0.34%	0.34%
Reading resolution	B	0.20%	0.20%
Combined uncertainty ( $k=1$ )		1.35%	1.50%
Expanded uncertainty ( $k=2$ )		2.7%	3.0%

### 5 太赫兹辐射计测量结果的实验验证

采用另一种测量原理的辐射计对全吸收型太赫兹辐射计的测量结果进行验证或检验,检验不确定度分析结果的可靠性。根据 PTB 的 Steiger 等<sup>[11]</sup>采用镜反射 NG1 玻璃探测器测量原理,研制了一种镜反射型太赫兹辐射计,其测量原理如图 3 所示。

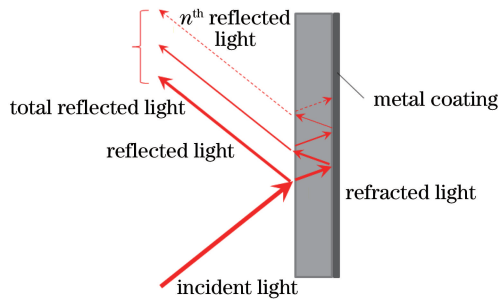


图 3 镜反射型太赫兹辐射计测量原理示意图

Fig. 3 Schematics of terahertz radiometer with specular reflection

当入射光照射在光滑的体吸收材料时,一部分光折射入吸收材料内部,另一部分在光洁的前表面反射。进入吸收材料的光辐射随传输距离被逐渐吸收,剩余的部分在后表面反射,返回到前表面。然后再部分折射回空气,部分被反射,重复着反射、折射和吸收过程。在吸收材料内部,光辐射功率随传输距离呈指数衰减。在吸收系数较大或厚度较厚的吸收材料中,第二次反射回空气中的光辐射功率已经很小,可以忽略不计。

通常体吸收材料后表面镀有反射金属膜,这样光辐射不能透射过吸收材料后表面,仅在反射膜前面存在入射、反射和吸收。因此有:

$$P_{in} = P_A + P_R, \tag{2}$$

式中  $P_{in}$  为入射光功率,  $P_A$  为吸收光功率,  $P_R$  为反射光功率。

由(2)式可得, 具有镜反射的辐射计测量的功率  $P_A$  为

$$P_A = P_{in} - P_R = P_{in} \cdot (1 - R), \quad (3)$$

式中  $R$  为反射比, 即反射光总功率和入射光总功率之比。

由(3)式可知, 入射总辐射功率为

$$P_{in} = P_A / (1 - R). \quad (4)$$

虽然 NG1 玻璃不能完全吸收太赫兹辐射, 但是可以通过测量太赫兹辐射在 NG1 玻璃表面的反射比, 根据(3)式确定太赫兹辐射的总功率。通过测量 NG1 玻璃在 He-Ne 激光波长的吸收比, 将功率响应度溯源至 He-Ne 激光功率标准, 从而实现量值溯源。利用反射比修正实现太赫兹功率响应度溯源的公式为<sup>[11]</sup>

$$S_{THz} = \frac{S_{He-Ne}}{1 - R_{He-Ne}} \cdot (1 - R_{THz}), \quad (5)$$

式中  $S_{THz}$  为辐射计测量太赫兹辐射的功率响应度,  $R_{THz}$  为辐射计在太赫兹频段的反射比,  $S_{He-Ne}$  为辐射计测量 He-Ne 激光的功率响应度,  $R_{He-Ne}$  为辐射计在 He-Ne 激光波长的反射比。

利用该方法研制了具有镜反射型的太赫兹辐射功率计, 实物照片如图 4 所示。利用反射式太赫兹时域光谱仪测量在太赫兹波段的光谱反射比如图 5 所示。从图 5 可以看出, 在频率高于 0.7 THz 的频段, 测量的光谱反射比随频率逐渐降低。在 0.76 THz 频率的反射比为 17%, 在 2.52 THz 频率的反射比为 10%。在 0.7 THz 以下的频段, NG1 玻璃不能有效吸收太赫兹辐射, 入射到 NG1 玻璃的太赫兹辐射在后表面被反射回前表面仍有大量残余, 并与前表面反射的太赫兹辐射发生干涉, 测量的光谱反射比呈现明显的干涉结构。这个结果也与 PTB 的 Steiger 等<sup>[11]</sup> 的测量结果相一致。

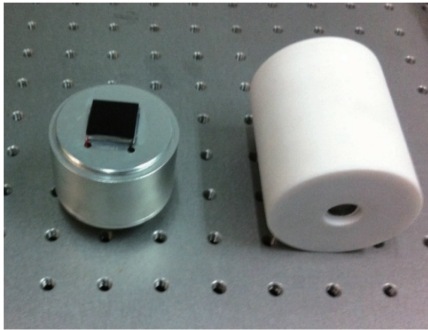


图 4 镜反射型太赫兹辐射计实物照片

Fig. 4 Photo of the fabricated terahertz radiometer with specular reflection

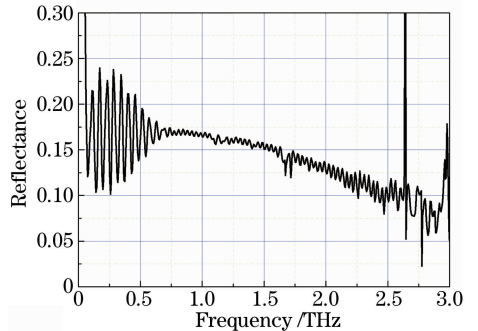


图 5 镜反射太赫兹功率计在太赫兹波段的光谱反射比

Fig. 5 Measured spectral reflectance of the terahertz radiometer with specular reflection

利用功率稳定的 He-Ne 激光和激光功率计, 测量 NG1 玻璃在 He-Ne 激光波长的反射比为 4.25%。根据(2)式可得镜反射太赫兹功率计在 0.76 THz 频率的响应度  $S_{0.76 \text{ THz}} = 0.867 S_{He-Ne}$ 。利用低温辐射计标定的镜反射型辐射计在 He-Ne 激光波长的功率响应度为 400 mV/W。则根据(5)式, 镜反射型太赫兹辐射计在 0.76 THz 频率的功率响应度为 347 mV/W。

利用返波管太赫兹激光器(BWO)作为太赫兹辐射源, 输出 0.76 THz 太赫兹辐射。利用全吸收型太赫兹辐射计和镜反射型太赫兹辐射计分别测量 BWO 的太赫兹辐射, 在 0.76 THz 频率对比两种不同类型的探测测量结果。全吸收型太赫兹辐射计的功率测量值为 157.8  $\mu\text{W}$ , 镜反射型太赫兹辐射计的测量结果为 158.2  $\mu\text{W}$ 。两种探测器测量结果相对偏差为 0.3%, 验证了基于两种不同原理的太赫兹辐射功率计测量结果具有很好的一致性。

## 6 国际首次太赫兹辐射功率比对

为了保障国际太赫兹辐射功率量值准确统一, 2015 年德国柏林举行了国际首次太赫兹辐射功率比对。利用前面研制的全吸收型太赫兹辐射计作为中国的太赫兹辐射功率标准, 开展国际比对实验测量。NIST

使用的标准太赫兹功率计为碳纳米管阵列作为吸收体的太赫兹辐射计<sup>[9]</sup>。PTB在 2.52 THz 和 0.762 THz 分别使用了两种不同的太赫兹辐射计作为标准探测器,在 2.52 THz 使用具有镜反射的 NG1 体吸收玻璃作为吸收体的太赫兹辐射计作为标准功率计<sup>[11]</sup>,在 0.762 THz 使用热释电聚偏氟乙烯薄膜探测器作为标准太赫兹功率计<sup>[13]</sup>。

参加比对的三个国家实验室的太赫兹标准功率计如图 6 所示。NIM 的全吸收型双腔太赫兹辐射功率计位于中间。NIST 以碳纳米管阵列为吸收体研制的太赫兹辐射计位于右侧,其前端的长筒用于防止周围杂散辐射入射到探测器接收靶面。PTB 的镜反射体吸收标准太赫兹功率计位于左侧,用遮光纸遮挡以降低周围杂散辐射影响。最左侧为 PTB 用于观测太赫兹光束位置和光斑尺寸的太赫兹相机。

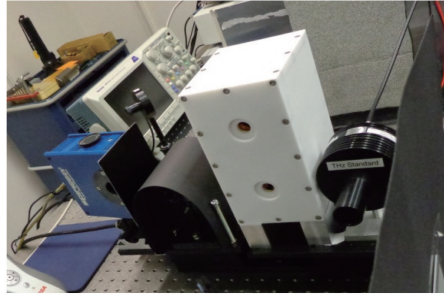


图 6 国际比对的太赫兹标准功率计照片

Fig. 6 Photo of the standard terahertz radiometers in the international comparison

比对之前首先报告各自标准太赫兹辐射功率计的功率响应度量值和测量不确定度。各国的太赫兹辐射功率响应度和测量不确定度如表 2 所示<sup>[14]</sup>。其中 PTB 用于 2.52 THz 功率计量的镜反射体吸收标准功率计由商用功率计改造而成,响应度为商用探测器示值乘修正因子。德国用于 0.762 THz 功率计量的标准功率计为焦热型,接电流放大器显示读数,放大倍数为  $10^8$  V/A。

表 2 NIM, NIST 和 PTB 的太赫兹辐射功率响应度和测量不确定度

Table 2 Responsivity and uncertainty of the terahertz radiometers of NIM, NIST and PTB

Frequency /THz	Item	NIM	NIST	PTB
2.52	Responsivity	355 mV/W	87.2 mV/W	1.100 V/W
	Uncertainty	2.8% ( $k=2$ )	6.6% ( $k=2$ )	3.2% ( $k=2$ )
0.762	Responsivity	355 mV/W	84.8 mV/W	52.0 V/W
	Uncertainty	3.2% ( $k=2$ )	6.6% ( $k=2$ )	4.8% ( $k=2$ )

利用 PTB 的太赫兹气体激光器作为测量光源<sup>[11]</sup>,输出频率在 0.762 和 2.52 THz 的太赫兹辐射,经限制光阑优化光束空间分布后的输出功率约为 3 mW。比对的光路结构如图 7 所示。太赫兹气体激光器发出的太赫兹辐射照射到双槽镀金斩波器上,斩波器的占空比为 50%。斩波器旋转后,一半的太赫兹辐射功率穿过斩波器,照射到各国的标准太赫兹辐射计上,另一半的太赫兹辐射功率被斩波器镀金表面反射,照射到监测探测器上。气体太赫兹激光器的功率会发生波动,但对同一个系统,标准太赫兹辐射计和监测太赫兹探测器的功率示值比是固定的。将 NIM、NIST 和 PTB 的标准太赫兹辐射计固定在位移平台上,调整好各辐射

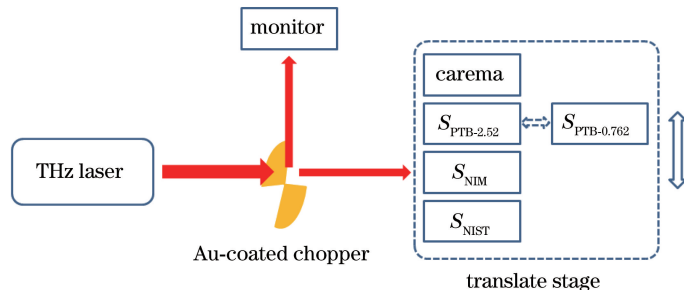


图 7 太赫兹比对光路示意图

Fig. 7 Schematics of the optical setup in the terahertz power comparison

计与太赫兹辐射光束位置。利用位移平台切换各辐射计的位置,分别利用中国、美国和德国各自的太赫兹辐射标准功率计测量太赫兹辐射功率,同时利用监测探测器测量此时的监测功率,计算标准辐射计和监测探测器的示值之比,进行比较<sup>[14]</sup>。

比对的参考值为测量结果的加权平均值,权重为截止不确定度倒数的平方。选择三国不确定度的平均值为截止值,若声称的不确定度小于截止不确定度,则按截止不确定度计算权重;若声称的不确定度大于截止不确定度,则以声称不确定度计算权重。

在 2.52 THz 和 0.762 THz 两个频率处,NIM、NIST 和 PTB 的太赫兹功率比对的结果如图 8 所示<sup>[11]</sup>。从图 8 的比对结果可以看出,NIM、NIST 和 PTB 在 2.52 THz 和 0.762 THz 两个频率的测量结果都在声称的不确定度范围内,国际首次太赫兹功率比对取得满意的等效结果。其中 PTB 的测量值最接近参考值,NIM 的测量不确定度最小。

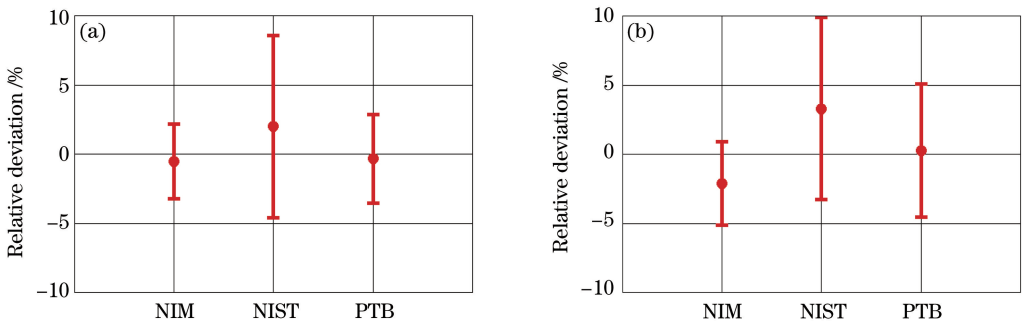


图 8 NIM,NIST 和 PTB 太赫兹辐射功率国际比对结果。(a) 2.52 THz; (b) 0.762 THz  
 Fig. 8 International comparison results of terahertz radiant power among NIM, NIST and PTB.  
 (a) 2.52 THz; (b) 0.762 THz

## 7 结 论

介绍了国际太赫兹辐射功率计量的研究进展,其中德国、美国和中国国家计量院在太赫兹辐射功率绝对测量方面取得了显著性研究成果。国际计量局光度辐射度咨询委员会组织开展国际首次太赫兹辐射功率比对,报导了中国计量科学研究所的太赫兹辐射功率计的研制、不确定度分析、实验测试和比对验证。通过研制全吸收型双腔太赫兹辐射功率计实现了太赫兹辐射功率的量值溯源,并利用镜反射型太赫兹辐射功率计对全吸收型太赫兹计量性能进行验证。同时,参加了国际首次太赫兹功率比对,取得了国际等效一致的结果。国际首次太赫兹功率比对被誉为太赫兹计量的里程碑,对太赫兹技术的研究和应用具有重要的技术支撑和量值保障作用。

## 参 考 文 献

- [1] Siegel P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2002, 50(3): 910-928.
- [2] Fitzgerald A J, Berry E, Zinovev N N, *et al.* An introduction to medical imaging with coherent terahertz frequency radiation[J]. Physics in Medicine and Biology, 2002, 47(7): R67.
- [3] Sirtori C. Applied physics: bridge for the terahertz gap[J]. Nature News and Views, 2002, 417(6855): 132-133.
- [4] Tonouchi M. Cutting-edge terahertz technology[J]. Nature Photonics, 2007, 1(2): 97-105.
- [5] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology[J]. Nature Materials, 2002, 1(1): 26-33.
- [6] Kleine-Ostmann T, Schrader T, Bieler M, *et al.* THz metrology[J]. Frequenz, 2008, 62(5-6): 137-148.
- [7] Naftaly M, Dudley R. Linearity calibration of amplitude and power measurements in terahertz systems and detectors [J]. Optics Letters, 2009, 34(5): 674-676.
- [8] Werner L, Hübers H W, Meindl P, *et al.* Towards traceable radiometry in the terahertz region[J]. Metrologia, 2009, 46(4): S160.
- [9] Lehman J H, Lee B, Grossman E N. Far infrared thermal detectors for laser radiometry using a carbon nanotube array



- [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(21): 4099-4104.
- [10] Deng Y, Sun Q, Yu J, *et al.* Broadband high-absorbance coating for terahertz radiometry[J]. *Optics Express*, 2013, 21(5): 5737-5742.
- [11] Steiger A, Kehrt M, Monte C, *et al.* Traceable terahertz power measurement from 1 THz to 5 THz[J]. *Optics Express*, 2013, 21(12): 14466-14473.
- [12] Iida H, Kinoshita M, Amemiya K, *et al.* Calorimetric measurement of absolute terahertz power at the sub-microwatt level[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(6): 1609-1612.
- [13] Müller R, Gutschwager B, Hollandt J, *et al.* Characterization of a large-area pyroelectric detector from 300 GHz to 30 THz[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2015, 36(7): 654-661.
- [14] Steiger A, Müller R, Oliva A R, *et al.* Terahertz laser power measurement comparison[J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, 6(5): 664-669.
- [15] Wang Y, Zhao Z, Chen Z, *et al.* Calibration of a thermal detector for pulse energy measurement of terahertz radiation [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(21): 4395-4397.
- [16] Wu Bin, Chen Kunfeng, Wang Hengfei, *et al.* Research progress of THz metrology[C]. The 2<sup>nd</sup> Symposium on THz Science, Technology and Applications, 2014: 496-504.  
吴 斌, 陈坤峰, 王恒飞, 等. THz 计量技术研究进展[C]. 第二届全国太赫兹科学技术与应用学术交流会, 2014: 496-504.
- [17] Li Hongguang, Yang Hongru, Xue Zhanli, *et al.* Terahertz radiation detection of low temperature blackbody based on narrowband spectral filter method[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1410-1416.  
李宏光, 杨鸿儒, 薛战理, 等. 窄带光谱滤光法探测低温黑体太赫兹辐射[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(6): 1410-1416.
- [18] National Metrology Management Metrology Technique Committee. JJF 1059.1-2012 Evaluation and expression of uncertainty in measurement[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, 2012.  
全国法制计量管理计量技术委员会. JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2012.