

文章编号: 2095-4980(2017)04-0553-05

太赫兹计量研究进展

张宝武^{*1,4}, 邓玉强^{*2}, 徐纪华³, 蔡晋辉¹, 方波¹

(1.中国计量大学 计量测试工程学院, 浙江 杭州 310018; 2.中国计量科学研究院 光学与激光计量科学研究所, 北京 100029;
3.比萨高等师范学校国家纳米科技中心和意大利研究院纳米科学研究所, 意大利 比萨 56127; 4.比萨大学 物理系, 意大利 比萨 56127)

摘要: 太赫兹技术的独特性和优越性吸引着众多科学家的关注, 在生物医药、信息科学、公共安全、量子研究和太空探测等领域具有巨大应用潜力。这些应用的有效性和可信度都需要以太赫兹相关参数的量值溯源为前提。文章以太赫兹光谱、频率、功率和强度等参数为对象, 介绍了太赫兹计量研究的最新进展, 分析了各种计量技术的特点, 以期促进太赫兹计量技术发展, 保障太赫兹研究和应用的量值可靠。

关键词: 太赫兹技术; 太赫兹计量; 太赫兹时域光谱仪; 太赫兹辐射度

中图分类号: TN201; TB973

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201704.0553

Progress in terahertz metrology

ZHANG Baowu^{*1,4}, DENG Yuqiang^{*2}, XU Jihua³, CAI Jinhui¹, FANG Bo¹

(1.College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou Zhejiang 310018, China; 2.Division of Optics and Lasers, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China; 3.NEST, Scuola Normale Superiore and Istituto Nanoscienza-CNR, Pisa, 56127, Italy; 4.Dipartimento di Fisica, Università di Pisa, Pisa, 56127, Italy)

Abstract: In view of its specialty and superiority, terahertz (THz) technology has been widely used in biomedicine, information science, public security, quantum research, and space exploration. To guarantee the effectiveness and credibility, all of these applications must be based on the traceable measurement of THz parameters. In this paper, the progress in terahertz metrology, including THz spectroscopy metrology, THz frequency metrology, THz radiometry and THz intensity metrology, is introduced.

Keywords: THz technology; THz metrology; THz Time-Domain Spectroscopy(THz-TDS); THz radiometry

太赫兹(THz)波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波, 是连接宏观电子学与微观光子学的桥梁。20 世纪 80 年代, 超快激光技术的出现促进了太赫兹技术的发展, 太赫兹技术广泛应用于各行各业的重要检测和探测^[1-7], 例如生物医学成像、公共安全检测、材料无损检测、全球环境监测、药品成分分析、国防军事探测、信息通信技术等。太赫兹的应用需要通过各种参数的溯源来保障其量值的准确统一、数据的有效性和测试的可信度。然而, 太赫兹计量滞后于电磁波谱的其他频段, 形成了“计量学上的太赫兹空白”。为实现太赫兹量值溯源到国际单位制, 美国、德国、英国、中国、法国和日本等国家计量机构都开展了太赫兹计量研究^[8-12]。本文介绍太赫兹计量的研究进展, 其中包含太赫兹光谱计量、太赫兹频率计量、太赫兹功率计量和太赫兹强度计量等。

1 太赫兹光谱计量

太赫兹光谱计量涉及太赫兹光谱仪生产者如何保证仪器测量结果的可靠性和溯源性, 如何保证测量过程新现象的出现不是源于仪器本身, 如何保证不同 THz 仪器间测量结果的可比性^[8,10,13-14]。国内外的研究主要集中在以下两种方法上: 标准具法^[10,13,15-16]和一氧化碳(CO)吸收光谱法^[13-14,17]。

收稿日期: 2015-11-16; 修回日期: 2016-04-06

基金项目: 国家自然科学基金支持项目(No.11274282; No.61340055); 科技部重点研发计划支持项目(No.2016YFF0200306; No.2016YFF0100505; No.2017YFF0209704); 上海市科委资助项目(15DZ0500104); 国家留学基金资助项目(201508330071); 国家质量监督检验检疫总局公益性行业专项资助项目(201410025); 中国计量科学研究院基本科研业务费资助项目(AKY1160)

***通信作者:** 张宝武 email:zhangbaowu@126.com; 邓玉强 email:yq Deng@nim.ac.cn

1.1 标准具法

太赫兹时域光谱仪(THz Time-Domain Spectroscopy, THz-TDS)光谱信号中会因为被测样品前后表面多次反射而产生类标准具振荡的光谱干涉。这些类标准具干涉信号能够通过样品的厚度和样品折射率计算获得,进而可以制作标准具样品,用于校准 THz-TDS 光谱信号。2014 年, Kinoshita 等^[16]利用一个光学透明 THz 空气层标准具实现了一种商用 THz-TDS(TAS7500SP, Advantest Corp.)光谱校准,频率误差在 3 GHz,相对不确定度为 1%。标准具法可直接利用被测样品自己的参数来校准 THz 光谱而不需要额外的光谱校准设备,但校准的频率分辨力受到限制。

1.2 CO 吸收光谱法

CO 吸收光谱法归属于气体吸收光谱校准技术。在这方面,最先获得应用的是水蒸汽吸收光谱校准法,但是这种方法受制于环境湿度、温度和压强,并且吸收光谱存在双峰或三峰结构。CO 在 0.1~5 THz 频域内能够呈现出一系列间距的梳状规则吸收光谱。这些等间距的规则吸收峰避免了光谱校准的频率错位,其尖峰也提高了校准精确度。Naftaly 等^[13]以此实现了 THz-TDS 平均误差为 2 GHz 的校准。孙青等^[17]用此方法实现平均误差为 3.1 GHz 的校准精确度,见图 1。

邓玉强等^[14]研究发现,对于开环控制的光学延迟线,THz-TDS 在利用 CO 吸收光谱校准时,因测量重复性的影响,校准后的谱线并不能完全重合。重复性误差将导致 0.4% 的相对不确定度。针对此问题,邓玉强等提出利用 THz 光谱仪时域波形回波脉冲校正方案。结果显示,这种校正方案可以将 CO 多次独立校准曲线的非重复性相对标准偏差降低为 1/7,实现 THz-TDS 的高精确度在线校准^[14]。

CO 吸收光谱法虽然能够实现 2 GHz 频率分辨力的光谱校准,但是也有一些问题^[14]。首先,CO 气体有毒,不宜携带,使用不方便。其次,利用 CO 进行光谱仪校准时,校准和实际样品的测量不能同时进行。再次,CO 样品池需要足够的空间,不适于测量空间小的 THz-TDS 仪器校准。另外,CO 校准方案中还存在一些额外误差,例如 CO 和测量样品间的更换、控制软件、温度、湿度和气压等都将引入测量误差。

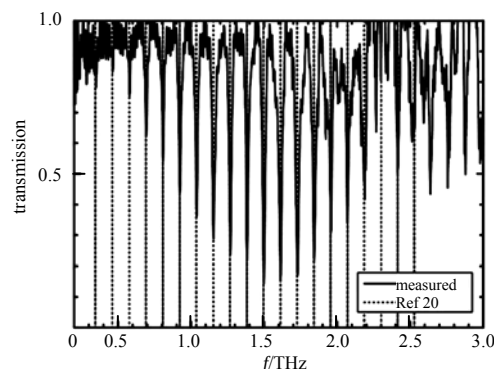


Fig.1 Transmission spectrum of carbon monoxide measured with THz-TDS

图 1 CO 在太赫兹频域内的吸收谱线^[13]

2 太赫兹频率的计量

鉴于飞秒激光频率梳技术的发展,国内外众多研究者将太赫兹的频率溯源研究锁定在频率梳上,以此为手段将太赫兹频率溯源至原子钟时频标准上^[18-24]。

2011 年, Yasui 等^[19]报道了图 2 的基于 THz 频率梳的 THz 频率计量方案。光频梳(optical frequency comb)用于连接光频和微波频率,通过光导过程(photoconductive process)将光频梳频率下转换为 THz 频率梳(THz frequency comb),实现太赫兹频率高精度测量。原子钟(atomic clock)用于提供时间频率标准,实现量值溯源到国际单位制。这样就完成了 THz 频率溯源至国际单位制的过程,进而其他相关仪器,如 THz 合成器(THz synthesizer)、THz 钟(THz clock)和 THz 光谱分析仪(THz spectrum analyzer)等都将通过这种 THz 频率梳来完成校准。文献[19]通过这种方式建立了一种 THz 频率梳参考的光谱分析仪,实现了亚 THz 和 THz 两种连续波的溯源检测,精确度可达 10^{-11} 。

2011 年 Füsler 等^[24]报道了基于非稳频飞秒激光器的 THz 频率高精度测量方案。他们对 100 GHz 源实现了高达 9×10^{-14} 精确度的测量。

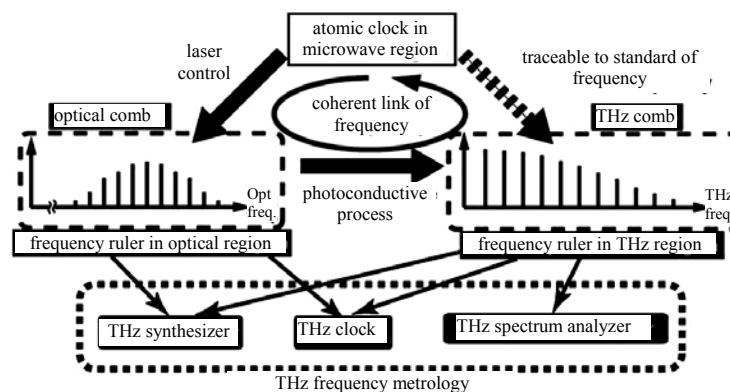


Fig.2 Schematic for THz frequency metrology with frequency comb

图 2 太赫兹频率计量的光频梳技术原理^[19]

2016年, Kumagai等^[23]利用相位锁定技术实现了单模3 THz量子级联激光器(THz-Quantum Cascade Laser, THz-QCL)的频率稳定度测量, 此相位锁定的THz-QCL在 10^{-15} 量级上与微波时频基准具有相同的稳定度。

3 太赫兹功率计量

2009年, 英国国家物理实验室(National Physics Laboratory, NPL)的Naftaly等^[25]设计了一组硅片堆测试套件, 分别对2套THz-TDS系统、1个热电偶传感器和3个高莱盒探测器进行了测试。结果显示1套THz-TDS符合线性响应, 另外1套出现较大的偏差; 热电偶传感器在其动态范围之内是符合线性响应的; 3个高莱盒探测器都表现出了强烈的非线性。

2009年, 德国联邦物理技术研究院(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB)的Werner等^[26]在国际上首次实现了2.5 THz(对应波长为120 μm)辐射探测器的校准工作, 合成标准不确定度可达7.3%。2013年, PTB建立了THz辐射功率校准装置^[27], 能够实现1 THz到5 THz范围内的功率溯源测量, 其中热电堆探测器能够将THz的功率响应度溯源至更加精确的可见光功率, 进而减少探测器带给THz功率校准的误差。

2011年, 美国标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)的Lehman等^[28]报导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%。以该材料作为吸收体, NIST研制了太赫兹功率计, 通过电校准确定功率计响应度量值。

2013年, 中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)的邓玉强等^[29]研制了一种在太赫兹波段具有吸收比高、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^[30], 使我国成为国际上第3个实现太赫兹辐射功率量值溯源和独立复现的国家。

2014年, 日本产业技术综合研究所(AIST)的Iida等^[31]研制了太赫兹功率绝对测量的热量计, 实现了微瓦量级下太赫兹波功率的可溯源性。

2015年, 德国、美国和中国在德国柏林进行了国际首次太赫兹功率比对^[12]。比对实验的THz源为二氧化碳激光泵浦的分子气体激光器, 选择2.52 THz(对应波长119 μm)和0.762 THz(对应波长394 μm)2个比对频率, 功率在3 mW左右。比对结果显示, 在声称的扩展不确定度范围内, 3个国家标准THz功率计的测量结果都相互符合得很好。比对结果见图3, 其中图3(a)为2.52 THz比对结果, 图3(b)为0.762 THz比对结果^[12]。其中, 中国计量科学研究院的测量不确定度国际最小, 这标志着我国太赫兹辐射功率计量能力步入国际领先行列。此次比对结果将推动THz的功率溯源测量从实验室迈向工业应用, 将极大地推动THz设备, 以及THz传感器、THz成像器件和THz高速通信的商业发展^[12]。

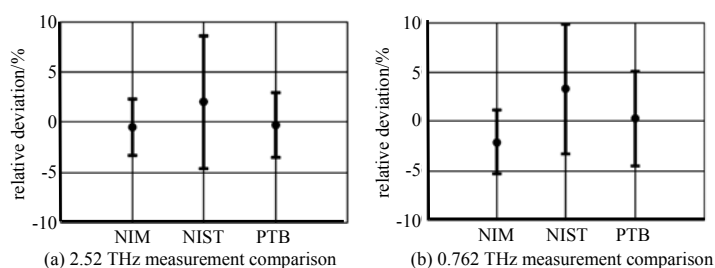


Fig.3 THz laser power measurement comparison

图3 太赫兹功率国际首次比对结果^[12]

4 太赫兹强度计量

2013年PTB的Füser等^[32]报道了基于非稳频THz频率梳的GHz/THz的空间分辨的强度测量, 可以实现30 GHz到28 THz频率范围测量。测量是基于移动太赫兹辐射源进行的, 对于体系庞大的太赫兹辐射源无法进行测量。2015年, 邓玉强等^[33]构建了一种基于移动光电采样探测器实现太赫兹辐射强度空间分布的测量装置, 将电光(Electro-Optic, EO)采样测量和校准的辐射计测量进行比对, 实现了100 GHz的连续辐射源强度的测量溯源。这种技术提供了可以覆盖几个GHz到2.5 THz的宽波段频率范围空间辐射强度的绝对测量和功率的量值溯源, 在填补计量溯源频段上具有重要意义^[33]。

5 结论

鉴于太赫兹计量在太赫兹技术发展方面具有基础性和支撑性意义, 本文介绍了太赫兹光谱计量、太赫兹频率计量、太赫兹功率计量和太赫兹强度计量等方面的国内外研究进展。本文有助于研究者了解太赫兹计量的发展历

程和近期取得的一些关键成果,促进研究者深入认识和了解太赫兹频率范围的辐射特性,对太赫兹精密测量及量值溯源技术的研究具有一定的参考价值,对促进太赫兹研究和应用技术的发展具有一定的借鉴价值。

参考文献:

- [1] SIEGEL P H. Terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory Technology, 2002,50(3):910-928.
- [2] 刘乔,陈志强,雷江波,等. 医用棉纱布的太赫兹波段透射特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(5):667-670. (LIU Qiao, CHEN Zhiqiang, LEI Jiangbo, et al. Transmission characteristics of medical cotton gauzes in terahertz region[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(5):667-670.)
- [3] 张磊巍,左剑,张存林. 葡萄糖溶液的太赫兹光谱观察[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):707-711. (ZHANG Leiwei, ZUO Jian, ZHANG Cunlin. Observation of terahertz spectra of glucose solution[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):707-711.)
- [4] 边明明,王世涛,胡伟东,等. 星载太赫兹雷达测云散射特性及辐射源分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(5):712-717. (BIAN Mingming, WANG Shitao, HU Weidong, et al. Radiation source and scattering characteristics analysis of space-borne terahertz cloud radar[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(5):712-717.)
- [5] 李薇,施长城,张瑾,等. 纤维增强复合材料太赫兹成像无损检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):396-400. (LI Wei, SHI Changcheng, ZHANG Jin, et al. Nondestructive evaluation of fiber reinforced plastic using terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):396-400.)
- [6] 詹洪磊,王玉霞,王雪松,等. 煤炭标准物质的太赫兹光谱聚类分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(1):26-30. (ZHAN Honglei, WANG Yuxia, WANG Xuesong, et al. Cluster analysis concerning the terahertz spectroscopy of coal materials[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(1):26-30.)
- [7] 成彬彬,李慧萍,安健飞,等. 太赫兹成像技术在站开式安检中的应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(6):843-848. (CHENG Binbin, LI Huiping, AN Jianfei, et al. Application of terahertz imaging in standoff security inspection[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(6):843-848.)
- [8] NAFTALY M. Metrology issues and solutions in THz time-domain spectroscopy: noise, errors, calibration[J]. IEEE Sensors Journal, 2013,13(1):8-17.
- [9] KLEINE-OSTMANN T, SCHRADER T, BIELER M, et al. THz metrology[J]. Frequenz, 2008,62(5-6):137-148.
- [10] 邓玉强,孙青,于靖. 太赫兹光谱和功率计量研究进展[J]. 空间电子技术, 2013(4):114-119. (DENG Yuqiang, SUN Qing, YU Jing. Progress in terahertz spectrum metrology and terahertz radiometry[J]. Space Electronic Technology, 2013(4):114-119.)
- [11] SHIMADA Y, IIDA H, KINOSHITA M. Recent research trends of terahertz measurement standards[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2015,5(6):1166-1172.
- [12] STEIGER A, MÜLLER R, REMESAL OLIVA A, et al. Terahertz laser power measurement comparison[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science & Technology, 2016,6(5):664-669.
- [13] NAFTALY M, DUDLEY R A, FLETCHER J R, et al. Frequency calibration of terahertz time-domain spectrometers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2009,26(7):1357-1362.
- [14] DENG Y, SUN Q, YU J. On-line calibration for linear time-base error correction of terahertz spectrometers with echo pulses[J]. Metrologia, 2014,51(1):18-24.
- [15] 曹铁岭,姚建铨,郑义. 基于法布里-珀罗干涉仪的太赫兹波波长测试方法[J]. 光学仪器, 2008,30(2):13-16. (CAO Tieling, YAO Jianquan, ZHENG Yi. Ways of wavelength measurement of terahertz wave based on Fabry-Perot interferometer[J]. Optical Instruments, 2008,30(2):13-16.)
- [16] KINOSHITA M, IIDA H, SHIMADA Y. Frequency calibration of terahertz time-domain spectrometer using air-gap etalon[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2014,4(6):756-759.
- [17] 孙青,邓玉强,于靖,等. 基于气体特征吸收谱线的太赫兹时域光谱仪频率校准[J]. 应用光学, 2012,33(3):554-557. (SUN Qing, DENG Yuqiang, YU Jing, et al. Frequency calibration of terahertz time-domain spectrometers using absorption lines of carbon monoxide[J]. Journal of Applied Optics, 2012,33(3):554-557.)
- [18] CHAMPENOIS C, HAGEL G, HOUSSIN M, et al. Terahertz frequency standard based on three-photon coherent population trapping[J]. Physics Review Letter, 2007,99(1):013001.
- [19] YASUI T, YOKOYAMA S, INABA H, et al. Terahertz frequency metrology based on frequency comb[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011,17(1):191-201.
- [20] FÜSER H, BIELER M. Terahertz frequency combs[J]. Journal of Infrared Millimeter and Terahertz Waves, 2014,35(8):585-609.

- [21] YASUI H, KIMURA H, HSIEH Y, et al. Low-pressure gas spectroscopy using terahertz frequency synthesizer traceable to microwave frequency standard via dual optical comb[C]// International Conference on Infrared Millimeter and Terahertz waves (IRMMW-THz). Tucson, AZ, United States: [s.n.], 2014, 39: 1-2.
- [22] HSIEH Y, IYONAGA Y, SAKAGUCHI Y, et al. Terahertz comb spectroscopy traceable to microwave frequency standard[J]. IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology, 2013, 3(3): 322-330.
- [23] KUMAGAI M, IRIMAJIRI Y, NAGANO S, et al. Current status of terahertz frequency metrology at NICT[C]// Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM). Ottawa, Canada: [s.n.], 2016: 1-2.
- [24] FÜSER H, JUDASCHKE R, BIELER M. High-precision frequency measurements in the THz spectral region using an unstabilized femtosecond laser[J]. Applied Physics Letters, 2011, 99(12): 121111.
- [25] NAFTALY M, DUDLEY R. Linearity calibration of amplitude and power measurements in terahertz systems and detectors[J]. Optics Letters, 2009, 34(5): 674-676.
- [26] WERNER L, HÜBERS H W, MEINDL P, et al. Towards traceable radiometry in the terahertz region[J]. Metrologia, 2009, 46(4): S160-S164.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] DENG Y, SUN Q, YU J, et al. Broadband high-absorbance coating for terahertz radiometry[J]. Optics Express, 2013, 21(5): 5737-5742.
- [30] DENG Y, LI J, SUN Q. Traceable measurements of CW and pulse terahertz power with terahertz radiometer[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2017, 23(4): 3800306.
- [31] IIDA H, KINOSHITA M, AMEMIYA K, et al. Calorimetric measurement of absolute terahertz power at the sub-microwatt level[J]. Optics Letter, 2014, 39(6): 1609-1612.
- [32] FÜSER H, BIELER M. Frequency, amplitude, and phase measurements of GHz and THz sources using unstabilized THz frequency combs[J]. SPIE Proceedings, 2013, 8624: 86240T.
- [33] DENG Y, FÜSER H, BIELER M. Absolute intensity measurements of CW GHz and THz radiation using electro-optic sampling[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(6): 1734-1740.

作者简介:



张宝武(1978-), 男, 山东省平度市人, 副教授, 主要研究方向为激光技术、光学计量. email: zhangbaowu@126.com.

蔡晋辉(1974-), 男, 浙江省金华市人, 教授, 主要研究方向为太赫兹频谱检测、图像和数字信号处理.

邓玉强(1976-), 男, 吉林省东丰县人, 研究员, 主要研究方向为超短脉冲激光计量、太赫兹计量和激光辐射度. email: yqdeng@nim.ac.cn.

徐纪华(1952-), 男, 浙江省海宁市人, 研究员, 主要研究方向为太赫兹量子级联激光器和探测器的研究和应用.

方波(1981-), 男, 杭州市人, 高级实验师, 主要研究方向为太赫兹计量、超材料技术和精密测量技术.