

基于频率梳的太赫兹辐射功率密度测量

孟莹^{1,2}, 邓玉强^{1,2*}, 郭树恒^{1,2}, 孙青², 李超辰², 方波¹, 曾九孙¹, 蔡晋辉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 光学所, 北京 100029)

摘要:为实现太赫兹辐射特性精准认知,开展太赫兹辐射功率密度测量研究.通过光学频率梳产生太赫兹频率梳,利用太赫兹频率梳实现太赫兹辐射源空间辐射功率密度测量.本文利用电光采样和光电导探测两种方式,实现了100 GHz辐射源空间辐射功率密度测量;将100 GHz辐射总功率溯源到标准太赫兹功率计,实现太赫兹辐射功率密度绝对测量.分析比较了利用800 nm空间光进行电光采样和利用1550 nm光纤激光进行光电导探测的测量结果.在不同距离下,对太赫兹辐射源的空间辐射功率密度进行了测量和量值溯源,实验揭示了太赫兹辐射传输的空间演化特性.

关键词:太赫兹计量;光学标准与测试;太赫兹辐射度

中图分类号:O436 **文献标识码:**A

Terahertz spatial radiant power density measurements based on terahertz frequency comb

MENG Ying^{1,2}, DENG Yu-Qiang^{1,2*}, GUO Shu-Heng^{1,2}, SUN Qing², LI Chao-Chen²,
FANG Bo¹, ZENG Jiu-Sun¹, CAI Jin-Hui¹

(1. College of Metrology & Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Optics Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)

Abstract: Terahertz frequency comb, which is generated from femtosecond frequency comb, is applied to measure the spatial radiant power density of terahertz source. Two technologies, electro-optic sampling and photoconductive detection, are applied to generate terahertz frequency comb, and the spatial power density of a 100 GHz source is measured with both of these two techniques. The total radiant power is traceable to a standard terahertz radiometer, and the absolute power density of the terahertz source is obtained. The measurement results with both of the two techniques, electro-optic sampling with 800 nm femtosecond optical pulse in free space and photoconductive antenna detection with 1550 nm femtosecond optical pulse in fiber, are analyzed and compared. Moreover, the spatial power density of the terahertz radiation at different distance away from the terahertz source are measured, and the involvement of the terahertz radiation in free space is experimentally studied.

Key words: terahertz metrology, optical standards and testing, terahertz radiometry

PACS: 06. 20. fb, 07. 57. -c, 07. 60. -j

引言

太赫兹辐射频率在电磁波谱上位于光学红外线和无线电微波之间,处于宏观电子学向微观光子学

过渡的频段,被认为是连接电子学和光子学的桥梁^[1-2].太赫兹具有低光子能量、强穿透能力和波谱信息丰富等特点,在物质探测、活体检测、生物医学、高速通信和安全检测等领域具有重要应用^[1,3].

收稿日期:2018-10-23,修回日期:2018-12-23

Received date: 2018-10-23, revised date: 2018-12-23

基金项目:国家重点研究发展计划(2017YFF0209704),国家自然科学基金(11874333)

Foundation items: Supported by National Key R&D Program of China (2017YFF0209704), National Natural Science Foundation of China (11874333)

作者简介(Biography):孟莹(1994-),女,山东莱芜人,硕士研究生.主要从事太赫兹空间辐射强度研究. E-mail:mying_39@126.com

*通讯作者(Corresponding author): E-mail:yqdeng@nim.ac.cn

长期以来,由于缺乏有效的辐射源和探测器,人们对太赫兹频段的辐射特性了解甚少,形成了历史上的“太赫兹空隙”^[2]. 上世纪 80 年代,随着飞秒激光技术和电子技术的迅速发展,太赫兹的产生和探测技术也得到迅速发展,各类太赫兹辐射源和探测器不断涌现,掀起了太赫兹技术研究和应用的热潮.

太赫兹的研究和应用迫切需要将测量结果溯源到国际单位制,保障测量结果准确可靠,国际量值统一互认. 由于太赫兹是新兴的前沿技术,国际上尚缺乏太赫兹相关参数测量标准^[4]. 国际计量研究机构重视并开展太赫兹计量研究,在太赫兹功率计量^[5-9]、太赫兹光谱计量^[10-12]和太赫兹频率计量^[13-14]等方面取得了一系列突破进展,在太赫兹辐射功率和频率计量方面有了显著进步. 从而,精准认知太赫兹源空间辐射特性成为进一步关注的主题.

德国物理技术研究院 (PTB) 的 Füsler 与 Bieler 利用太赫兹频率梳与被测太赫兹辐射拍频,通过移动太赫兹辐射源进行空间扫描,实现了太赫兹空间辐射强度的测量^[15]. 然而,移动太赫兹辐射源可能引起太赫兹辐射不稳定,且有些太赫兹源因体积和重量限制无法移动,急需发展移动探测器的技术以实现太赫兹辐射空间强度的测量. 邓玉强与 Bieler 等发展了一种空间光路扫描系统,将中心波长为 800 nm 的飞秒脉冲激光准直到二维光学扫描平台上,通过移动平台上的电光采样器件,实现了太赫兹空间辐射功率密度的测量^[16].

利用光电导天线实现太赫兹拍频探测有望进一步提升测量信噪比,然而空间光路位置的微小偏移可能引起光电导探测产生噪声,造成太赫兹辐射空间功率密度失真. 利用光纤耦合型光电导天线可避免空间光照射光电导位置变化的影响,获得高信噪比、高稳定度的太赫兹拍频测量结果^[17]. 本文通过电光采样和光电导探测两种方法开展 100 GHz 源空间辐射功率密度测量研究. 对利用 800 nm 的空间光进行电光采样和利用 1 550 nm 光纤激光进行光电导探测的测量结果进行了比较. 本文也实现了不同距离的太赫兹辐射功率密度测量,实验研究了太赫兹辐射空间传输的演化特性.

1 测量原理

1.1 太赫兹频率梳产生与拍频测量

飞秒光脉冲具有较宽的光谱带宽和丰富的波谱成分,时域的飞秒脉冲序列 Fourier 变换后在频域表现为宽光谱包络下的梳状光谱结构,如图 1 所示. 由

于飞秒脉冲在激光器腔内传输的群速度和相速度有偏差,因此飞秒脉冲强度包络下的相位并不一致. 相邻脉冲的载波相位与包络相位的偏差称为“载波-包络相位差”,如图 1(a) 所示. 时域的载波-包络相位差 Fourier 变换在频域表现为梳齿与整数倍重复频率之间产生偏移,称为“载波-包络频率差”^[18],如图 1(b) 所示.

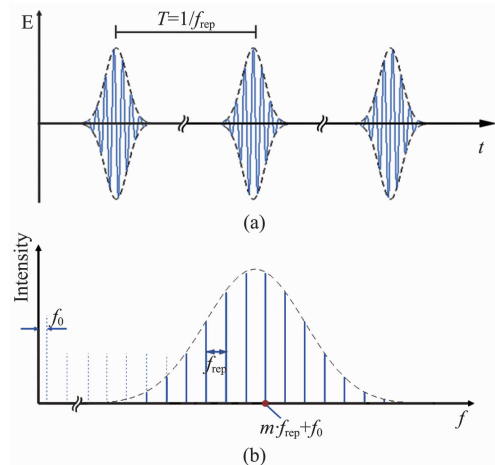


图 1 时域飞秒脉冲序列和频域飞秒光学频率梳 (a) 飞秒时域脉冲序列, (b) 飞秒激光频率梳
Fig. 1 Femtosecond laser pulse train and optical frequency comb (a) Femtosecond laser pulse train in time domain, (b) femtosecond optical frequency comb

用飞秒激光激发电光晶体或光电导天线,产生时域超短、频域宽带的太赫兹脉冲辐射. 一个飞秒脉冲激发出一个太赫兹脉冲,因此飞秒脉冲序列激发出太赫兹脉冲序列. 与飞秒光学频率梳类似,时域的太赫兹脉冲序列 Fourier 变换后在频域表现为太赫兹光谱包络下的梳状结构,称为“太赫兹频率梳”^[13,19],如图 2 所示. 然而,产生的太赫兹辐射对飞秒脉冲电场包络的平方成正比,而无法感知超短脉冲时域包络下的电场振荡. 因此,太赫兹脉冲与飞

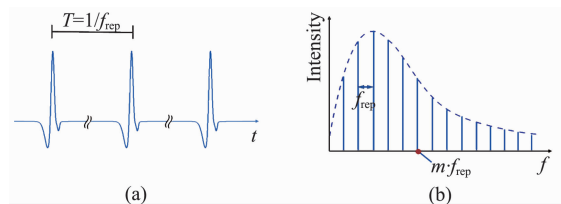


图 2 太赫兹时域脉冲和太赫兹频率梳 (a) 太赫兹脉冲序列, (b) 太赫兹频率梳
Fig. 2 Terahertz pulse train and terahertz frequency comb (a) Terahertz pulse train in time domain, (b) terahertz frequency comb

秒脉冲载波-包络相位无关,即使超短脉冲具有载波-包络相位,产生的太赫兹脉冲却具有相同的时域波形,如图2(a)所示.从而,Fourier变换后太赫兹频率梳没有载波-包络频率差,每根梳齿恰好为整数倍飞秒脉冲重复频率,如图2(b)所示.

太赫兹频率梳与连续太赫兹源相互作用,在频域产生拍频^[13-14,19].连续波太赫兹频率 f_{THz} 与太赫兹频率梳中邻近的第 m 根梳齿的拍频频率可表示为:

$$f_b = |f_{\text{THz}} - m \cdot f_{\text{rep}}| \quad (1)$$

通过测量拍频频率 f_b 和拍频的太赫兹梳齿阶数 m ,即可实现太赫兹频率的准确测量^[15-16,19].

1.2 太赫兹辐射功率密度测量和溯源

拍频信号的强度与太赫兹辐射电场强度成正比,在垂直于太赫兹传输方向的平面内扫描电光采样器件,可实现太赫兹辐射功率密度的测量^[15-16,19].对测量的拍频信号强度扣除背景噪声,然后平方,得到太赫兹辐射的功率密度 $I_m(x, y)$.对太赫兹辐射功率密度 $I_m(x, y)$ 进行空间进行积分,即为太赫兹源辐射的总功率 P_{sum} :

$$P_{\text{sum}} = \iint_{(x,y)} I_m(x, y) dx dy \quad (2)$$

太赫兹源辐射的总功率 P_{sum} 可溯源到标准太赫兹功率计.中国计量科学研究院前期研制了在太赫兹波段具有宽吸收光谱、高吸收率的吸收材料^[7],基于该材料研制了太赫兹辐射功率计^[20],将太赫兹功率溯源至国家激光功率基准,实现了太赫兹辐射功率量值溯源至国际单位制,并在国际首次太赫兹功率比对中取得等效一致^[9,21].利用太赫兹标准功率计测得的标准功率值 P_{total} 对积分得到的总功率 P_{sum} 校准,得修正因子 c 为:

$$c = \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{sum}}} \quad (3)$$

因此,经溯源得到的太赫兹空间辐射功率密度可表示为:

$$I_{\text{sl}}(x, y) = c \cdot I_m(x, y) \quad (4)$$

2 实验装置

2.1 自由空间电光采样太赫兹辐射功率密度测量装置

自由空间电光采样太赫兹辐射功率密度测量装置如图3所示.飞秒激光器(FemtoFiber Pro, TOPTICA Photonics)发出中心波长800 nm,脉冲宽度100 fs,重复频率80 MHz的飞秒脉冲激光,经反射镜 M_1 反射,透过分束镜BS后经反射镜 M_2 反射,入射到

二维光学扫描平台上.在二维光学扫描平台的水平位移台和垂直位移台上分别安装反射镜 M_3 和 M_4 ,精确调整激光反射镜,使激光束方向与水平位移台和垂直位移台的移动方向完全一致.当二维光学扫描平台沿水平和垂直方向移动时,反射激光始终经透镜L聚焦到电光晶体EO的同一位置.图中,电光晶体为ZnTe晶体.飞秒脉冲激光在ZnTe晶体后表面发生反射,反射光沿光束入射方向原路返回,反射的飞秒激光在ZnTe晶体中经光学整流产生太赫兹频率梳.被测太赫兹电磁辐射与邻近的太赫兹频率梳梳齿拍频,拍频电场调制ZnTe的折射率椭球,引起探测飞秒脉冲激光偏振态改变.经ZnTe晶体后表面反射的飞秒脉冲同时作为探测光经分束镜BS反射,通过由1/4波片、沃拉斯顿棱镜WP和平衡探测器BD组成的平衡探测系统检测偏振态的变化,通过高速数据采集卡(NI5122, National Instruments)和计算机采集并记录检测的拍频信号.

通过移动二维扫描平台,利用ZnTe晶体的电光采样探测不同空间位置太赫兹辐射源与太赫兹频率梳的拍频,实现被测太赫兹源的空间辐射功率密度的测量.对测量的太赫兹源的辐射功率密度进行空间积分,将积分总功率溯源至标准太赫兹功率计,即实现太赫兹源空间辐射功率密度的绝对测量和量值溯源.

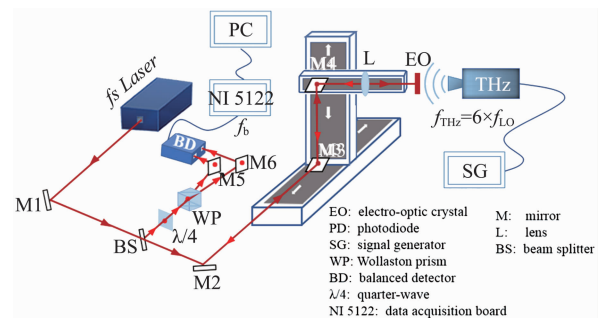


图3 基于电光采样的太赫兹辐射功率密度测量装置示意图

Fig. 3 Schematics of the terahertz radiant power density measurement setup based on electro-optic sampling

2.2 光纤光电导天线太赫兹辐射功率密度测量装置

利用光纤光电导天线实现太赫兹辐射功率密度的测量装置与自由空间电光采样的太赫兹辐射功率密度测量装置类似,但更为简化.光纤光电导天线实现太赫兹辐射功率密度测量不需要精细调整空间激光与二维光学扫描平台移动方向的严格一致,其装置示意图如图4所示.

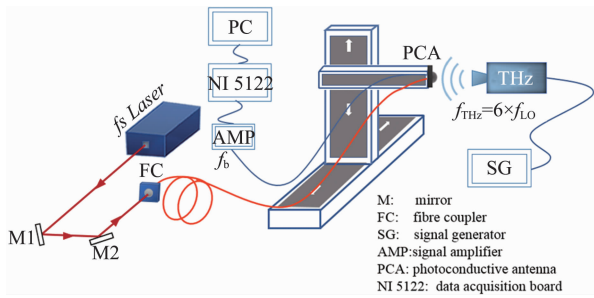


图4 基于光纤光电导天线的太赫兹空间辐射功率密度测量装置示意图

Fig. 4 Schematics of the terahertz spatial radiant power density measurement setup based on fiber-coupled photoconductive antenna

飞秒激光器(FemtoFiber Pro, TOPTICA Photonics)发出中心波长1550 nm,脉冲宽度100 fs,重复频率80 MHz的飞秒脉冲激光,利用反射镜 M_1 和 M_2 将飞秒脉冲激光耦合到光纤耦合器FC中,光纤的另一端连接光纤耦合型光电导天线PCA(THz-P-Rx, TOPTICA Photonics)上,将光纤光电导天线固定到二维光学扫描平台上.时域上重复频率稳定的飞秒脉冲序列在频域中表现为飞秒脉冲频率梳,利用飞秒脉冲序列激发太赫兹天线在频域产生太赫兹频率梳.太赫兹频率梳与被测太赫兹辐射相互作用产生拍频.通过高速数据采集卡NI5122和计算机读取拍频信号.为提高拍频的信噪比,用电流放大器和电压放大器对拍频信号放大.

通过移动二维扫描平台,利用光纤耦合型光电导天线探测不同空间位置太赫兹辐射源与太赫兹频率梳的拍频信号强度,利用计算机读取和记录,实现被测太赫兹辐射功率密度测量.将测量的太赫兹辐射功率密度溯源至标准太赫兹功率计,实现太赫兹空间辐射功率密度绝对测量.

2.3 太赫兹源辐射总功率溯源

被测太赫兹源为高频信号发生器(E8257D, Keysight Technologies)产生16.67 GHz高频信号,经倍频器(E8257DV10-STD, Keysight Technologies)6倍频,产生100 GHz连续太赫兹辐射,经WR10天线输出为空间辐射.太赫兹源辐射总功率的测量装置如图5所示.利用标准太赫兹辐射功率计PM接收太赫兹辐射源的总功率,由电压表读取太赫兹功率计响应电压值,根据标定的响应度得到太赫兹源的辐射总功率.

按图5所示的测量装置示意图对100 GHz辐射源总功率测量,采用矩形波导(LB-10-25-A, A-IN-FO)和圆形波导(SLHA-W, ELVA-1)两种天线将

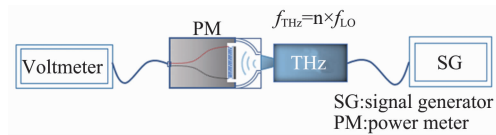


图5 太赫兹辐射源总功率测量装置示意图

Fig. 5 Schematics of the total power measurement setup for terahertz radiant source

100 GHz辐射空间输出.圆形波导输出口处有一高密度聚乙烯透镜,而矩形波导直接将太赫兹辐射空间输出.100 GHz辐射源经矩形WR10天线(LB-10-25-A, A-IN-FO)辐射的总功率为3.75 mW,经圆形WR10天线(SLHA-W, ELVA-1)辐射的总功率为5.27 mW.

3 测量结果

3.1 矩形天线太赫兹辐射功率密度测量结果

基于图3的电光采样和图4的光电导探测方法,对100 GHz辐射源经矩形增益天线辐射的太赫兹功率密度进行测量.测量空间扫描范围为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,水平和垂直方向的扫描步长均为1 mm,测量结果如图6所示.图6中,左侧为电光采样的测量结果,右侧为光电导天线探测的测量结果.由上至下分别为距辐射源波导口20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm距离下的测量结果.

3.2 圆形增益天线太赫兹辐射功率密度测量结果

与矩形天线测量类似,对100 GHz辐射源经圆形增益天线辐射的太赫兹功率密度进行测量.测量空间扫描范围同样为 $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$,水平和垂直方向的扫描步长均为1 mm,测量结果如图7所示.图7中,左侧为利用电光采样的测量结果,右侧为光电导天线探测的测量结果.从上到下测量距离分别为20 mm、40 mm、60 mm、80 mm、100 mm.

4 结果分析与讨论

图6和图7显示了采用电光采样与光电导天线探测两种方法,距离辐射源分别为20 mm、40 mm、60 mm、80 mm和100 mm处矩形波导和圆形波导的太赫兹空间辐射功率密度的测量结果.从图中可见,100 GHz辐射源经WR10天线产生太赫兹空间辐射,在传输距离为20 mm的位置,太赫兹辐射空间分布相对集中,光斑尺寸小,但辐射功率密度分布不均,中心位置存在明显高于周围的突变点,光束剖面不光滑.随着传输距离增加,到40 mm位置光斑尺

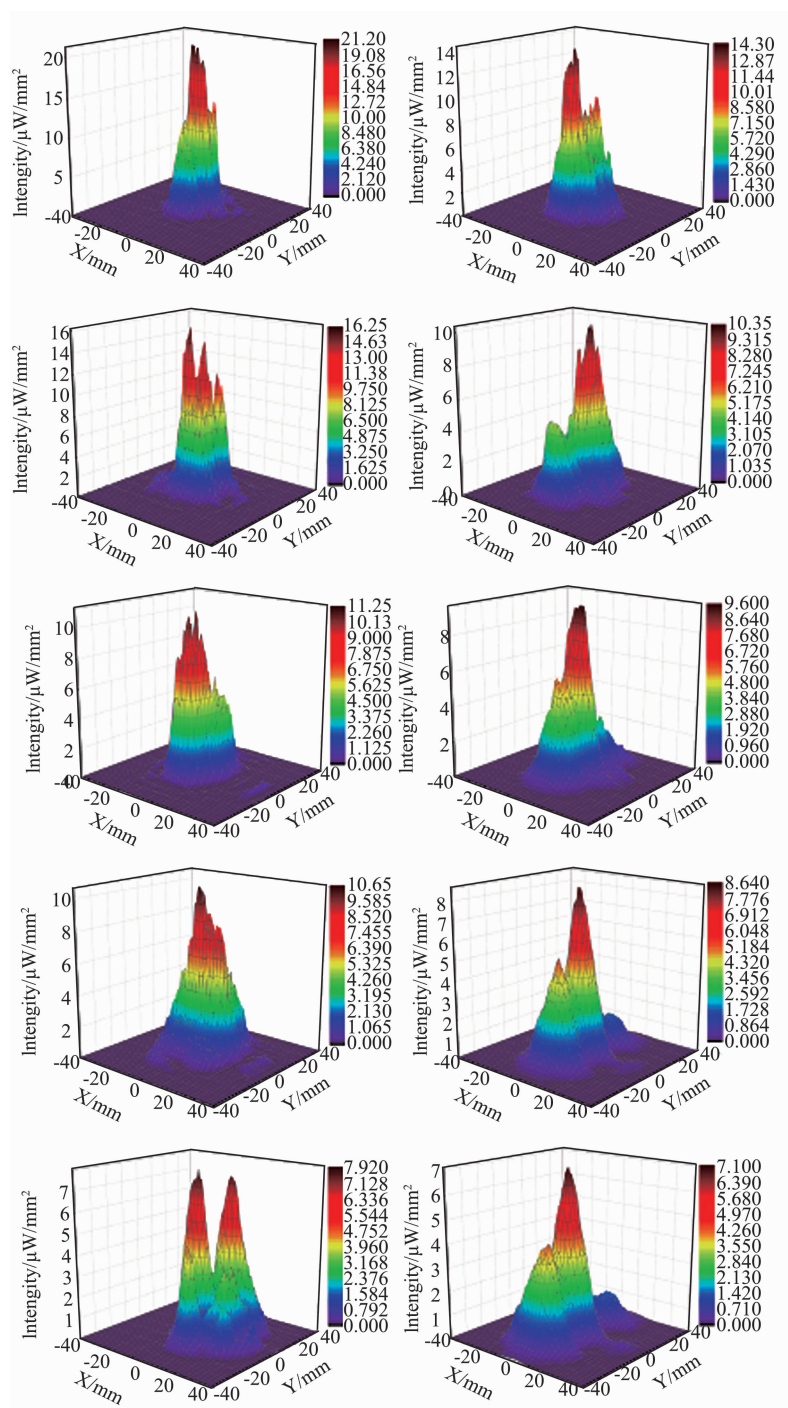


图6 100 GHz 辐射经矩形增益天线的空间辐射功率密度测量结果. 左:电光采样,右:光电导探测;从上到下测量距离依次为 20 mm、40 mm、60 mm、80 mm 和 100 mm

Fig.6 Absolute power density measurement results of the 100 GHz radiation via the rectangular horn antenna. Left: electro-optic sampling, right: photoconductive antenna detection. From top to bottom: measurement distance of 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm and 100 mm, respectively

寸逐渐变大,峰值功率密度比 20 mm 距离明显降低,光束剖面也逐渐光滑,功率密度突变点减少. 另外,当太赫兹辐射传输至 40 mm 距离,产生了一个

辐射旁瓣. 当辐射传输到 60 mm 距离时,光斑尺寸进一步增大,峰值功率密度进一步降低,且辐射旁瓣明显增大. 同时,当辐射传输到 60 mm 时,太赫兹辐

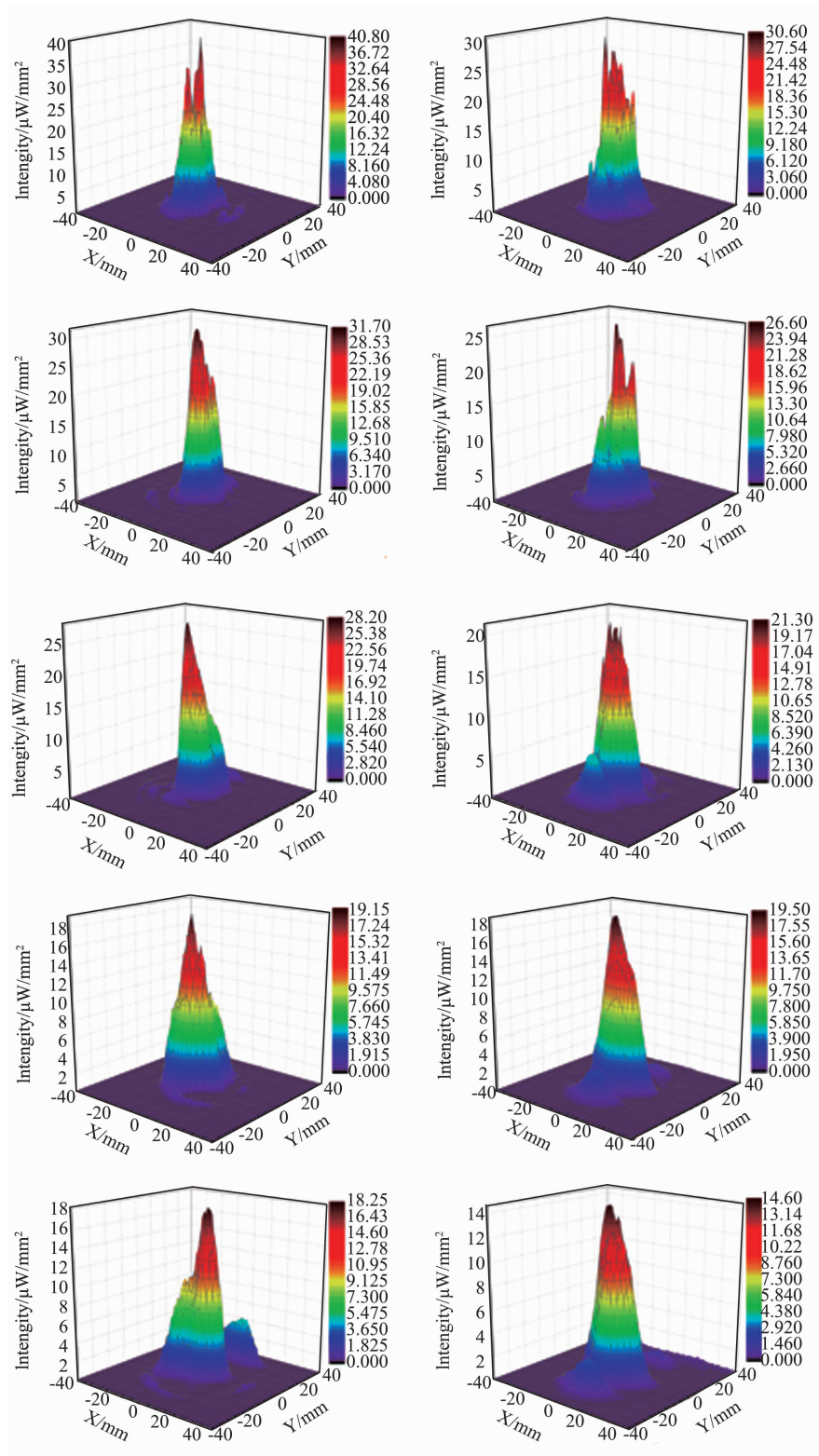


图 7 100 GHz 辐射经圆形增益天线的空间辐射功率密度测量结果. 左:电光采样,右:光电导探测;从上到下测量距离依次为 20 mm,40 mm,60 mm,80 mm 和 100 mm

Fig.7 Absolute power density measurement results of the 100 GHz radiation via the circular horn antenna. Left:electro-optic sampling, right: photoconductive antenna detection. From top to bottom: measurement distance of 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm and 100 mm, respectively

射功率密度包络变得更为光滑,功率密度突变点进一步减少,且突变幅度显著降低.随着传输距离的增加,太赫兹辐射功率密度按上述趋势进一步演变:光束剖面越来越光滑,光斑尺寸越来越大,峰值功率密度越来越低,脉冲旁瓣越来越明显.图6中,当辐射传输到100 mm距离处,脉冲旁瓣明显增大,导致了脉冲分裂,出现了空间多峰结构.不同距离下,电光采样和光电导探测测量的太赫兹辐射峰值功率密度如表1所示.

表1 不同距离下电光采样和光电导探测测量的太赫兹辐射峰值功率密度
Table 1 Measured peak power density at different distance with electro-optic sampling and photoconductive antenna detection

测量距离	矩形波导		圆形波导	
	电光采样/ ($\mu\text{W}/\text{mm}^2$)	光电导探测/ ($\mu\text{W}/\text{mm}^2$)	电光采样/ ($\mu\text{W}/\text{mm}^2$)	光电导探测/ ($\mu\text{W}/\text{mm}^2$)
20 mm	21.20	14.30	40.80	30.60
40 mm	16.25	10.35	31.70	26.60
60 mm	11.25	9.60	28.20	21.20
80 mm	10.65	8.64	19.15	19.50
100 mm	7.92	7.10	18.25	14.60

比较图6和图7的测量结果可知,圆形波导比矩形波导辐射的太赫兹光束更加集中,光束准直性更好.在距离波导20 mm处,圆形波导的光束尺寸明显小于矩形波导,这可能是测量经圆形波导辐射功率大于经矩形波导辐射功率的原因.因为标准太赫兹功率计的接收孔径与波导口径相当,矩形波导辐射功率会有一少部分超越了标准功率计的接收孔径,导致测量的功率变小.在距离波导40 mm~100 mm处的脉冲旁瓣,圆形波导明显小于矩形波导.当辐射传输到距波导100 mm处时,矩形波导的太赫兹辐射出现多峰,甚至空间分裂,但圆形波导的太赫兹辐射仍具有较好的光束集中性.这是因为圆形波导输出口有一聚乙烯透镜,改进了太赫兹光束的准直性.

比较电光采样和光电导探测两种方法可见,电光采样比光电导探测测量的信噪比略差.一方面是因为光电导天线中使用了电流放大器和电压放大器,测量的太赫兹拍频信噪比优于电光采样的信噪比.另一方面,光电导天线前端集成了硅透镜,能够更多的收集太赫兹电场辐射.因此,光电导天线测量的突变和尖峰少于电光采样,光束具有更光滑的包络.但是,正因为光电导天线前端集成了硅透镜,使光电导探测测量的光束直径明显大于电光采样的测

量结果.采用电光晶体测量,太赫兹拍频仅发生在飞秒激光聚焦到ZnTe晶体的微小焦斑处,因此,电光采样可实现高空间分辨率探测.而采用光电导探测方法,透镜汇聚的太赫兹电场均对拍频产生贡献,探测的太赫兹功率密度分辨率变差.在某些测量结果中,电光采样和光电导探测的测量结果不能很好的相互吻合,正是因为这些差异造成的:电光采样具有较高的空间分辨率,但信噪比略差;光电导探测具有高信噪比,但空间分辨率低.这造成了同一辐射源同一测量位置的测量结果产生差异.此外,太赫兹辐射绝对功率密度测量不确定度较大^[16],实现高信噪比、高分辨率太赫兹辐射功率密度测量仍需开展进一步深入研究.

5 结论

本文基于飞秒光学频率梳产生了太赫兹频率梳,利用太赫兹频率梳实现了太赫兹辐射功率密度测量.采用电光采样和光电导探测两种方法,实现了100 GHz辐射的功率密度测量,得到了矩形天线和圆形天线太赫兹辐射功率密度测量结果.本文实验研究了不同距离的太赫兹辐射传输特性,随着太赫兹辐射的传输,光束空间尺寸逐渐增大,峰值功率密度逐渐降低,功率密度突变点逐渐减少,光束剖面逐渐变得光滑.同时,随着传输距离的增加,脉冲旁瓣逐渐增大,可能产生较大的旁瓣,甚至出现多峰结构.对比电光采样和光电导探两种方法,电光采样具有较高的空间分辨率,但信噪比略差;光电导探测具有高信噪比,但空间分辨率降低.本文的研究对增进太赫兹辐射源的认识,促进太赫兹计量发展具有一定意义,也实验揭示了太赫兹辐射传输的空间演化特性.后续将进一步研究高信噪比、高分辨率太赫兹辐射功率密度测量技术,实现太赫兹辐射特性的准确测量.

References

- [1] Siegel P H. Terahertz technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50** (3): 910 - 928.
- [2] Sirtori C. Bridge for the terahertz gap [J]. *Nature News and Views*, 2002, **417**: 132 - 133.
- [3] Ferguson B, Zhang X C. Materials for terahertz science and technology [J]. *Nature Materials*, 2002, **1** (1): 26 - 33.
- [4] Kleine-Ostmann T, Schrader T, Bieler M, et al. THz metrology [J]. *Frequenz*, 2008, **62**: 137 - 148.
- [5] Werner L, Hübers H-W, Meindl P, et al. Towards traceable radiometry in the terahertz region [J]. *Metrologia*, 2009, **46**: S160 - S164.

- [6] 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.
- [7] Deng Y, Sun Q, Yu J, *et al.* Broadband high-absorbance coating for terahertz radiometry [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 5737–5742.
- [8] 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.
- [9] Steiger A, Müller R, Remesal O A, *et al.* Terahertz laser power measurement comparison [J]. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, 2016, **6**(5): 664–669.
- [10] Naftaly M, Dudley R. Linearity calibration of amplitude and power measurements in terahertz systems and detectors [J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(5): 674–676.
- [11] 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): 1357–1392.
- [12] 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.
- [13] Yokoyama S, Nakamura R, Nose M, *et al.* Terahertz spectrum analyzer based on a terahertz frequency comb [J]. *Optics Express*, 2008, **16**(17): 13052–13061.
- [14] Füsler 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**: 121111.
- [15] Füsler H, Bieler M. Frequency, amplitude, and phase measurements of GHz and THz sources using unstabilized THz frequency combs [J]. *Proceedings of SPIE 8624: Terahertz, RF, Millimeter, and Submillimeter-Wave Technology and Applications VI*, (San Francisco, California, United States, March 27, 2013) p 86240T.
- [16] Deng Y, Füsler H, Bieler M. Absolute intensity measurements of CW GHz and THz radiation using electro-optic sampling [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 2015, **64**(6): 1734–1740.
- [17] SUN Qing, YANG Yi, MENG Fei, *et al.* High-precision measurement of terahertz frequency based on frequency comb [J]. *Acta Optica Sinica* (孙青, 杨奕, 孟飞, 等. 基于频率梳的太赫兹频率精密测量方法研究, *光学学报*) 2016, **36**(4): 0412002.
- [18] Jones D, Diddams S, Ranka J, *et al.* Carrier-envelope phase control of femtosecond mode-locked lasers and direct optical frequency synthesis [J]. *Science*, 2000, **288**(5466): 635–639.
- [19] Füsler H, Bieler M. Terahertz frequency combs: Theoretical aspects and applications [J]. *J Infrared Milli Terahz Waves*, 2014, **35**: 585–609.
- [20] Deng Y, Li J, Sun Q. Traceable measurement of CW and pulse terahertz power with terahertz radiometer [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2017, **23**(4): 3800306.
- [21] DENG Yu-Qiang, SUN Qing, YU Jing, *et al.* Progress of terahertz radiometry and international comparison [J]. *Chinese Journal of Lasers* (邓玉强, 孙青, 于靖, 等. 太赫兹辐射功率计量研究进展与国际比对, *中国激光*) 2017, **44**(3): 0314001.