

干涉法测量连续太赫兹波频谱

卢铁林¹ 袁慧¹ 吴同² 张存林² 赵跃进¹¹北京理工大学光电学院,北京市精密光电测试仪器及技术重点实验室,北京 100081²首都师范大学物理系,太赫兹光电子学教育部重点实验室,北京 100048

摘要 描述了一种基于惠特曼干涉理论,采用步进扫描方式工作的连续太赫兹波频谱测量方法。对所提出的连续太赫兹波频谱测量方法进行了理论分析,并用计算机对频谱及能量密度分布进行实时采集。根据该方法搭建测量光路采集太赫兹波频谱及能量密度数据。将实验数据与理论计算数据进行比较,得到了良好的一致性结果。采用镀银反射镜、热释电探测器与斩波器构建测量光路,对干涉强度进行单点探测,利用扫描步进方式获得了频率为210 GHz连续式太赫兹波源返波振荡器(BWO)及400 GHz耿氏振荡器的频谱和能量密度分布,测量精度为1 GHz。结果表明,采用此干涉方法可以准确测量连续式太赫兹波源的频谱及能量密度分布,为今后实现太赫兹波段成像等领域的应用提供了有力的支持。

关键词 测量;干涉;太赫兹;频谱;能量密度分布

中图分类号 O436.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041202

Continuous Terahertz Spectrum Measurement Based on Interferometry

Lu Tielin¹ Yuan hui¹ Wu Tong² Zhang Cunlin² Zhao Yuejin¹¹Beijing Key Laboratory for Precision Optoelectronic Measurement Instrument and Technology, School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China²Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education of China, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

Abstract A method of measuring continuous terahertz frequency spectrum is provided based on Whitman interference theory effect and step-scanned working mode. The continuous terahertz spectrum measurement is calculated theoretically, and the spectrum and the energy density are taken by the computer. The measuring optical structure is set up to obtain the data of terahertz frequency-spectrum and energy density distribution. The measuring data accord well with that of theoretical analysis. The silvering reflect mirror, pyroelectric detector and chopper are used to build the measuring optical path to detect the interference intensity of one point. Frequency spectrum and energy density distribution of 210 GHz continuous terahertz backward-wave oscillator (BWO) and 400 GHz Gunn oscillator are obtained by step-scanned working mode. The accuracy of this measurement is 1 GHz. These results show that, using this method the frequency spectrum and energy density distribution of continuous terahertz wave source can be measured accurately. It provides a strong support for terahertz wave imaging research.

Key words measurement; interference; terahertz; spectrum; energy density distribution

OCIS codes 120.3180; 040.2235; 070.4790

1 引言

太赫兹波(THz)是指频率在0.1~10 THz范围内的电磁波辐射^[1],介于红外线与毫米波之间。由于太赫兹波段携带大量独特的生物学和信息学特征,因此,在空间传输、雷达通信、无损检测与隐蔽物成像^[2-4]等方面

收稿日期:2015-10-08;收到修改稿日期:2015-11-03;网络出版日期:2016-03-17

基金项目:国家自然科学基金(61377109)

作者简介:卢铁林(1987—),男,博士研究生,主要从事太赫兹光谱与成像技术方面的研究。E-mail: lutielin@126.com

导师简介:赵跃进(1958—),男,博士,教授,主要从事太赫兹光谱与成像技术和光电仪器设计方面的研究。

E-mail: yjzhao@bit.edu.cn

具有广阔的发展空间。近年来,太赫兹波成像技术广泛应用于航空绝缘材料、文物层析成像、违禁品检测、包装检测^[5-7]等方面,这些前沿应用也使太赫兹波技术得到了飞速发展。

在实际应用中,为了获得更清晰的图像,就需要提高空间分辨率。影响太赫兹成像质量主要有两方面因素:1) 成像装置中产生连续太赫兹波电子返波管存在的固有系统噪声会干扰成像的质量;2) 环境温度、空气扰动以及电磁噪声的影响会导致太赫兹波频率的不稳定。

为了精确测量太赫兹频谱和能量密度分布,本文利用惠特曼干涉法对连续式太赫兹波进行测量。该装置采用时间调制的方式,使每次采样都包含了所有太赫兹波的光谱成分信息,极大地提高了信噪比和测试精度。相比传统的色散干涉法,本文提出的方法优势在于光路简单,并且不必使用光栅分光元件就能够得到能量较弱的连续太赫兹波的频谱与能量密度分布曲线。

2 基本原理

2.1 时间调制测量频谱

实验采用惠特曼双臂干涉装置^[8-9],如图1所示,采集干涉条纹的强度分布信息。其中S为待测的太赫兹波源,反射镜M1固定不动,M2固定在精密一维平移台上,通过移动M2改变相干光的光程差 Δ 。在焦点位置放置光电探测器,将干涉信号转变为电信号传入计算机进行处理。

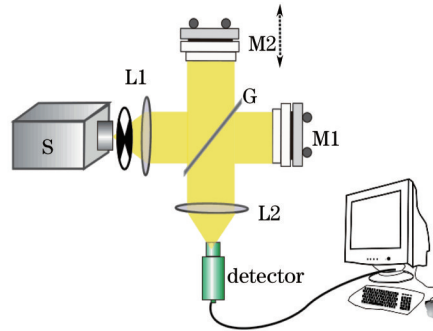


图1 干涉原理的实验装置

Fig.1 Experimental devices of Interference principle

图1所示装置,假设反射镜M1、M2反射的太赫兹波经硅片透射后会聚到探测器上的光强为 I_1 、 I_2 ,则探测器所探测到的干涉强度为:

$$I(\Delta) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(2\pi\Delta/\lambda), \quad (1)$$

式中 Δ 为两束相干光的光程差,当M1、M2两臂光路差为 d 时,对应光程差为 $\Delta = 2d$,故干涉强度随反射镜M2移动量 Δd 变化公式为:

$$I(\Delta d) = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos(4\pi\Delta d/\lambda). \quad (2)$$

对其交流量做傅里叶变换可以得到发射源的频谱分布:

$$F(\nu) = \int_0^\infty I(\Delta) \exp(-2\pi j \frac{\nu}{c} \Delta d) d\Delta d. \quad (3)$$

2.2 时间调制测量能量密度分布

设太赫兹波源S的光谱辐射能量密度为 $S'(\nu)$,当发生干涉的两光束的光强相同时,干涉强度为:

$$I(\Delta) = K' \int_0^\infty S'(\nu) \left[1 + \cos\left(2\pi \frac{\nu}{c} \Delta\right) \right] d\nu, \quad (4)$$

式中 K' 为常数,空气折射率为1,该式并未考虑高阻硅片引入的附加相位差 $\Delta\phi_0$ 。当两束相干光的光路差为 d 时,光程差为 $\Delta = 2d$ 。移动反射镜M2,光强与光程差成余弦规律变化,可以得到光强的极大值为:

$$I(0) = 2K' \int_0^\infty S'(\nu) d\nu. \quad (5)$$

定义:

$$G(\Delta) = I(\Delta) - \frac{1}{2}I(0) = K' \int_0^\infty S'(\nu) \cos(2\pi \frac{\nu}{c} \Delta) d\nu, \quad (6)$$

对 $G(\Delta)$ 作傅里叶逆变换可以得到 $S'(\nu)$:

$$S'(v) = \frac{1}{K'} \int_0^{\infty} G(\Delta) \exp\left(2\pi j \frac{v}{c} \Delta\right) d\Delta. \quad (7)$$

从(4)式可以得出,采样分辨率与最大光程差成正比^[10-11]。采用该方法进行测量,每次采样都包含了所有的光谱成分信息,并且在扫描的过程中可以控制进入系统的辐射功率基本维持不变,因此采用此方法进行测量,具有较高的信噪比及采样精度。通过对干涉图样进行分析,可以精确获取较弱的太赫兹波源的频谱与能量密度分布数据。

3 实验结果

3.1 太赫兹频谱的测量

搭建的实验装置如图2所示。以返波振荡器(BWO)的输出为太赫兹波源,斩波器的斩波频率为10 Hz,通过高阻硅片分束后照射到两个镀银平面反射镜上,两束光经过反射后通过透镜在焦点处形成干涉,利用一维平移台移动其中一个反射镜,实现干涉强度的明暗变化,通过热释电探测器将光信号转换为电信号,与斩波频率一同输入到锁相放大器,将锁相放大器的输出信号传入到计算机进行处理,通过计算机数据处理实现对频谱的测量,得到太赫兹辐射的频谱及能量密度分布曲线。

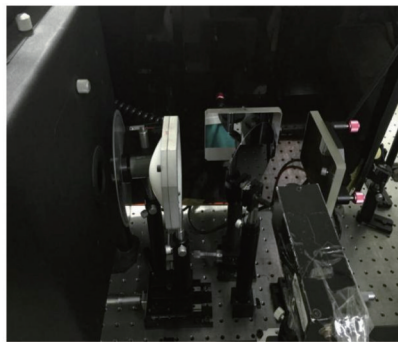


图2 干涉法测量太赫兹频谱实验装置

Fig.2 Experimental devices of interferometry measurement terahertz spectrum

实验采集的干涉强度随时间变化如图3所示,其中图3(a)为扫描长度为25 mm时得到的实验结果,图3(b)为扫描长度为152 mm时得到的测量结果。图中蓝色实线为实际测得的干涉强度随时间的变化,红色虚线为对采集数据处理后得到的测量频率所对应的理论干涉强度随时间的变化曲线。对实际测得的干涉强度变化进行傅里叶变换可以得到其频谱如图4所示,其中图4(a)为扫描长度为25 mm时得到的频谱分布,图

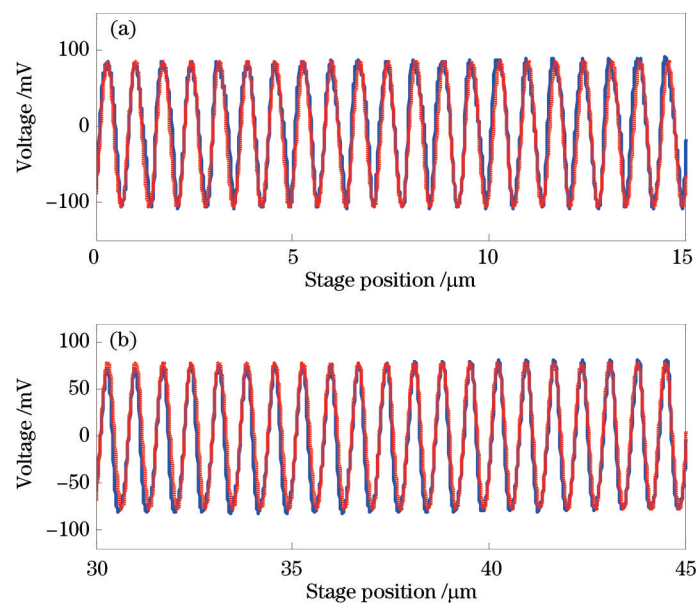


图3 BWO干涉强度分布。(a)扫描长度为25 mm;(b)扫描长度为152 mm

Fig.3 Distribution of the BWO interferometer intensity. (a) Scan length of 25 mm; (b) scan length of 152 mm

4(b)为扫描长度为 152 mm 时得到的频谱分布。由图 3 可以看出实际测量结果与测得频率所对应的理论值十分吻合,测量结果充分证明了该方案的可靠性。

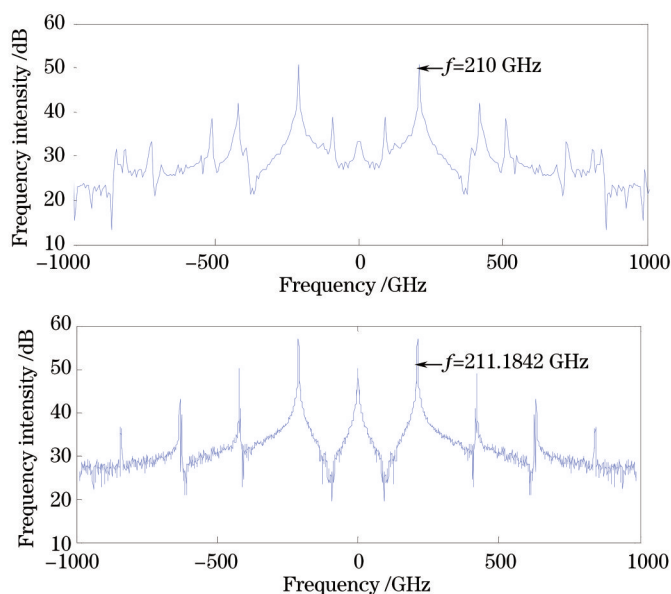


图 4 BWO 频率分布。(a) 扫描长度为 25 mm; (b) 扫描长度为 152 mm

Fig.4 Distribution of frequency for BWO scan length. (a) Scan length of 25 mm; (b) scan length of 152 mm

3.2 连续式太赫兹波能量密度曲线

实验测量得到的能量密度曲线如图 5 所示。图中黑色曲线为理论值,红色曲线为实际测量所获得的结果,该曲线在扫描长度为 152 mm、扫描精度为 0.002 mm 的条件下获得。

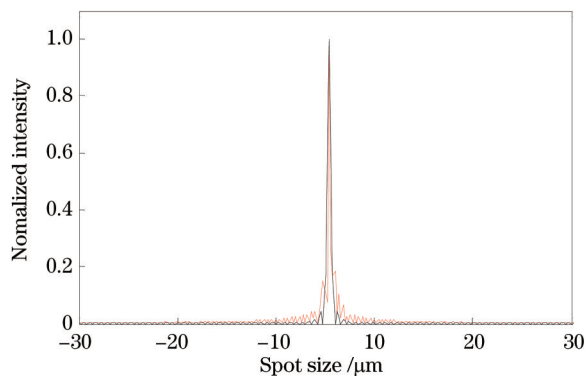


图 5 BWO 能量密度分布曲线

Fig.5 Distribution of BWO energy density

受扫描长度限制光源能量密度曲线理论值应为 sinc^2 函数,如图 5 中黑色曲线所示,由于实验环境及实验装置误差的存在,实验测得的曲线噪声较大,但总体趋势与理论分布基本一致,该结果表明所采用的试验方法可有效获得光源能量密度分布。

3.3 耿氏振荡器测量结果

为验证提出的测量方法,又对连续太赫兹耿氏振荡源进行了测量,图 6 为耿氏振荡源在扫描长度为 152 mm 时的干涉强度分布曲线,其中蓝实线为实际测得的干涉强度随时间的变化曲线,红色虚线为对采集数据处理后得到的测量频率所对应的理论干涉强度随时间的变化曲线。图中实测结果与理论值基本重合。

图 7 为耿氏源所测得的干涉数据作傅里叶变换后得到的频谱曲线,该曲线显示该太赫兹源的频率测试结果为 389.8026 GHz,与该耿氏源所对应的理论频率相吻合。

图 8 为耿氏源能量密度曲线。图中黑色曲线为理论值,红色曲线为实际测量所获得的结果,该曲线在扫描长度为 152 mm、扫描精度为 0.002 mm 的条件下获得。图中实验测量曲线与理论值基本吻合。

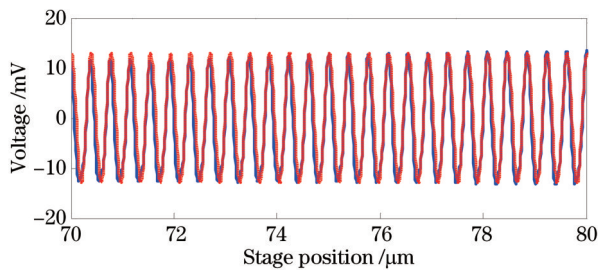


图6 耿氏源干涉强度分布

Fig.6 Distribution of interferometer intensity for Gunn oscillator

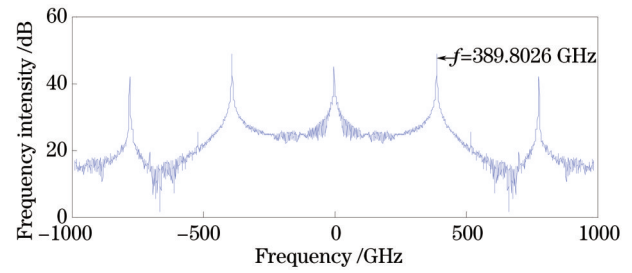


图7 耿氏源频率分布

Fig.7 Distribution of frequency for Gunn oscillator

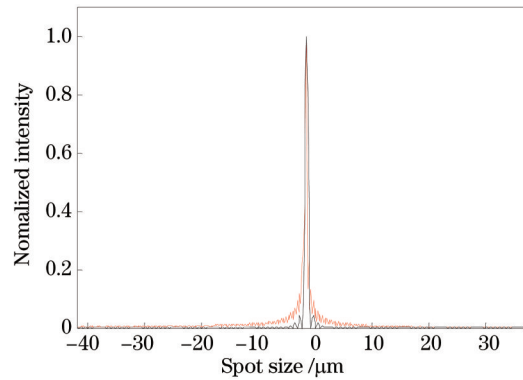


图8 耿氏源能量密度分布曲线

Fig.8 Distribution of energy density for Gunn oscillator

4 分析与讨论

对返波振荡器及耿氏振荡器的频率测量结果如表1所示。由2.2节分析可得频率扫描过程中的最小分辨率与扫描长度成正比,当扫描长度为25 mm时其理论分辨率为6 GHz,其测量结果在该分辨率下返波振荡器的测量频率恰好为210 GHz,与标称值相吻合。当扫描长度为152 mm时,其理论分辨率为0.9868 GHz,在该分辨率下所得到返波振荡器的测量结果为211.1842 GHz,与标称值210 GHz相差1.1842 GHz。耿氏振荡器的测量结果为389.8026 GHz,与标称值390 GHz相差0.1974 GHz。造成该误差的原因主要有两点:1) 平移台扫描长度有限因而精度达不到要求;2) 实验室的温度与其标称值所对应的温度并不完全一致。该误差所对应的相对误差最大为0.6%,表明该方法所得到的测量结果与理论值有很好的 consistency。

表1 频率测量结果

Table 1 Results of the measured frequency

Nominal output frequency /GHz	Measurements /GHz	Absolute error	Theoretical resolution /GHz
210	210	0	6
210	211.1842	1.1842	0.9868
390	389.8026	0.1974	0.9868

5 结论

采用惠特曼双臂干涉原理对连续太赫兹波源进行时域频谱及能量密度分布测量,测得了连续式太赫兹波源返波振荡器(BWO)及耿氏振荡器在标称频率处的实际输出频率,最高精度处测得BWO输出频率值为211.1842 GHz与其标称值210 GHz相吻合,耿氏振荡器输出频率值为389.8026 GHz与其标称值390 GHz相吻合,并得到了测量频率处的光源能量密度分布,测试结果进一步验证了实验结果的可靠性。实验误差主要来源于环境噪声等对于测量太赫兹波能量密度的影响。在实际应用中,还应尽量避免温度以及震动的波动对于太赫兹频谱测量的干扰。

参考文献

- 1 C Fattinger, D Grischkowsky. Terahertz beams[J]. Appl Phys Lett, 1989, 54(6): 490-492.
- 2 Zhang Cunlin, Zhang Yan, Zhao Guozhong, *et al.*. Terahertz detection and imaging[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008: 64-69.
张存林, 张岩, 赵国忠, 等. 太赫兹感测与成像[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 64-69.
- 3 N Karpowicz, H Zhong, C Zhang, *et al.*. Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(5): 054105.
- 4 B B Hu, M C Nuss. Imaging with terahertz wave[J]. Opt Lett, 1995, 20(16): 1716-1718.
- 5 D M Mittleman, S Hunsche, L Boivin, *et al.*. T-ray tomography[J]. Opt Lett, 1995, 22(12): 904-906.
- 6 Sun Mengdie, Tan Shaoyang, Guo Fei, *et al.*. Photonic integrated circuit for generation of terahertz pumping source by difference-frequency generation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(9): 091302.
孙梦蝶, 谭少阳, 郭菲, 等. 差频法产生太赫兹抽运源的光子集成芯片[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(9): 091302.
- 7 T Lu, Y Hui, J Zhang, *et al.*. Phase detection for continuous Terahertz wave[C]. SPIE, 2015, 9625: 962506.
- 8 Xie Jinghui, Zhao Dazun, Yan Jixiang. Physical optics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 125-127.
谢敬辉, 赵达尊, 阎吉祥. 物理光学教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005: 125-127.
- 9 M Kujawinska, D W Robinson. Multichannel phase-stepped holographic interferometry[J]. Appl Opt, 1988, 27(2): 312-320.
- 10 Yuntao He, Haiping Huang, Yuesong Jiang, *et al.*. Optical phase control for MMW sparse aperture upconversion imaging[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(5): 051101.
- 11 Zhu Wenhua, Chen Lei, Li Jinpeng, *et al.*. Analysis of diffraction intensity and wavefront error in point diffraction interferometer[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(6): 061201.
朱文华, 陈磊, 李金鹏, 等. 点衍射干涉仪中针孔衍射光强与波面误差分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(6): 061201.

栏目编辑: 何卓铭