

文章编号: 1672-8785(2018)08-0024-04

# 太赫兹返波管频率稳定性的检测方法研究

舒天娇<sup>1,2</sup> 游冠军<sup>1,2</sup> 朱亦鸣<sup>1,2</sup> 郭旭光<sup>1,2\*</sup>

(1. 上海理工大学上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;

2. 上海理工大学太赫兹技术创新研究院, 上海 200093)

**摘 要:** 提出了一种返波管频率稳定性快速检测方法。利用一个抛物面镜对返波管辐射信号进行收集和准直, 然后将探测器放置在准直平行光束的后方进行检测, 并使所测信号经示波器显示和读出。根据法布里-珀罗干涉原理估测返波管的单频频率输出稳定性。本文方法对于提高基于返波管的频域高分辨率太赫兹波谱系统的性能具有重要的应用价值。

**关键词:** 返波管; 频率稳定性; 法布里-珀罗干涉

**中图分类号:** TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2018.08.005

## Study of Measurement Method of Frequency Stability of Back Wave Oscillator

SHU Tian-jiao<sup>1,2</sup>, YOU Guan-jun<sup>1,2</sup>, ZHU Yi-ming<sup>1,2</sup>, GUO Xu-guang<sup>1,2\*</sup>

(1. Shanghai Key Laboratory of Modern Optical System, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Terahertz Institute of Technology Innovation, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** A fast method for detecting the frequency stability of Back Wave Oscillators (BWOs) is proposed. The radiation from a BWO is collected and collimated by a parabolic mirror and is detected by a fast terahertz detector at the other end of the collimated light beam. The measured signal is displayed and recorded via an oscilloscope. Finally, the single-frequency output stability of the BWO is estimated according to the Fabry-Perot interference principle. The method proposed is of important application value to the performance improvement of frequency-domain terahertz spectroscopy systems with high frequency resolution.

**Key words:** back wave oscillator; frequency stability; Fabry-Perot interference

## 0 引言

太赫兹波是指频率在 0.1~10 THz 之间的电磁波。在电磁波谱中, 它位于微波与红外光

之间。由于处在特殊的电磁波段, 太赫兹波具有许多独特而优越的性质。早在 20 世纪 20 年代, 人们就对太赫兹辐射产生了浓厚兴趣, 但

收稿日期: 2018-04-17

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFF0200306; 2017YFF0106304); 国家自然科学基金重点项目(61731020); 上海市科学与技术委员会项目(15DZ0500100)

作者简介: 舒天娇(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事太赫兹频率测量等方面的研究。

\*通讯作者: E-mail: xgguo\_sh@qq.com

由于当时缺乏稳定可靠的太赫兹源和检测技术, 人们对于该波段电磁辐射特性知之甚少<sup>[1]</sup>。随着太赫兹辐射光源及探测技术的不断发展和创新, 太赫兹技术突飞猛进, 已经在材料检测、安全检查、信息技术、生物医学、产品质量检查、环境监测、空间通信以及天文学等领域得到了应用<sup>[2-4]</sup>。

太赫兹技术的应用离不开太赫兹辐射源和太赫兹探测技术的发展<sup>[5]</sup>, 其中对太赫兹辐射源的研究占据了十分重要的位置。目前, 国内外的太赫兹辐射源开发研究主要集中在激光光学技术、真空电子技术以及超快激光技术等方面。其中, 太赫兹返波管是真空电子技术的典型代表<sup>[6]</sup>。返波管最早是用于产生毫米波的真空电子管器件, 随后其工作频率逐渐拓展到太赫兹波段, 形成太赫兹返波管。随着太赫兹技术在各领域的实用性发展, 研制紧凑高效的太赫兹辐射源已成为必然趋势。返波管颇具希望成为小型太赫兹源, 而且目前只有返波管振荡器在 0.1 THz 以上的太赫兹源具有宽带调谐和高功率输出能力<sup>[7-8]</sup>。返波管振荡器主要由电子枪、慢波结构和收集极等组成。太赫兹返波管产生太赫兹波的原理如下: 电子枪(阴极)在加热条件下产生高速电子束; 电子在高压电场下快速向收集极(阳极)移动, 且在移动过程中会经过一个周期分布的电势场减速系统; 高速电子在电势场的作用下减速, 其自身的动能会转换成太赫兹能量辐射出来, 从而产生太赫兹波<sup>[9]</sup>。返波管可通过改变其加速电压来调谐输出工作频率。

太赫兹返波管是公认最稳定的可调谐宽频的连续太赫兹源, 然而当返波管作为太赫兹成像系统<sup>[10]</sup>或者频谱检测用频率振荡器<sup>[11]</sup>时, 为了获得可靠稳定的信号图谱, 要求太赫兹源具有较高的频率稳定性。目前尚未有简便的返波管不稳定性测量方法, 即使有少数太赫兹探测器能观察到太赫兹源不稳定的现象, 但仍没有方法来标定其不稳定性。太赫兹波毗邻微波波段, 其波长较长,

不论是在成像系统中还是在物质检测系统中, 极易发生干涉现象, 进而影响系统精度。本文通过理论分析将观察到的干涉现象归咎为频率振荡的结果, 并结合法布里-珀罗干涉原理以及一款响应速度足够快的探测器对其不稳定性进行分析。

## 1 实验原理

图 1 为法布里-珀罗多光束干涉的原理图。法布里-珀罗多光束干涉仪是一种由两块平行的玻璃板组成的多光束干涉仪, 其中两块玻璃板相对的内表面都具有高反射率。

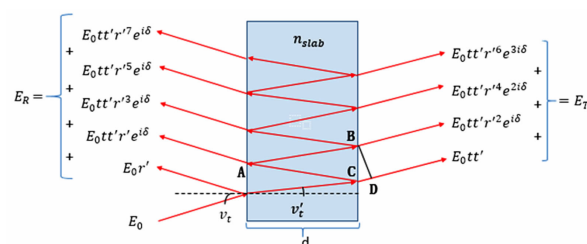


图 1 法布里-珀罗干涉的原理图

根据法布里-珀罗干涉原理<sup>[12]</sup>, 可得到透射光强度:

$$E_T = U_T U_T^* = E_0 t' \frac{1}{1 - r'^2 e^{i\delta}} \times t' \frac{1}{1 - r'^2 e^{-i\delta}} = \frac{(E_0 t')^2}{(1 - r'^2)^2 + r'^2 \sin^2(\delta/2)} \quad (1)$$

式中,  $U_T$  为透射振幅;  $U_T^*$  为共轭透射振幅;  $E_0$  为电矢量振幅;  $t$  为光波从周围媒介到平板的透射系数, 即透射波振幅与入射振幅之比;  $t'$  为光波从平板到周围媒介的透射系数;  $e^{i\delta}$  为经过平板一个往返的积累相位;  $e^{-i\delta}$  为积累相位的共轭数;  $I_0$  为入射光的强度;  $\delta = 4\pi n d \cos v_t / \lambda$  为相邻光束的总相位差, 其中  $n$  为平板之间的折射率,  $d$  为平板之间的光路长度,  $v_t$  为光入射角度,  $\lambda$  为光束波长。

根据 Stokes 定律可知,  $tt' = 1 - r'^2 = 1 - R$ , 其中令  $F = 4R/(1 - R)^2$  (精巧系数), 由式 (1) 简化得到:

$$E_T = \frac{I_0}{1 + F \sin^2(\delta/2)} \quad (2)$$

根据式(2)有  $E_{Tmax} = I_0$ ,  $E_{Tmin} = I_0 / (1 + F)$ 。若已知光的最大透射强度与最小透射强度, 即可得到  $F$  值。

## 2 实验装置

图 2 为测量装置图。由于返波管发出的光束不可见, 在搭建光路系统时, 在返波管出口处贴一块漫反射片; 将激光投射到漫反射片上形成散射光束, 以模拟点光源, 从而对光路进行辅助校准。返波管发射的太赫兹高斯光束经抛物面镜变为平行光束。将探测器放置在抛物面镜的后方, 然后将探测器的信号输出端连接到示波器上, 并将示波器调至可清晰观察到信号。其中, 本文使用一款基于 GaN/AlGaN 蝶形天线增强的高电子迁移率场效应管太赫兹探测器, 其响应时间小于 3 ns, 并且具有灵敏度高、等效噪声功率低等优点<sup>[13]</sup>。由于响应速度快, 该探测器可以探测到太赫兹源输出的快速变化。这是市面上很多基于热释电/焦热电效应的太赫兹探测器无法做到的, 譬如高莱管探测器和基于钽酸锂晶体的探测器等。采用一款响应速度足够快的探测器对于实现本文方法来说不可缺少。在本实验中, 太赫兹源表面与探测器表面等效成一对平行平板, 这样光束就在两个平面之间多次反射。随着光路长度  $L$  的变化, 干涉位置发生改变, 因而在调节探测器前后位置时会产生入射光强变化, 且透射光的强度与相位差( $\delta$ )有关。如果光路长度与光入射角度保持不变且  $\lambda$  不断变化, 那么透射光强度就会随  $\lambda$  发生有规律的变化。

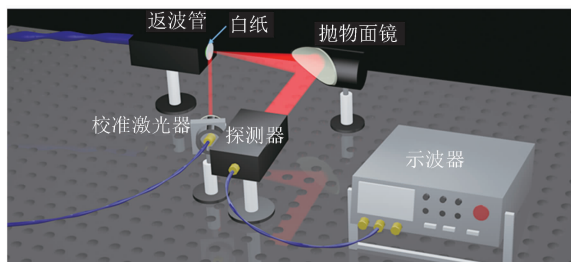


图 2 测量装置图

为了提高测量的准确度, 我们朝一个方向移动探测器, 并记录  $N$  组信号的最强值和最弱值,

这样便可得到最强平均值  $\bar{E}_{Tmax}$  和最弱平均值  $\bar{E}_{Tmin}$ 。与此同时, 记录探测器的初始位置和最终位置, 即可得到最大光路长度  $L_{max}$  和最小光路长度  $L_{min}$ 。已知探测器硅透镜表面的反射系数为  $r_1$ , 将其代入式(2)便可得到源表面系数  $r_2$ 。

## 3 实验方法与结论

图 3 为信号最强与最弱位置的示波器显示图。由于实验中被测返波管发射窗口的反射系数未知, 故可利用式(2)所述原理进行求解。本实验记录了没有太赫兹信号时探测器与示波器的背景噪声以及移动探测器过程中 10 组信号的最大强度值与最小强度值。将其数据取平均后画出波形, 通过利用图形中的最大和最小强度值去除系统噪声来得到源表面的反射系数。假设太赫兹源的反射系数为  $r_1$ , 探测器的反射系数为  $r_2$ , 则  $F = 4r_1r_2 / (1 - r_1r_2)^2$ 。图 3 中, 由下至上分别为无源信号波形、有源信号强度最小处、有源信号强度最大处, 相应的值分别为 10 mV、30 mV、133 mV。故  $\bar{E}_{Tmax} = 123$  mV,  $E_{Tmin} = 20$  mV,  $E_{Tmax} / E_{Tmin} = 1 + F = 6.15$ 。已知硅透镜的反射系数  $r_2 = 0.54$ , 将其代入  $F = 4r_1r_2 / (1 - r_1r_2)^2$ , 即可求得  $r_1 \approx 0.78$ 。

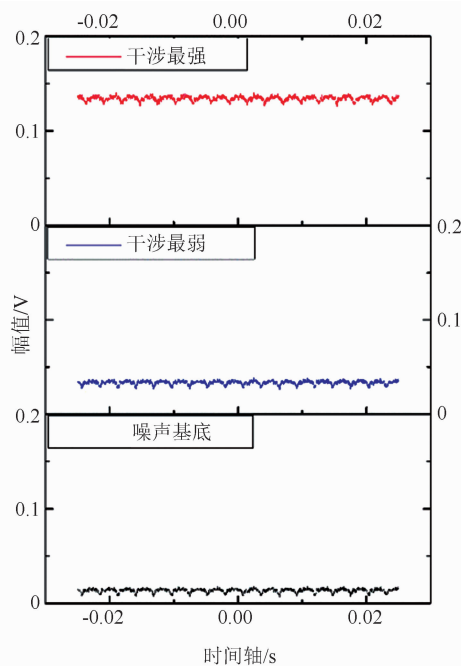


图 3 信号最强与最弱位置的示波器显示图

根据法布里-珀罗干涉原理建立仿真模型, 对所述透射光强度函数的相关参数(如光路折射率  $n$ 、波长  $\lambda$ 、波长变化百分数  $\delta\lambda/\lambda$ 、最小光路长度  $L_{min}$ 、最大光路长度  $L_{max}$ 、探测器硅透镜的反射率  $r_1$ 、返波管发光面的反射率  $r_2$  进行设定, 从而得到所述仿真模型的输出频率在规定范围内变化的与时间相关的波形图。

图 4 为仿真结果与最强/最弱位置图的拟合图。对测得数据进行拟合。光路折射率为 1, 以频率为单位的波长为 120 GHz, 光路最大长度为 585 mm, 光路最小长度为 572 mm, 硅透镜的振幅反射率设为 0.54, 由此求得返波管发射面的振幅反射率为 0.78; 离轴抛物镜的反射率设为 1。由拟合结果可得到频率的不稳定性  $\delta\lambda/\lambda=9\times 10^{-4}$ , 与返波管说明书中给出的相关参数一致。

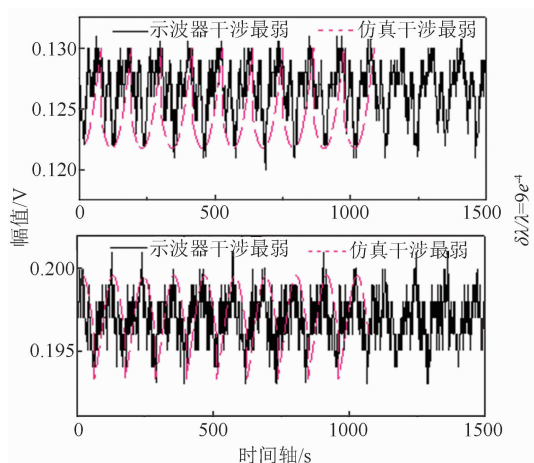


图 4 仿真结果与最强/最弱位置图的拟合图

#### 4 结束语

本文提出了一种用于快速检测返波管太赫兹输出频率不稳定性的方法, 其系统构建简便且廉价。利用法布里-珀罗多光束干涉对其进行理论分析和数值拟合, 即可估测返波管源的频率不稳定性。国外很多机构都已开展了频率测量工作, 然而这些方法均需要昂贵的设备, 并且都是基于被测量源的稳定性, 却未见对源的稳定度进行测量的相关报道。而许多频率测

量方法又要求被测量源较为稳定。因此, 本文方法可为频率稳定性测量的可行性提供理论依据。

#### 参考文献

- [1] Siegel P H. Terahertz Technology [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2002, **50**(3): 910-928.
- [2] Tonouchi M. Cutting-edge Terahertz Technology [J]. *Nature Photonics*, 2007, **1**(2): 97-105.
- [3] Ferguson B, Zhang X C. Materials for Terahertz Science and Technology [J]. *Nature Materials*, 2002, **1**(1): 26-33.
- [4] Pickwell E, Wallace V P. Biomedical Applications of Terahertz Technology [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, **39**(17): R301.
- [5] 李珏岐. THz 返波管的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [6] 谷智, 陈沅, 李焕勇, 等. 太赫兹辐射源的研究进展 [J]. *红外技术*, 2011, **33**(5): 252-256.
- [7] 袁宏阳, 葛新浩, 焦月英, 等. 基于 BWO 连续太赫兹波成像系统的无损检测 [J]. *应用光学*, 2008, **29**(6): 912-916.
- [8] 徐小燕. 连续太赫兹波成像技术的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.
- [9] Johnson H R. Backward-wave Oscillators [J]. *Proceedings of the IRE*, 1955, **43**(6): 684-697.
- [10] Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima Y N, et al. Terahertz Imaging System Based on a Backward-wave Oscillator [J]. *Applied Optics*, 2004, **43**(30): 5637-5646.
- [11] Gorshunov B, Volkov A, Spektor I, et al. Terahertz BWO-spectroscopy [J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2005, **26**(9): 1217-1240.
- [12] 马科斯·玻恩, 埃米尔·沃尔夫著. 杨葭荪译. *光学原理(第七版)* [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- [13] Sun J. Field-effect Self-mixing Terahertz Detectors [M]. Berlin: Springer, 2016.