2015 年 12 月 Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

#### 文章编号: 2095-4980(2015)06-0859-05

# 0.34 THz 相对论返波振荡器实验

胡林林<sup>a,b</sup>,陈洪斌<sup>a,b</sup>,宋 睿<sup>a,b</sup>,郭焱华<sup>a,b</sup>

(中国工程物理研究院 a.应用电子研究所; b.微系统与太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621999)

摘 要:利用相对论返波管(RBWO)产生纳秒脉宽、千瓦量级功率的太赫兹脉冲辐射对太赫兹 技术的应用具有积极意义。本文对 0.34 THz-RBWO 进行了粒子模拟与设计,通过微精密加工得到 了平均直径 6.8 mm,波纹深度 0.1 mm,周期 0.26 mm 的正弦周期慢波结构,并对 0.34 THz-RBWO 进行了初步的实验。文中对 0.34 THz 脉冲信号脉宽、频率、功率参数的测量原理进行了研究。通 过初步实验测试,0.34 THz-RBWO 辐射波脉冲宽度 2.1 ns,频率范围 0.32 THz~0.36 THz,功率为 375 kW。

关键词: 太赫兹; 慢波结构; 返波管
 中图分类号:TN752
 文献标识码:A

doi:10.11805/TKYDA201506.0859

## Experimental study of 0.34 THz Relativistic Backward-Wave Oscillator

HU Linlin<sup>a,b</sup>, CHEN Hongbin<sup>a,b</sup>, SONG rui<sup>a,b</sup>, GUO Yanhua<sup>a,b</sup>

(a.Institute of Applied Electronics; b.Terahertz and Microsystems Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

**Abstract:** Terahertz pulse radiation with nanosecond width and kilowatt level power generated by Relativistic Backward-Wave Oscillator(RBWO) has positive significance in terahertz technology applications. The particle simulation and design of a 0.34 THz-RBWO is presented. The sinusoidal period slow wave structure with an average diameter of 6.8 mm, a corrugation depth of 0.1 mm, a period of 0.26 mm is manufactured by fine fabrication processes, and the preliminary experiment of the 0.34 THz-RBWO is performed. The principles of measurement on signal width, frequency, power of 0.34 THz pulse are studied. The 0.34 THz-RBWO pulse radiation with a pulse width of 2.1 ns, a frequency range of 0.32 THz-0.36 THz, and a power of 375 kW is measured through the preliminary experiment.

Key words: terahertz; slow wave structure; Backward Wave Oscillator(BWO)

太赫兹(THz)在高速大容量通信、雷达成像、无损探测等研究领域都需要大功率太赫兹辐射源<sup>[1-2]</sup>。电真空器 件是可产生大功率太赫兹辐射的技术途径之一,其辐射功率可到千瓦或兆瓦量级<sup>[3]</sup>。美国、日本、俄罗斯及欧洲 其他国家都在积极开展大功率太赫兹器件的研究<sup>[4-6]</sup>。RBWO属于高功率微波器件,由几百千伏到兆伏、脉宽几 个纳秒的电压,上千安的电流驱动,产生功率高达几百千瓦到吉瓦量级,脉宽纳秒或亚纳秒量级的电磁波辐射<sup>[7-8]</sup>。 通过结构小型化和精细设计,将 RBWO 的频率提高至太赫兹波段,产生千瓦或兆瓦高功率纳秒脉宽的太赫兹波, 对于研究太赫兹波对物质作用的效应以及未来信息干扰对抗具有重要的意义。

目前,国外对于太赫兹小功率连续波 BWO的研究已有成熟的产品,但尚未见到大功率 THz-BWO 的相关报道。国内方面,北京真空电子研究所正在对连续波 0.34 THz-BWO 进行研究<sup>[9]</sup>,西北核技术研究所对 0.34 THz-RBWO 进行了物理研究和粒子模拟<sup>[10]</sup>,但目前都还未有实验报道。本文介绍了 0.34 THz-RBWO 的慢波结构设计及粒子模拟结果,通过微加工工艺试验,加工出了 0.34 THz-RBWO 慢波结构,并开展了初步的实验研究。

#### 1 慢波结构设计

慢波结构是 RBWO 的核心部分,是实现束波互作用产生自激振荡的区域。RBWO 的经典组成如图 1(a)所示<sup>[11]</sup>。 然而,当频率进入太赫兹频段,慢波结构尺寸急剧缩小,器件特征结构尺寸在亚毫米甚至微米量级,在 0.22 THz 器件零件的加工达到了微机械加工的极限。为使 0.34 THz-RBWO 能实现高功率输出,并能通过微机械加工方式 实现,慢波结构设计上采用了过模设计,束波互作用产生的太赫兹波模式选择高次模式。太赫兹波在慢波结构表 面传输,在表面处电场最强,具有表面波的特征。





本文的慢波结构为正弦周期波纹结构, 慢波结构平均直径 6.8 mm, 波纹深度 0.1 mm, 周期 0.26 mm, 总共 20 个周期。慢波结构左端设计有 Bragg 反射腔实现对波的发射, 右端为 5 个深度渐变的周期结构。采用 2.5 维粒 子模拟 KARAT 程序对束波互作用进行了粒子模拟, 0.34 THz-RBWO 计算模型如图 1(b)所示。模拟时采用的电子 束参数为电压 100 kV, 电流 1 kA, 脉冲宽度 3.1 ns, 电子束半径 *R*0.31 mm~*R*0.325 mm, 厚度 0.15 mm。计算得 到的每隔 0.5 ns 输出太赫兹波的功率和不同时刻对应的频谱如图 2、图 3 所示, 由图可知: 从 0.5 ns 到 3.0 ns 的 时间内输出频率稳定在 0.34 THz, 平均功率大小 2.2 MW, 计算得到束波互作用效率为 2.2%。慢波结构设计图如 图 4(a)所示, 通过对加工误差分析, 要求加工尺寸精确度控制在±5 µm 以内, 且表面粗糙度达到 Ra0.4, 采用常

规的机械加工无法完成,目前只能选择高精确度微铣削加工方法。经过反复的工艺试验,最终采用特制刀具由精 密 CNC 车床加工出了该慢波结构,样品如图 4(b)所示。经过加工试样件的解剖分析测试,加工的尺寸精确度和 表面粗糙度满足设计要求。



(a) design of SWS

Fig.4 Design of slow wave structure and its sample photo 图 4 慢波结构设计图与加工样件



Fig.5 Experimental equipment of 0.34 THz-RBWO 图 5 0.34 THz-RBWO 实验装置

#### 实验研究 2

#### 2.1 实验系统

0.34 THz-RBWO 实验装置如图 5 所示,主要包括脉冲源、引导磁场系统、真空系统以及触发控制系统。脉 冲源采用的是从俄罗斯引进的 Randon303 脉冲源,引导磁场系统的线圈采用的是线包磁场,线圈在长度为 10 mm, 直径为 13 mm 的圆柱形区域内能产生大于 3.5 T 的磁场。阴极为环状石墨阴极, 阴极发射面完全浸没于均匀磁场 中,在100 kV的高压下爆炸发射产生强流电子束,阴极电流发射密度为0.34×10<sup>6</sup> A/cm<sup>2</sup>。

#### 2.2 脉冲宽度

大赫兹波辐射的脉冲宽度采用检波器测量,即在检波器的前端 连接角锥喇叭接收天线,放置在离太赫兹源辐射天线一定距离的地 方,检波器直接检测出辐射太赫兹波的信号包络。测量得到的太赫 兹检波波形和电子束电压波形如图 6 所示,其脉冲脉宽为 2.1 ns。

#### 2.3 辐射频率

0.34 THz-RBWO 产生的是纳秒脉宽、峰值功率上百千瓦的太 赫兹脉冲信号,由于固态混频器的响应时间问题,无法通过混频的 方法测量。为此,辐射频率采用带通滤波器进行测量,即在检波器 前放置不同频段的带通滤波器,通过检波信号的大小,判断 RBWO



detector signal 图 6 电压波形与太赫兹波脉冲检波波形

的频率范围。实验用的带通滤波器为频率选择表面(Frequency Selective Surfaces, FSS)人工电磁材料。 频率测试得到的信号波形如图 7 所示,比较可知,检波器 1#(C2 通道)在未放置和放置带通滤波器前后,都 能检测到信号,加带通滤波器(中心频率 0.34 THz)后相对参考检波器 2#幅度值下降在 3 dB 以内。在放置其他带 · 通滤波器时,检测不到检波器 1#的信号。因此,可以确定太赫兹脉冲辐射信号频率能通过中心频率 0.34 THz 带 通滤波器,频率在 0.32 THz~0.36 THz 范围内。



(a) waveform without filter

(b) waveform with filter in front of detector 1#

Fig.7 Waveform of cathode voltage and two-channel detector signal of THz pulse 图 7 电压与两路太赫兹波脉冲检波波形

#### 2.4 辐射功率

纳秒脉冲信号的辐射功率标定一直是高功率微波领域的难点,而在太赫兹频率下难度又进一步加大。通常高 功率微波器件功率的标定比较认可空间功率积分方法,但在 0.34 THz 频段存在非对称模式,空间位置精确度要 求高,检波器、衰减器等元件标定困难等因素影响,因而误差较大不可行。另外还有一种用辐射量热计测量单脉 冲能量,再除以脉宽计算功率的方法,但是由于存在 THz-RBWO 脉冲能量低(零点几 mJ)和响应时间问题而检测 不到信号。

因此,本文提出采用 Pyrocam III 光电探测器<sup>[12]</sup>进行输出功率测试的方法。Pyrocam III 光电探测器由 128×128 的热释电单元阵列组成,单元面积 100 µm×100 µm,整个阵列面积 12.8 mm×12.8 mm,单元材料为 LiTa03,响应 波长范围从 1.06 µm 到大于 1 000 µm,响应脉冲宽度 1 fs~12.8 ms,灵敏度 70 µJ/cm<sup>2</sup>,饱和能量 10 mJ/cm<sup>2</sup>。Pyrocam III 光电探测器能够对辐射波形进行捕捉成像,得到能量的相对大小。通过实验研究表明, Pyrocam III 光电探测器也能对零点几太赫兹频率信号进行响应,如已经用于 0.14 THz-RBWO 的辐射模式测试<sup>[9]</sup>。Pyrocam III 光电探测器测试功率的测量原理为: RBWO 脉冲信号作用于 Pyrocam III 探测器后,得到一个能量值;采用已知功率的 信号源对 Pyrocam III 进行标定,即用已知功率信号源作用于 Pyrocam III 后得到一个能量值,通过对 2 个能量值 和脉宽值的计算可以标定出太赫兹源的辐射功率。这里,由于没有 0.34 THz 的信号源,采用了 0.22 THz 返波管 (美国 Microtech 公司 QS2-180)作为标准信号源。

图 8 为 0.34 THz-RBWO 的脉冲能量测试过程,图 8(a)、图 8(b)为脉冲作用于 Pyrocam III 光电探测器前后的 成像图,作用前的成像图反映为探测器的本底值,经过数据处理消除本底值后,得到太赫兹脉冲的成像图如图 8(c)所示。0.22 THz 信号源的功率通过 PM4 功率计测试为 24.5 mW,图 9 为 0.22 THz 辐射信号作用于 Pyrocam III 光电探测器前后得到的成像图像(PyrocamIII 斩波频率为 24 Hz,测量占空比为 50%)。测量数据及 0.34 THz-RBWO

功率的计算如表 1 所示,通过标定其 功率为 375 kW。该实验结果低于理论 计算结果,原因在于理论计算的模型 为理想模型,未考虑器件金属材料表 面粗糙度的表面损耗、介质窗片的损 耗以及空间辐射的损耗。该结果在目 前国内同类型脉冲源中处于领先水平。



(a) background of Pyrocam III

表10.34 THz-RBWO功率标定测试数据

| Table1 Power calibration data of 0.34 THZ-RBWO |  |                                 |   |
|--|--|---------------------------------|---|
| source model                                   | pulse width                                  | relative energy@<br>Pyrocam III | power   |
| standard source                                | $\tau_1 = 1/24 \times 50\% = 1/48 \text{ s}$ | W1=537 628                      | P <sub>1</sub> =24.5 mW   |
| 0.34 THz-RBWO                                  | $\tau_2 = 2.1 \text{ ns}$                    | W2=829 366                      | $P_2 = W_2 \times P_1 \times \tau_1 / (W_1 \times \tau_2) = 375 \text{ kW}$ |



(b) image generated by THz pulse



(c) image generated by THz pulse without background

Fig.8 Imaging plots generated by 0.34 THz-RBWO pulse 图 8 0.34 THz-RBWO 脉冲作用成像图



(a) background of Pyrocam III



(b) imaging generated by 0.22 THz source

Fig.9 Imaging pictures of Pyrocam III photoelectric detector generated by 0.22 THz source 图 9 0.22 THz 信号源作用 Pyrocam III 光电探测器前后的成像图

### 3 结论

本文对 0.34 THz-RBWO 进行了粒子模拟与设计,采用微机械精密加工成功加工出了波纹深度 0.1 mm,周期 0.26 mm,平均半径 6.8 mm 的正弦周期慢波结构,并进行了初步的实验。随着频率进入太赫兹频段,太赫兹信号的频率和功率的测量成为了难题。本文通过对 0.34 THz-RBWO 的实验研究尝试了新的频率和功率测量方法,试验了采用 FSS 带通滤波器进行频率测试和 Pyrocam 光电探测器进行功率测试的方法,实验结果证明了这种频率和功率测试方法的可行性,测量得到 0.34 THz-RBWO 辐射波的参数为:脉冲宽度 2.1 ns,频率范围 0.32 THz~0.36 THz, 功率 375 kW。随后将开展对 0.34 THz-RBWO 的参数验证及应用方面的研究。

#### 参考文献:

- LIU Shenggang, YAN Yang, ZHU Dajun, et al. The possible contribution of vacuum electronics to THz radiation sources[C]// IEEE International Conference on Vacuum Electronics. Korea:[s.n.], 2003:357-358.
- [2] 王明红,薛谦忠,刘濮鲲. 太赫兹真空电子器件的研究现状及其发展评述[J]. 电子与信息学报, 2008,30(7):1766-1772.
  (WANG Minghong,XUE Qianzhong,LIU Pukun. Review of THz vacuum electronic device and development[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2008,30(7):1766-1772.)
- [3] 鄢扬,傅文杰.太赫兹回旋管研究进展[J]. 真空电子技术, 2013,54(1):27-30. (YAN Yang,FU Wenjie. Development of Terahertz gyrotrons[J]. Vacuum Electronics, 2013,54(1):27-30.)
- [4] Borisov A A, Budzinsky U A, Bykovsky S V, et al. The development of vacuum microwave devices in Istok[C]// IEEE International Vacuum Electronics Conference. Bangalore, India:[s.n.], 2011:437-438.
- [5] 电子管设计手册编辑委员. O 型返波管设计手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1985. (Editorial committee of electronic tube design handbook. Design Manual of O Type Oscillator[M]. Beijing:National Defense of Industry Press, 1985.)
- [6] Hurlbut W C,Kozlov V G. Extended spectral coverage of BWO combined with frequency multipliers[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2010,47(10):1-2.
- [7] 胡林林,陈洪斌,马国武,等. X 波段重复频率 GW 级超辐射相对论返波管[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(4):841-844.
  (HU Linlin,CHEN Hongbin,MA Guowu, et al. X-band repetitive GW-level superadiance relativistic backward wave oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(4):841-844.)
- [8] 陈洪斌,周传明,胡林林,等. 0.14 THz 返波管器件[J]. 强激光与粒子束, 2010,22(4):865-869. (CHEN Hongbin,ZHOU Chuanming,HU Linlin,et al. 0.14 THz backward wave oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010,22(4): 865-869.)
- [9] 冯进军,唐烨,李含雁,等. 360 GHz 太赫兹返波振荡器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(1):32-37. (FENG Jinjun, TANG Ye,LI Hanyan, et al. 340 GHz terahertz backward oscillators[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(1):32-37.)
- [10] 李爽,王建国,董长江,等. 大功率 0.34 THz 辐射源中慢波结构的优化设计[J]. 物理学报, 2013,62(12):120703(1)-120703(7). (LI Shuang,WANG Jianguo,DONG Changjiang, et al. Optimization of slow-wave structure in high power 0.34 THz radiation source[J]. Acta Physica Sinica, 2013,62(12):120703(1)-120703(7).)
- [11] 文光俊,李家胤,谢甫珍,等. 3 cm 相对论返波荡器的粒子模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 1998,10(4):621-626. (WEN Guangjun,LI Jiaying,XIE Fuzhen, et al. Particle simulation of a 3 cm relativistic backward wave oscillator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998,10(4):621-626.)
- [12] Microtech Instruments Inc. Product Catalog. THz Lenses & Windows[EB/OL]. [2005]. http://www.mtinstruments.com/thzlenses/ index.htm.

#### 作者简介:



胡林林(1979-),男,湖北省荆州市人,硕 士,副研究员,主要研究方向为电真空器件和 太赫兹技术.email:9970244@qq.com.

**宋** 睿(1983-),男,湖北省随州市人,硕士,助理研 究员,主要从事高功率微波器件与大功率电真空器件研究. 陈洪斌(1971-),男,重庆市丰都县人,博士, 研究员,主要从事电真空器件和太赫兹技术与应用 方面的研究.

**郭焱华**(1969-),女,湖北省荆州市人,硕士, 副研究员,主要从事高功率微波器件与微波、毫米 波信号测量技术应用方面的研究.