

文章编号: 1672-2892(2011)03-0303-05

## 0.14 THz 返波管器件数值模拟与实验研究

陈洪斌<sup>a</sup>, 胡林林<sup>a</sup>, 马国武<sup>a</sup>, 周传明<sup>b</sup>, 许冬明<sup>c</sup>, 宋睿<sup>a</sup>, 金晓<sup>a</sup>

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.科技委; c.机械制造与工艺技术研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 对有限引导磁场环形电子束的色散曲线作了理论推导, 并利用该色散关系数值计算了正弦慢波结构的色散曲线。采用 KARAT 模拟程序对 0.14 THz 返波管进行了粒子模拟, 并在 RADAN303 脉冲源上开展了初步的实验研究, 实验获得频率大于 0.14 THz、脉冲宽度为 1 ns ~ 2 ns、重复频率 10 Hz 和辐射功率大于 1.45 MW 太赫兹波输出。

**关键词:** 慢波结构; 返波管; 太赫兹波; 环形电子束

**中图分类号:** TN24

**文献标识码:** A

## Numerical analysis and experiment of the 0.14 THz Backward Wave Oscillators

CHEN Hong-bin<sup>a</sup>, HU Lin-lin<sup>a</sup>, MA Guo-wu<sup>a</sup>, ZHOU Chuan-ming<sup>b</sup>, XU Dong-ming<sup>c</sup>, SONG Rui<sup>a</sup>, JIN Xiao<sup>a</sup>

(a.Institute of Applied Electronics; b.Department of Science and Technology; c.Institute of Mechanical Manufacture and Technical Skill, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

**Abstract:** The linear dispersion relation of Slow Wave Structures(SWSs) driven by annular beam with finite magnetic field was obtained. Numerical analysis was carried out according to the experimental parameters. Based on the PIC simulation results obtained by KARAT, elementary experiment was designed and carried out, from which the terahertz wave with frequency >0.14 THz, pulse duration of 1 ns~2 ns and output power >100 kW was acquired.

**Key words:** Slow Wave Structures(SWSs); Backward Wave Oscillators(BWOs); terahertz wave; annular beam

太赫兹(Terahertz, 简称 THz)辐射是从 0.1 THz 到 10 THz 的电磁辐射, 太赫兹系统在半导体材料、高温超导材料的性质研究、断层成像技术、无标记的基因检查、细胞水平的成像、化学和生物的检测以及宽带通信、微波定向能等许多领域有广泛应用<sup>[1-2]</sup>。太赫兹辐射源有很多种类, 如返波管、回旋管、自由电子激光、绕射辐射振荡器(Orotron)、纳米速调管、扩展相互作用振荡器(EIO)和太赫兹量子级联激光器等<sup>[1-4]</sup>。其中, 太赫兹波段返波管在国际上研究很多, 有系列产品销售, 如俄罗斯 ISTOK 和美国 MICROTECH 等公司的产品<sup>[5]</sup>, 工作频率在 100 GHz~1.0 THz, 功率为 20  $\mu$ W~100 mW, 但对大功率甚至高功率的太赫兹返波管器件研究较少。本文主要针对 0.14 THz 返波管器件进行理论研究、粒子模拟与初步实验研究, 获得频率大于 0.14 THz, 脉冲宽度为 1 ns~2 ns 和功率 1.45 MW 的太赫兹波输出。

### 1 粒子模拟

粒子计算模型如图 1 所示, 高频结构冷腔色散曲线如图 2 所示, 电子束电压 100 kV, 电流 1 000 A, 脉冲宽度 3.1 ns, 慢波结构波纹深度 0.24 mm, 周期 0.6 mm。图 3 为每隔 0.5 ns 的电子束  $p_z$ - $z$  关系图, 从图 3 中可看出: 电子束从 0.5 ns 开始群聚, 在 3.5 ns 群聚结束, 没有出现群聚和群聚不稳定现象。从图 1 可看出: 电子束被群聚成一个个束团, 即电子束进入慢波结构与太赫兹波相互作用, 逐渐群聚成分离的束团, 由于耦合强度的变化, 在慢波结构末端群聚好的束团将束能量转变成太赫兹波能量。图 4 为每个 0.5 ns 的频率谱和太赫兹波功率时域图。从图 4 可看出: 太赫兹波频率在整个时间 1.0 ns~3.5 ns 内保持一致。没有出现频率偏移和模式的变化。模拟结果: 频率为 142.5 GHz, 功率 1.8 MW。模拟中发现: 辐射频率和模式竞争与电子束半径有很大关系, 在电子束平均半径 6 mm 时, 只有 1 个辐射频率, 随着电子束半径的减小, 出现多个频率, 模式也较为杂乱。由于慢波结构最

小半径为 6.3 mm，最外层电子束与慢波结构最小距离只有 0.1 mm~0.2 mm，因此，实验中对电子束、慢波结构和引导磁场的同心度要求非常高。

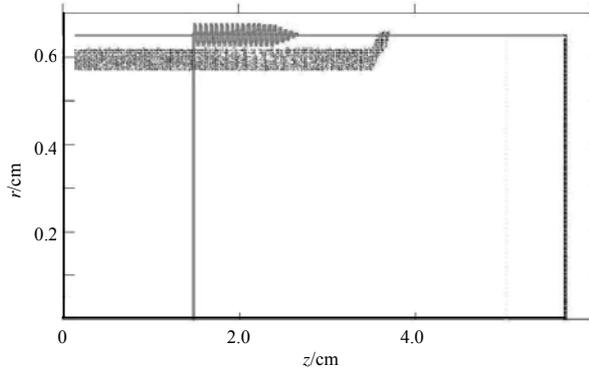


Fig.1 Simulation structure  
图 1 计算模型

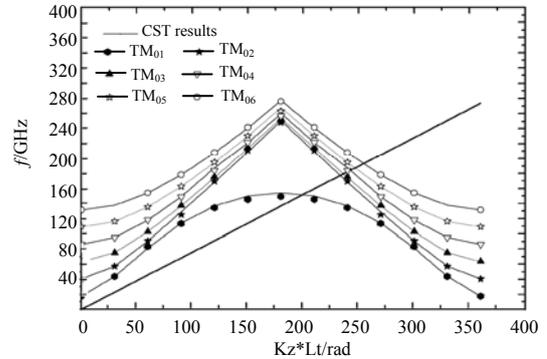


Fig.2 Dispersion curve  
图 2 冷腔色散曲线

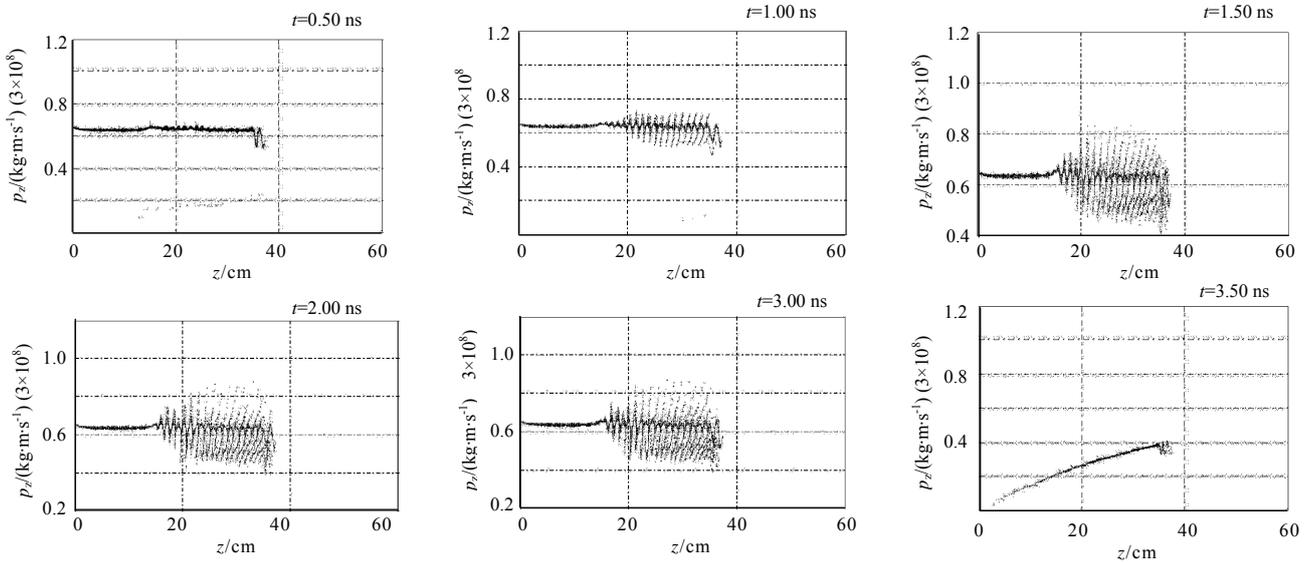


Fig.3  $p_z$ - $z$  relation after every interval of 0.5 ns  
图 3 每隔 0.5 ns  $p_z$ - $z$  关系图

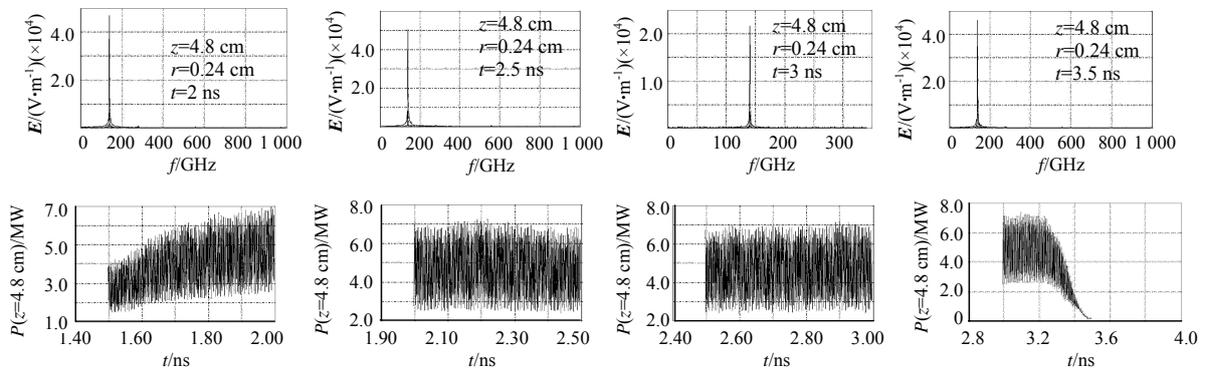


Fig.4 Frequency spectrum and the temporal power plot after every interval of 0.5 ns  
图 4 每隔 0.5 ns 的频率谱和功率时域图(上一频率谱,下一功率时域图)

归一化输出功率与电子束电压和电流的关系曲线如图 5 和图 6 所示，输出功率与频谱、电子束半径的关系如图 7 所示。

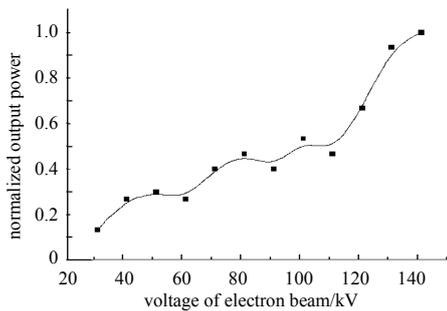


Fig.5 Relation between normalized output power and voltage of electron beam  
图5 归一化输出功率与电子束电压关系曲线

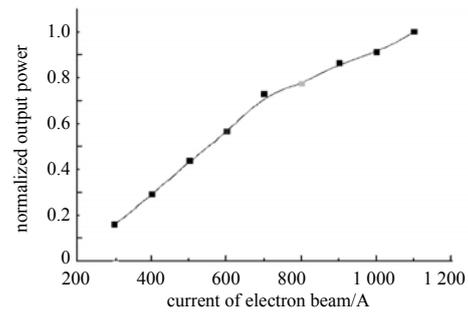


Fig.6 Relation between normalized output power and current of electron beam  
图6 归一化输出功率与电子束电流关系曲线

## 2 实验研究

系统总体原理示意图如图8所示。系统总体包括脉冲源、电子束二极管、慢波结构、高频输出结构、引导磁场系统和真空系统。其简单工作原理：脉冲源接电子束二极管，由电子束二极管发射、加速后的电子与慢波结构太赫兹波相互作用产生太赫兹波，经过模式变换器后接辐射天线进行空间辐射。

二极管采用磁绝缘无箔二极管，阴极为爆炸发射石墨环状阴极。电子束参数：电压100 kV，电流1000 A，脉冲宽度3 ns，电子束半径6.1 mm，厚度0.3 mm。电子束束斑如图9所示，电子束电压和电流波形如图10所示。引导磁场采用单次强引导磁场系统，最大磁场强度5 T，实验中采用3 T。放电电流脉冲宽度200 μs。由于涡流的影响，引导磁场内部的金属材料对磁场均匀性分布的影响非常大，因此对引导磁场内部放置不同材料的电子束二极管阳极进行测试，发现黄铜和铝材料对引导磁场均匀性分布影响较大，实验中电子束根本无法穿越慢波结构和阳极。无磁不锈钢对磁场分布均匀性影响较小，对电子束的传输几乎没有影响。

太赫兹波的波形测试采用3 mm检波器，频率测试采用80 GHz和140 GHz高通滤波器，两路同时进行测试，每路包括接收天线、高通滤波器、检波器和匹配负载。接收天线距离辐射天线4 m处测试波形如图11所示。从2个波形可以初步判断：辐射太赫兹波频率大于140 GHz，脉冲宽度1 ns~2 ns。辐射模式采用Pyrocam III相机测试，没有太赫兹波辐射时的相机照片(即本底)如图12(左)所示，有太赫兹波辐射时的相机照片如图12(右)所示，经过多次测试，辐射模式比较稳定。10 Hz重复频率的太赫兹波测试波形如图13所示，能量采用电子科技大学提供的能量计测试，测试波形如图14所示，用测得的能量除以脉冲宽度获得功率，测试获得的太赫兹波辐射功率为1.45 MW。在实验中发现：慢波结构壁有电子轰击的痕迹，分析认为这很可能是引起实验与粒子模拟中功率相差较大的原因。

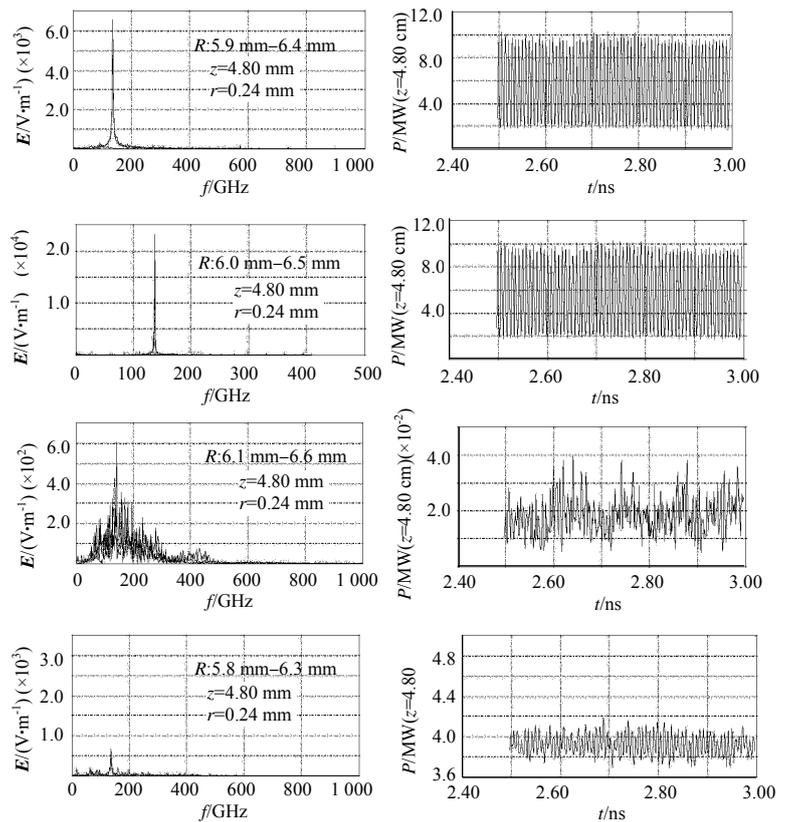


Fig.7 Relation among the output power, spectrum and radius of electron beam  
图7 输出功率与频谱与电子束半径的关系

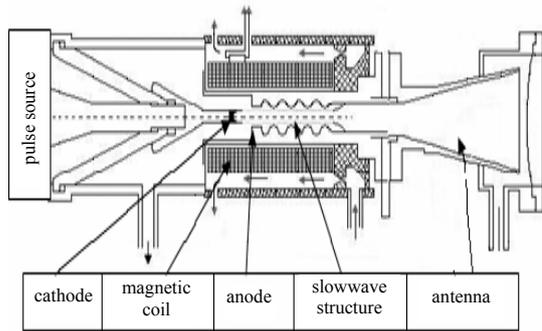


Fig.8 Experimental structure sketch  
图8 系统总体原理示意图

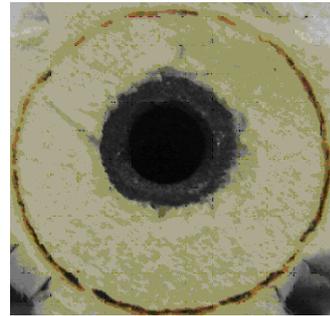


Fig.9 Beam speckle  
图9 电子束束斑

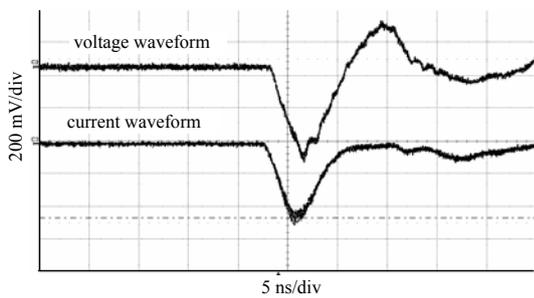


Fig.10 Waveform of the voltage and current of the electron beam magnetic coils  
图10 电子束电压和电流

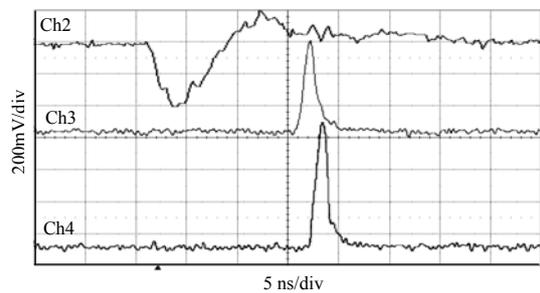


Fig.11 Waveform of the beam voltage and the terahertz pulse  
图11 测试电子束电压和太赫兹波波形  
(CH2-电子束电压波形; CH3-接 140 GHz 高通滤波器太赫兹波波形; CH4-接 80 GHz 高通滤波器太赫兹波波形)

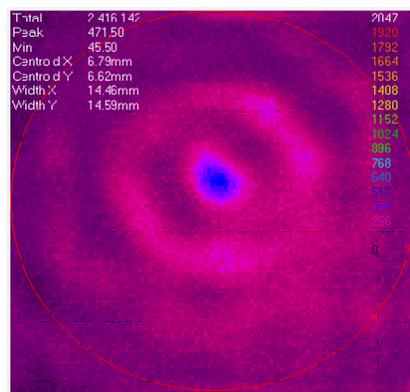
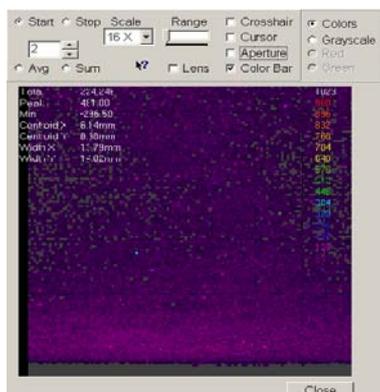


Fig.12.Pictures with(right) and without(left) THz wave  
图12 无(左)和有(右)太赫兹波时的照片

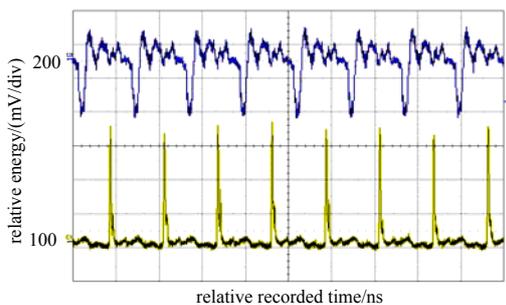


Fig.13 Waveform under the 10 Hz repetitive rate  
图13 重复频率 10 Hz 的测试波形

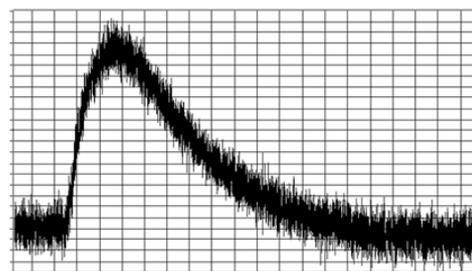


Fig.14 Waveform of energy measurement  
图14 能量测试波形

### 3 结论

通过数值模拟和初步实验研究相结合,开展了0.14 THz返波管器件研究,在电子束电压为100 kV,电流为1 kA,脉冲宽度为3 ns和引导磁场强度为3 T条件下,获得频率大于0.14 THz,脉冲宽度1 ns~2 ns,功率大于1.45 MW,重复频率10 Hz的太赫兹波输出。成功研制了0.14 THz返波管器件,为更高功率和重复频率太赫兹波返波管器件研究奠定了基础,也为正弦慢波结构的精细加工积累了经验。

#### 参考文献:

- [1] 许景周,张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京:北京大学出版社,2007. (XU Jingzhou,ZHANG Xicheng. The science, technology and applications of Terahertz[M]. Beijing:Beijing University Press, 2007.)
- [2] 刘盛刚. 太赫兹科学技术新发展[J]. 中国基础科学, 2006,8(1):7-12. (LIU Shenggang. The new developments of the science and technology of the Terahertz[J]. China Basic Science, 2006,8(1):7-12.)
- [3] Indranath M,Romola D C. Backward wave oscillator based THz spectroscopy,diatomic formalism and optically pumped lasers[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2003,24(8):1255-1273.
- [4] Ogawa I,Idehara T,Ui M,et al. Stabilization and modulation of the output power of submillimeter wave gyatron[J]. Fusion Engineering and Design, 2001,53:571-576.
- [5] Microtech instruments inc. Microtech product catalog[Z]. 2005.

#### 作者简介:



陈洪斌(1971-),男,重庆市丰都县人,博士,研究员,主要从事毫米波和太赫兹波器件研究,email:ch\_hongbin@126.com.

胡林林(1979-),男,湖北省荆州市人,硕士,助理研究员,主要从事高功率微波器件、大功率THz电真空器件及信号测量方面的研究.

马国武(1981-),男,四川省凉山州人,硕士,助理研究员,主要从事高功率微波器件、大功率毫米波器件研究.

周传明(1941-),男,成都市人,研究员,主要负责中物院高技术领域微波方面的规划与管理工

许冬明(1970-),男,浙江宁波人,硕士,研究员,主要从事机械设计及加工工艺方面的研究.

宋睿(1983-),男,湖北省随州市人,本科,主要从事大功率毫米波及太赫兹器件的引导磁场系统设计与测量工

金晓(1969-),男,兰州市人,博士,研究员,主要从事高功率微波技术方面的研究.