

# 无外加引导磁场相对论返波振荡器粒子模拟\*

汪 伟, 钱宝良, 葛行军, 余小辉

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 设计了一种无外加引导磁场 S 波段相对论返波振荡器, 采用阳极网提取电子, 并设计了非均匀慢波结构。通过 Karat 2.5 维全电磁粒子模拟程序研究了器件内束-波作用的物理过程。典型模拟结果为: 当二极管工作电压 330 kV、电流 2.83 kA 时, 器件在频率 2.79 GHz 处获得较高的微波输出, 经 27 ns 后饱和, 输出微波的功率达 158 MW, 效率约为 16.8%。

**关键词:** 高功率微波; 引导磁场; 相对论返波振荡器; 慢波结构; 粒子模拟

**中图分类号:** TN811; TN125 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102202.0299

相对论返波振荡器(RBWO)是目前最有潜力的高功率微波产生器件之一, 具有高功率、高效率、适合重复频率工作等特点<sup>[1]</sup>, 其主要缺点是需要强磁场对电子束进行引导和约束, 有的返波振荡器要求引导磁场大于 2 T, 磁场系统庞大、笨重, 制约了相对论返波振荡器小型化的发展。因此, 降低甚至不加引导磁场成为当前相对论返波振荡器的研究方向之一。为了降低外加引导磁场, 研究人员提出了各种改进方案, 如等离子体加载的相对论返波振荡器<sup>[2-4]</sup>, 带谐振反射腔的相对论返波振荡器<sup>[5-8]</sup>, 同轴相对论返波振荡器<sup>[9-10]</sup>等。以上的设计只是在一定程度上降低了外加引导磁场的强度, 并没有彻底摆脱外加引导磁场。本文结合正在研制的脉冲电子束加速器, 研究了一种不加引导磁场的相对论返波振荡器, 利用 2.5 维全电磁 PIC 粒子模拟软件进行了详细的粒子模拟研究, 并对电磁结构进行了改进和优化。

## 1 模型设计和分析

器件的结构如图 1 所示, 它由阴极、阳极网、慢波结构及输出波导等组成。

### 1.1 二极管的设计

由于器件没有引导磁场, 不能对电子进行较好的约束和引导, 必须通过设计合理的结构, 避免因电子束过早打在波导壁上无法充分进行束-波相互作用。

采用环形阴极, 使电子束沿慢波结构表面传输, 充分利用器件“表面波”的特性。同时, 环形阴极增大了电子发射半径, 减弱了空间电荷效应, 有利于无引导磁场下电子束的传输。其次, 采用透过率较高的阳极网提取电子(透过率为 90%)。阳极网的存在使电子束能较均匀的发射, 避免了其直接打到截止颈上, 且由于透过率较高, 电子束的损失较小。

### 1.2 慢波结构的设计

由于电子束没有磁场的约束, 加之空间电荷效应的作用, 电子很快发散, 如果半径太小, 大量电子轰击慢波结构, 如果半径太大, 不利于束-波作用, 而且增大了器件尺寸, 因此慢波结构的半径需要仔细选取。此外, 慢波结构采用变相速结构, 通过增加后段波纹的周期来实现在电子减速区增强电子与微波的相互作用, 有利于提高效率。

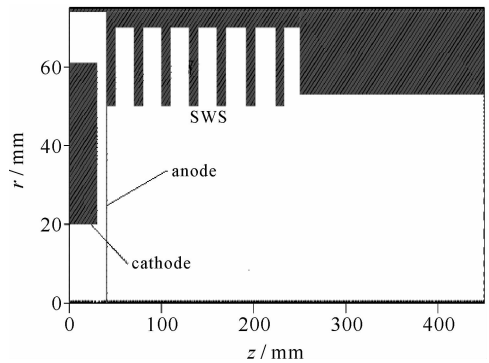


Fig. 1 Schematic diagram for PIC simulation of RBWO without external guiding magnetic field

图 1 无外加引导磁场 RBWO 的结构图

\* 收稿日期: 2009-03-24; 修订日期: 2009-10-13

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 汪 伟(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事高功率微波技术研究; wangwei2385672@163.com.

利用文献[10]中介绍的方法,得到  $TM_{01}$  模的色散曲线如图 2 所示,图中直线为二极管工作电压线,对应电压为 330 kV,黑色标注点是理论工作点,为 2.85 GHz。由图可得,器件工作在  $\pi$  模附近,具有较大的电压调谐范围,便于实验中进行参数调节。

## 2 模拟结果和分析

为了分析无外加引导磁场相对论返波振荡器中电子束的传输及束-波相互作用的物理过程并进行电磁结构优化,采用 Karat 2.5 维全电磁粒子模拟程序设计了 S 波段相对论返波振荡器。

图 3 为器件起振后束电子群聚的空间分布情况。可以看到,电子束发射较均匀,充分证明了阳极网对电子的提取作用;在慢波结构的前两个腔,电子的群聚并不明显,因为此时电子束尚处于预调制状态;从第 3 个腔开始电子出现明显的群聚现象,充分发生束-波相互作用;慢波结构末端,由于微波场从群聚电子束中提取了能量,因而电子的密度群聚减小;残余电子被输出波导吸收。图 4 给出了电流被调制的情况, $z=12$  cm 处的电流调制成分达到最大,对应慢波结构第 3 个腔,进一步揭示了各个腔的作用。这一模拟结果说明了器件各部分在束-波作用中所起的作用。

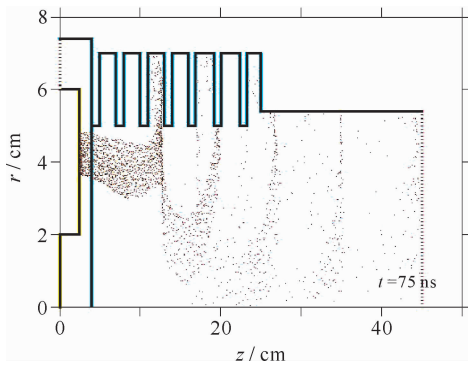


Fig. 3 Bunching of electrons

图 3 电子群聚图

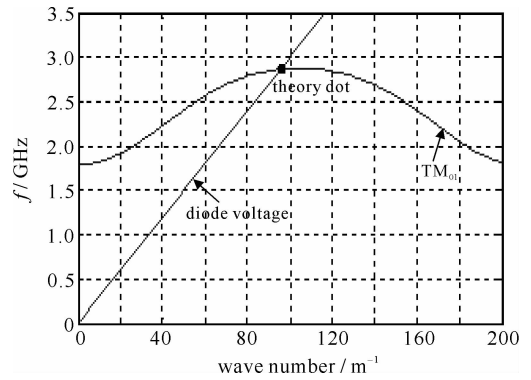


Fig. 2  $TM_{01}$  dispersion curve in RBWO

without external guiding magnetic field

图 2 无外加引导磁场 RBWO 慢波结构色散曲线

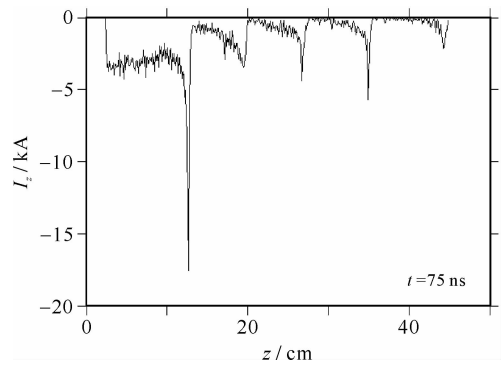


Fig. 4 Beam current along  $z$  axis

图 4 电流沿  $z$  轴分布

在二极管电压 330 kV、电流 2.83 kA 的模拟参数下,得到了如下典型结果:器件在中心频率在 2.79 GHz 处得到了稳定、频谱单一的高功率微波输出,输出微波经 27 ns 后饱和,饱和后微波输出功率为 158 MW,效率达到 16.8%,见图 5。由于没有加引导磁场,尽管在结构上做了改进,但是电子束的传输还是受到一定的影响,从而影响了束-波相互作用。为避免电子束打在慢波结构上,电子束和慢波结构之间的距离设置为 5 mm,大于通常表面波器件的 2~3 mm,这使得电子束与表面波不能有效的作用;另外,部分电子打到慢波结构表面被吸

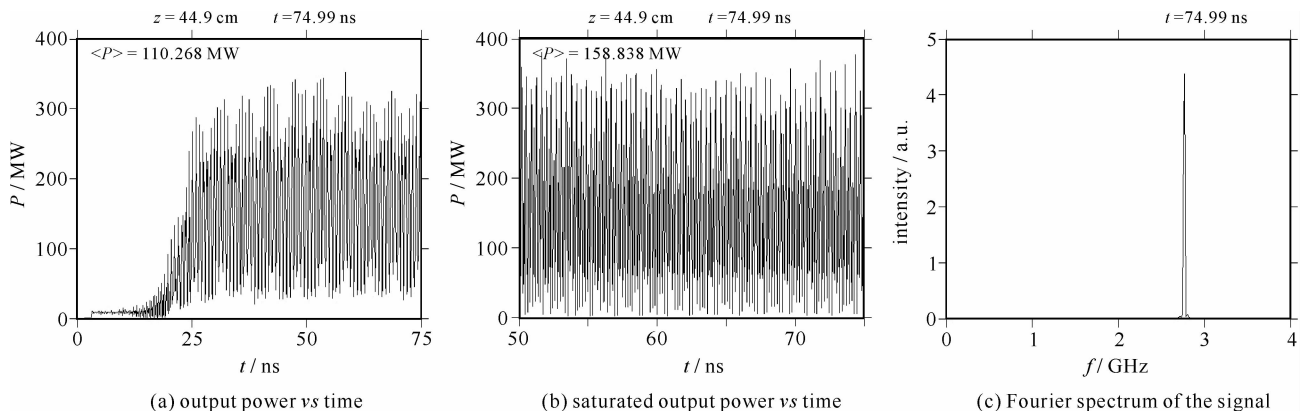


Fig. 5 Simulation results at output window

图 5 出口粒子模拟结果

收,致使该部分电子的能量不能转换。为了进一步提高器件的输出指标,需要探讨更合适的二极管和慢波结构。

由图 5(c)可见,模拟工作点与计算值有一定的差别,认为有以下几方面的原因:(1)理论值是在不考虑电荷效应的理想条件下计算的,而该模型中,电子的电荷效应强烈,不能忽略;(2)由于阳极网的存在,电子在通过阳极网时,必然存在散射、反射等,影响电子的状态;(3)数值计算简单的认为周期性慢波结构是无限长的,而粒子模拟的是有一定长度的慢波结构与电子束相互作用的情况。

### 3 二极管电压的影响分析

图 6 为二极管电压为 250~430 kV 时,模拟获得的输出微波频率及效率变化情况。如图 6(a)所示,电压在 290~390 kV 之间变化时,输出微波频率基本不变,说明器件有较好的电压调节范围。而当电压进一步升高时,微波频率变大,这是由于器件工作在返波状态,电子束能量加大时,工作点会上升。图 6(b)表明:随着电子束能量的增大,一方面,使束-波作用增强;另一方面,减少了轰击慢波结构的电子,更多的电子可以进行束-波作用,提高了效率。进一步的模拟表明,当电子束能量大于 550 keV 时,输出微波效率下降,原因是束-波作用机制发生变化,器件不再工作在返波状态。

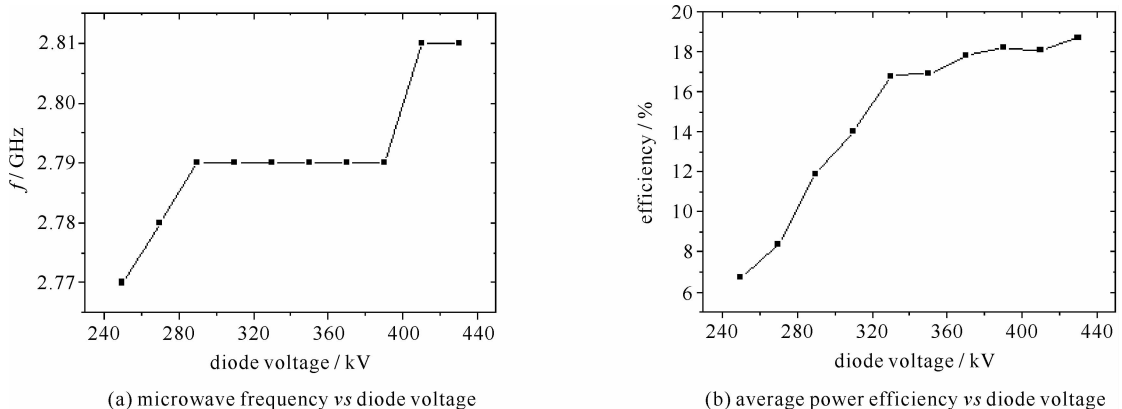


Fig. 6 Microwave frequency and average power efficiency vs diode voltage

图 6 输出微波频率和平均效率与二极管电压的关系

### 4 结 论

本文结合课题组正在研制的脉冲电子束加速器,研究了一种无引导磁场相对论返波振荡器的设计方案,利用 2.5 维粒子模拟软件进行了模拟研究,通过对器件电磁结构的改进和优化,在二极管电压 330 kV,电子束流 2.83 kA 时,获得了饱和微波功率 158 MW、中心频率 2.79 GHz、束-波转换效率 16.8% 的高功率微波输出。此结果对今后开展无引导磁场返波振荡器的实验研究具有重要的参考作用。

### 参考文献:

- [1] 周传明,刘国治,刘永贵,等. 高功率微波源[M]. 北京:原子能出版社, 2007:47. (Zhou Chuanming, Liu Guozhi, Liu Yonggui, et al. High power microwave sources. Beijing: Atomic Energy Press, 2007:47)
- [2] 钱宝良. 具有等离子体背景或介质衬套的返波管[D]. 北京:清华大学, 1996. (Qian Baoliang. Back-wave oscillator with background plasma or dielectric-lid. Beijing: Tsinghua University, 1996)
- [3] 刘列,刘永贵,李传庐. 充中性气体相对论返波振荡器的粒子模拟研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(5):757-761. (Liu Lie, Liu Yonggui, Li Chuanlu. Particle simulation of RBWO filled with neutral gas. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(5):757-761)
- [4] 杨梓强,梁正. 非磁化等离子体填充的相对论返波管的粒子模拟[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(4):608-612. (Yang Ziqiang, Liang Zheng. PIC simulation of an unmagnetized plasma filled relativistic backward wave oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(4):608-612)
- [5] 张军,钟辉煌,杨建华,等. 具有谐振腔的多波切伦柯夫振荡器的粒子模拟[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(1):86-89. (Zhang Jun, Zhong Huihuang, Yang Jianhua, et al. Particle simulation of the multiwave Cherenkov generator with a resonant cavity operation at low magnetic field. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(1):86-89)
- [6] 杨建华. 低磁场谐振腔切伦柯夫振荡器—锥形放大管的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2003. (Yang Jianhua. Resonator Cherenkov oscillator tapered amplifier tube operating at a low guide magnetic field. Changsha: National University of Defense Technology, 2003)

- [7] 范菊平, 刘国治, 陈昌华, 等. 带有反射腔的相对论返波管的数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(1):103-106. (Fan Juping, Liu Guozhi, Chen Changhua, et al. Numerical study of relativistic backward wave oscillator with resonant reflector. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **4**(1):103-106)
- [8] 陈昌华. 带 Bragg 反射器高功率相对论返波管理论和实验研究[D]. 西安: 西北核技术研究所, 2004. (Chen Changhua. Theoretical and experimental researches on high-power relativistic backward-wave oscillator with Bragg reflector. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2004)
- [9] 文光俊, 李家胤, 谢甫珍, 等. 同轴型相对论返波管的粒子模拟研究[J]. 电子学报, 1999, **27**(12):132-134. (Wen Guangjun, Li Jiayin, Xie Fuzhen, et al. The study of a coaxial relativistic backward wave oscillator by particle-in-cell method. *Acta Electronica Sinica*, 1999, **27**(12):132-134)
- [10] 陈旭. P 波段同轴返波振荡器的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008. (Chen Xu. Investigation of P-band coaxial relativistic backward wave oscillator. Changsha: National University of Defense Technology, 2008)

## Particle-in-cell simulation of relativistic backward wave oscillator without external guiding magnetic field

Wang Wei, Qian Baoliang, Ge Xingjun, Yu Xiaohui

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An S-band relativistic backward wave oscillator without external guiding magnetic field has been investigated using the Karat 2.5D particle-in-cell simulation code. An anode foil is used to extract the electron beam and the non-uniform slow-wave-structure is designed for increasing the microwave output power of the device. Detailed beam-wave interaction pictures in the oscillator were presented. The simulation results show that a 2.79 GHz, 158 MW high power microwave can be obtained when the beam energy is 330 kV and the beam current is about 2.83 kA. The oscillator starts to oscillate at 15 ns, and the nonlinear saturation of the device occurs at about 25 ns. The efficiency is about 16.8% after saturation.

**Key words:** high power microwave; guiding magnetic field; relativistic backward wave oscillator; slow-wave structure; particle-in-cell simulation