

## X 波段 10 GW 高功率返波管振荡器设计\*

马乔生<sup>1)†</sup> 金晓<sup>1)</sup> 绪明<sup>2)</sup> 李正红<sup>1)</sup> 吴洋<sup>1)</sup>

1) (中国工程物理研究院应用电子学研究所, 绵阳 621900)

2) (中国工程物理研究院环保工程研究中心, 绵阳 621900)

(2010 年 7 月 14 日收到; 2010 年 12 月 28 日收到修改稿)

设计了一个高效率的高功率返波管振荡器, 通过添加内导体并采用过模慢波结构, 实现器件的高效率、高功率运行. 当电子能量和束流分别为 1.3 MeV 和 17 kA 时, 采用 2.5 维 Particle in Cell (PIC) 程序模拟得到频率为 8.8 GHz, 功率为 10.4 GW 的微波输出.

**关键词:** 内导体, 相对论返波管, 过模慢波结构

**PACS:** 52.35.-g, 52.35.Mw

## 1. 引言

作为利用 Cherenkov 辐射机理的典型振荡型微波器件<sup>[1]</sup>, 返波管振荡器 (BWO) 得到了广泛的研究, 并且取得长足的进步<sup>[2-5]</sup>. 随着研究的深入, 提高器件输出微波功率和束波相互作用效率成了亟待解决的两个问题. 本文结合了多波切伦科夫振荡器 (MWCG)<sup>[6]</sup>、分离腔振荡器 (SCO)<sup>[7,8]</sup> 和过模返波管振荡器<sup>[7]</sup> 等的优点, 提出了一个高效率的高功率返波管振荡器. 该器件有以下的特点: 1) 采用过模结构来增大器件的径向尺寸, 有效降低慢波叶片表面的电场强度, 提高器件功率容量, 抑制脉冲缩短; 2) 采用同轴结构来增大器件的空间电荷限制电流, 减弱空间电荷效应, 增大器件的束波转换效率; 3) 采用非均匀慢波结构, 使得调制电子束始终处于微波场的减速相位内, 把电子动能充分转换为微波能量, 提高器件的束波转换效率; 4) 通过谐振反射腔实现模式选择; 5) 由谐振反射腔和内导体前端构成一个准谐振腔, 对束流进行预调制.

基于上面的思想, 利用 2.5 维全电磁粒子模拟程序设计了一个高效率的高功率返波管振荡器, 当电子能量和束流分别为 1.3 MeV 和 17 kA 时, 得到频率为 8.8 GHz、功率为 10.4 GW 的微波输出, 器件的束波转换效率约为 47%.

## 2. 物理分析

返波管结构如图 1 所示, 其工作模式为准 TM 模, 输出模式为 TEM 模. 改器件包括准谐振腔和慢波结构两个主要部分, 其等效电路图见图 2.

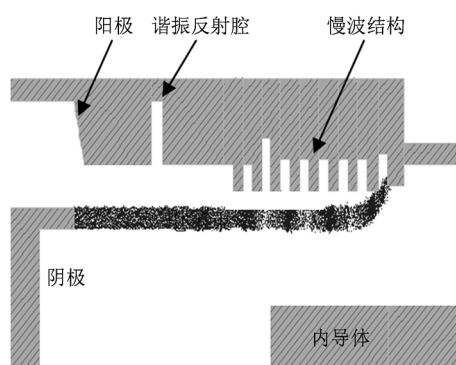


图 1 返波管示意图

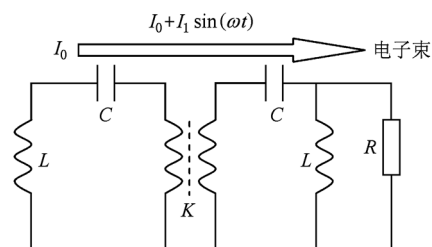


图 2 等效电路

\* 国家高技术研究发展计划资助的课题.

† E-mail: mqshcuep@yahoo.com.cn

器件产生微波功率的大小主要取决于以下三个因素:电子束进入慢波结构时的调制电流、慢波结构表面的电场以及电子束与慢波结构之间的耦合阻抗<sup>[9]</sup>. 内导体的引入正好解决了以上三个方面的问题,有利于提高输出微波功率. 首先,通过调整内导体的半径和长度,使得内导体前端和谐振反射腔一起构成一个准谐振腔,对电子束进行预调制. 其次,内导体的引入使得更多的微波能量集中在慢波结构表面,提高慢波结构表面的电场. 最后,通过对内导体结构的调整,适当增大慢波结构末端对微波的反射,提高慢波结构的  $Q$  值,增大慢波结构和调制电子束之间的耦合阻抗. 另外,根据文献<sup>[10]</sup>,内导体的引入可以增大器件能传输的空间电荷限制电流,传输的相对论电子束流强增大,实现器件的高功率、高效率运行.

本器件还采用了非均匀慢波结构来增大调制电子束与慢波结构之间的耦合阻抗. 随着调制电子束的部分动能在慢波结构的前段转化为微波能量,调制电子束的速度减慢,有可能落入微波的加速相位内. 为了保证电子束仍处于微波的减速相位内,必须对慢波结构后段进行改变,减慢微波的相速度.

### 3. 粒子模拟结果及分析

图 3 给出了谐振反射腔的传输系数曲线,从中可以看出谐振反射腔对频率为 8.8 GHz 的工作模式有较高的反射,同时对其他频率的电磁波反射系数较低,提高工作模式的  $Q$  值,从而实现模式选择. 图 4 给出了慢波结构的色散曲线,同时绘出了能量为 1.1 MeV 的电子束线,二者的交点位于返波区的  $7\pi/8$  模附近,频率为 8.8 GHz. 从传输曲线和色散

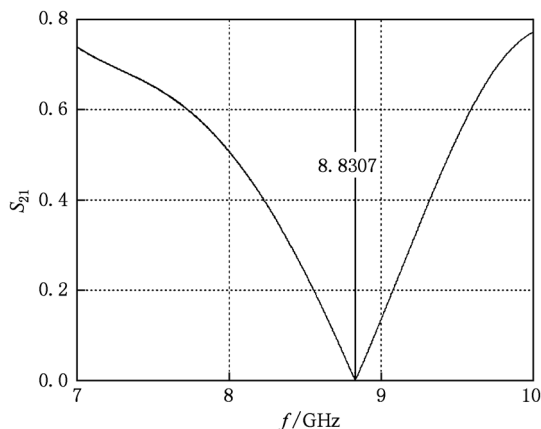


图 3 谐振反射腔的传输曲线

曲线可以看出,器件确实工作在频率为 8.8 GHz 的返波区.

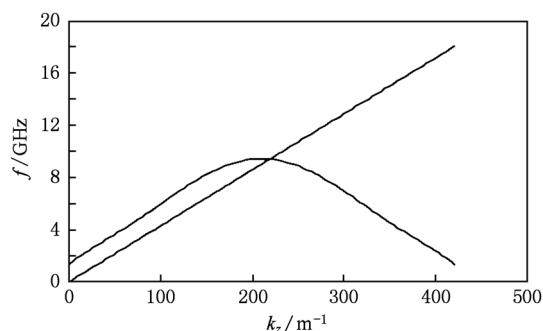


图 4 慢波结构的色散曲线

图 5 给出了沿电子束路径的  $E_z$  场分布. 从图中可以看出,谐振反射腔和内导体前端确实形成了一个准谐振腔,对电子束进行预调制. 图 6 给出了某一时刻沿轴向的调制电流,可以看出在准谐振腔末端,电子已得到调制,然后通过慢波结构前段对电子束进行充分调制,最后由慢波结构后段提取电子动能. 另外,从图 5 还可以看出,在慢波结构的末端,电场强度  $E_z$  一直为正,这样更有利于提取电子束的剩余动能,提高器件的束波转换效率.

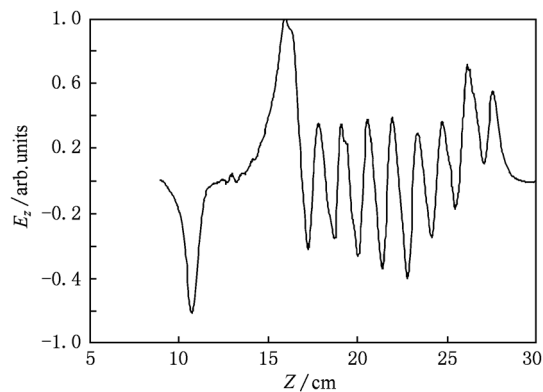


图 5 沿电子束路径的  $E_z$  场分布

如前所述,为了提高器件的束波转换效率,必须使电子保持在微波场的减速相位,充分提取电子的动能,因此必须随着电子的减速,调整慢波结构后段的参数. 图 7 为电子的相空间图,从中可以看出通过对慢波结构后段参数的两次调整,电子动能得到了充分的提取.

图 8 和图 9 分别为模拟得到的输出微波幅值及微波电场的频谱. 可以看出,输出微波功率为 10.4 GW,频率 8.8 GHz,器件的束波转换效率约为 47%.

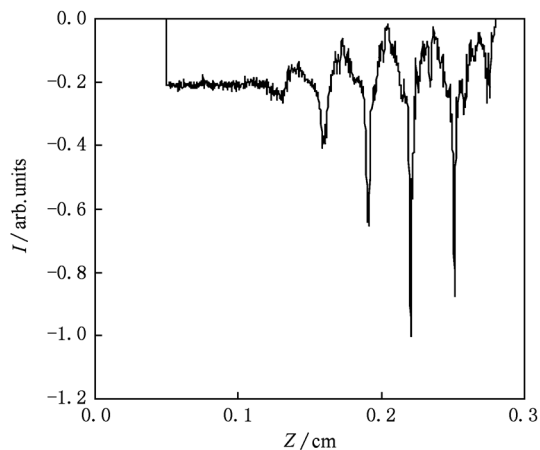


图6 沿 Z 向的调制电流

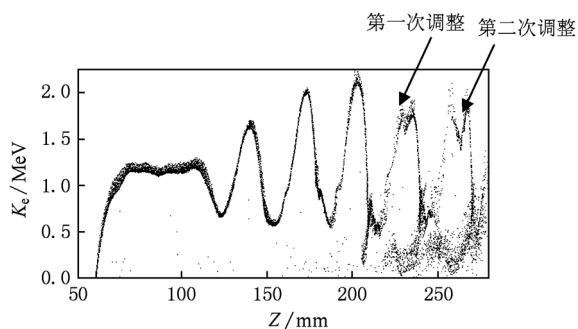


图7 电子的相空间图

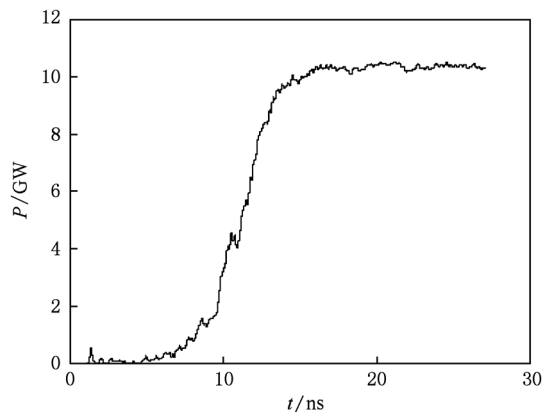


图8 输出微波功率幅值

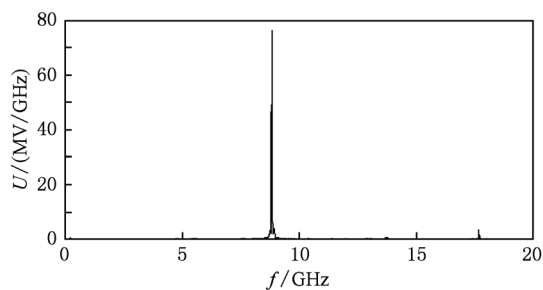


图9 输出微波电场的频谱

## 4. 结 论

结合现有高功率微波器件的优点,设计了一个

X 波段高功率微波器件,通过添加一个同轴内导体,并采用非均匀慢波结构的过模结构,使器件具有高功率输出和高束波转换效率的优点. 当电子能量和束流分别为 1.3 MeV 和 17 kA 时,得到频率为 8.8 GHz、功率为 10.4 GW 的微波输出,器件的束波转换效率约为 47%.

- [1] Korovin S D, Mesyats G A, Pegel I V, Polevin S D, Tarakanov V P 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **28** 2691
- [2] Xiao R Z, Chen C H, Zhang X W, Sun J 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 052206
- [3] Korovin S D, Kurkan I K, Rostov V V 1999 *Radio Phys. Quantum Electron* **42** 1047
- [4] Li Z H 2008 *Appl. Phys. Lett.* **92** 054102
- [5] Li X Z, Wang J G, Tong C J, Zhang H 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 4613 (in Chinese) [ 李小泽、王建国、童长江、张 海 2008 物理学报 **57** 4613 ]
- [6] Bugaev S D, Cherepenin V A, Kanavets V I, Klimov A I, Kopenkin A D, Koshelev V I, Popov A V, Slepov A I 1990 *IEEE Trans. Plasmas Sci.* **18** 525
- [7] Lemke R W, Clark M C, Marder B M 1994 *J. Appl. Phys.* **75** 5423
- [8] Zhang Y J, Meng F B, Fan Z K, Luo X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 976 (in Chinese) [ 张运俭、孟凡宝、范植开、罗 雄 2008 物理学报 **57** 976 ]
- [9] Li Z H, Qi Y 2008 *Phys. Plasmas* **15** 093104
- [10] Liu G Z, Xiao R Z, Chen C H, Shao H, Hu Y M, Wang H J 2008 *J. Appl. Phys.* **103** 093303

## Design of X-band backward wave oscillator with 10 GW output power\*

Ma Qiao-Sheng<sup>†</sup> Jin Xiao Xu Ming Li Zheng-Hong Wu Yang

(*Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China*)

(Received 14 July 2010; revised manuscript received 28 December 2010)

### Abstract

An efficient high power relativistic backward wave oscillator (RBWO) is designed. To enhance the beam-wave conversion efficiency and output power, an overmoded slow wave structure (SWS) is used and an inner conductor is inserted into the SWS. When electron energy is 1.3 MeV while the beam current is 17 kA, the simulated output microwave power is 10.4 GW at 8.8 GHz frequency for the RBWO.

**Keywords:** inner conductor, backward wave oscillator, overmoded slow wave structure

**PACS:** 52.35.-g, 52.35.Mw

---

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China.

<sup>†</sup> E-mail: mqshcaep@yahoo.com.cn