

# 具有反射器的绕射辐射振荡器的模拟研究

高喜, 杨梓强, 兰峰, 史宗君, 梁正

(电子科技大学物理电子学院 成都 610054)

**【摘要】**分析了具有反射器的8 mm波段相对论绕射辐射振荡器, 其高频系统为周期盘荷慢波结构, 并且在电子注的输入端加有圆柱形同轴反射器。利用HFSS软件计算 $S_{11}$ 参数来确定反射器的结构尺寸。对该结构进行了PIC模拟, 分析了该结构中注波相互作用的非线性过程和反射器对该器件性能的影响。研究发现存在一个最佳反射器的位置, 使注波相互作用的效率高、频谱好。

**关键词** 相对论绕射辐射振荡器; 反射器; HFSS软件; 粒子模拟  
**中图分类号** O413; TL56 **文献标识码** A

## PIC Simulation of Relativistic Diffraction Generator with a Reflector

GAO Xi, YANG Zi-qiang, LAN Feng, SHI Zong-jun, and LIANG-Zheng

(School of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

**Abstract** A 8-millimeter-wave-band relativistic diffraction generator with a coaxial reflector is studied on this paper. High frequency system of the device is a slow-wave structure with a combination of rectangles and semicircles. A coaxial reflector is situated at the upstream entrance of the slow-wave structure. The parameter of reflector is obtained by calculating the  $S_{11}$  parameter by the software HFSS. The non-linear process of beam-wave interaction with the reflector is investigated on particle-in-cell (PIC) simulation. The result shows that there is the best location of the reflector, which makes the device have a maximum efficiency and single operation frequency.

**Key words** relativistic diffraction generator; reflector; HFSS software; particle-in-cell simulation

高功率微波源是高功率微波技术中的核心部分, 而绕射辐射振荡器就是一种重要的高功率毫米波源。近年来国内外对该器件进行了相关研究。文献[1-2]研究了该器件, 并在8 mm波段得到GW级的功率。文献[3-4]对谐振腔式反射器以及同轴反射器进行了研究。文献[5-6]对8 mm波段相对Orotron进行了理论和实验研究, 实验中得到了频率为 $(34.728 \pm 2)$  GHz、功率为100 MW、脉宽为15 ns的微波输出。在以前的研究工作中<sup>[6-7]</sup>, 由于束流输入端无反射截止结构, 功率有可能耦合到二极管区。为了改善相对论绕射辐射振荡器的性能, 本文提出在束流输入端采用同轴反射式结构。通过对具有反射器的短周期的盘荷结构进行研究, 得出了反射器对器件工作性能的影响。

## 1 高频结构的物理模型及色散特性

### 1.1 高频结构的物理模型

图1为本文研究的相对论绕射辐射振荡器模型。

其中,  $r$ 为波导半径;  $z$ 为盘荷的周期;  $t$ 为盘荷间的距离;  $h$ 为盘荷深度, 且 $r=19.8$  mm,  $z=3$  mm,  $t=1$  mm,  $h=1.98$  mm。

### 1.2 高频结构的色散特性

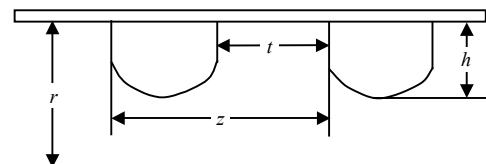


图1 高频结构图

由于该结构是一种过模结构, 因此, 结构中符合边界条件的各种模式都会存在。甚至还存在各种混合模式, 如HE模和EH模。考虑到只要调节好电子注位置, 混合模式就比较容易抑制, 产生的辐射模式主要是 $TM_{01}$ 、 $TM_{02}$ 、 $TM_{03}$ 、 $TM_{04}$  4种对称模式, 图2给出了 $TM_{01}$ 、 $TM_{02}$ 、 $TM_{03}$ 、 $TM_{04}$  对称模式的色散曲线<sup>[8-9]</sup>。其中直线为电压在480 kV对应的电子的色散曲线, 方框所对应的是利用仿真软件HFSS计算得到的冷腔谐振点。

收稿日期: 2006-11-03; 修回日期: 2007-05-22

基金项目: 国家自然科学基金(60178011)

作者简介: 高喜(1976-), 男, 博士, 主要从事高功率微波方面的研究。

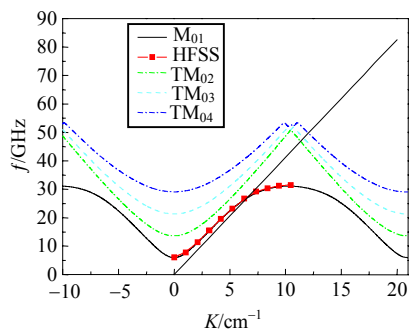
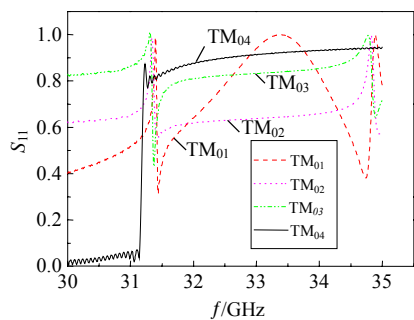


图2 盘荷结构的色散曲线

## 2 反射器的结构尺寸

由Floquet定理<sup>[10]</sup>可知该结构中的场可表示为各次空间谐波的叠加。电子注与-1次空间谐波同步相互作用,注波交换能量,由于-1次空间谐波及基波的群速为负,即能量逆着电子注方向传播,如果在电子注的注入端无反射器,微波能量将耦合到电子注区域,使顺电子注方向的输出功率减少。为此,本文提出在高频结构中电子注的输入端增加反射器,由于高频结构为过模波导,因此考虑采用同轴式的反射器。利用HFSS高频仿真软件对同轴式反射器进行仿真。同轴式反射器必须要使电子注无截止地通过,同时考虑盘荷结构的高度,因此其外半径必须小于16 mm。基于此,本文计算得到反射器的结构参数为: $R=14$  mm,  $L=40$  mm。图3为该参数下对 $TM_{01}$ 、 $TM_{02}$ 、 $TM_{03}$ 及 $TM_{04}$  4种模式的 $S_{11}$ 参数模拟计算结果。从图中可以看出,当频率在30~31 GHz之间时,反射器对 $TM_{03}$ 模的反射系数最大;当频率在31.5~35 GHz之间时,总的说来 $TM_{04}$ 模的 $S_{11}$ 参数比较大。

图3  $S_{11}$ 参数图

## 3 粒子模拟

前面对冷腔的色散曲线以及反射器对几种对称模式的反射系数进行了分析。下面利用PIC模拟方法对高频结构中注波相互作用的非线性过程进行分析。

图4为PIC模拟结构图,图中包含:(1)阴极;(2)反射器;(3)间隙;(4)慢波系统。电子注的各

参量分别为:电压480 kV,电流5.5 kA,电子注离慢波系统表面2 mm,轴向引导磁场为1.4 T,电子注厚度约2 mm。其中间隙(3)对电子注起预调制的作用。

### 3.2 模拟结果分析

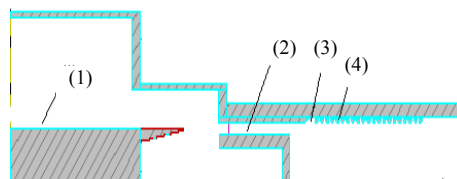


图4 模拟结构图

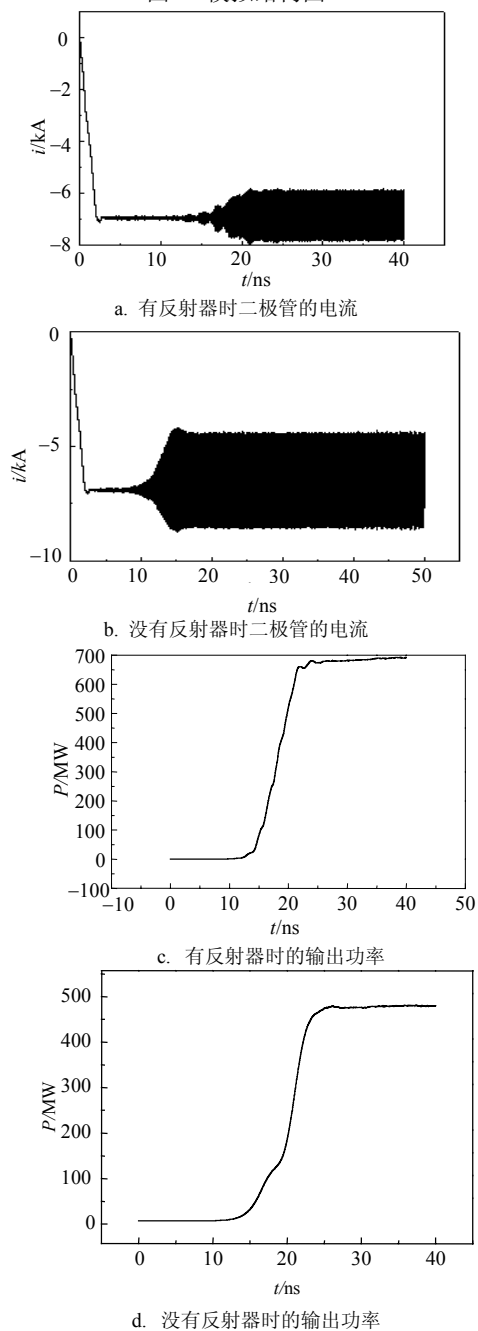


图5 有反射器和没有反射器的模拟结果

为了研究反射器对器件工作性能的影响,对没有反射器和有反射器两种情况的模拟结果进行了比较。首先固定其他参数,只考虑有无反射器的情况,图5为模拟结果。其中,图5a、图5c为有反射器的计算结果,图5b、图5d为没有反射器的计算结果。图5a、图5b为有反射器和没有反射器两种情况下二极管的电流发展情况,这种情况主要是由于电磁波进入二极管区,对电流进行调制而引起的。由图可看出:有反射器时二极管的电流调制比较小,而没有反射器时二极管的电流调制大得多,说明反射器对电磁波有较大的反射作用。从图5c、图5d不难发现,有反射器存在时其输出功率达到710 MW,比没有反射器时的输出功率要提高近200 MW。因此,在束流输入端加反射器会使器件的输出功率有较大幅度的提高。

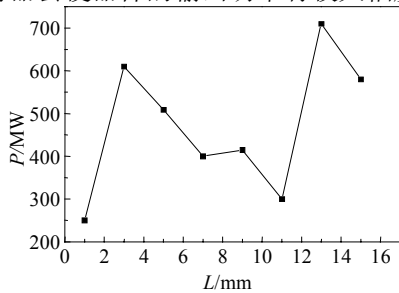


图6 输出功率随反射器位置变化关系

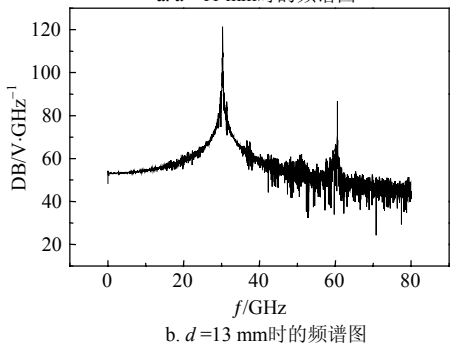
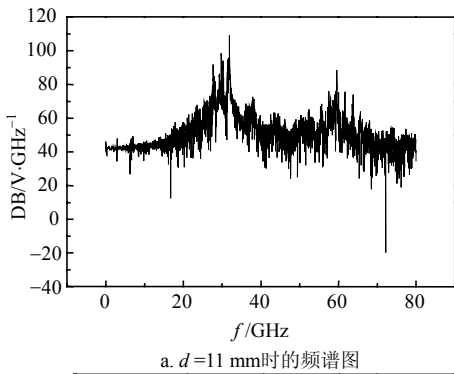


图7 不同反射器位置计算得到的频谱图

在PIC模拟研究中发现,改变反射器的位置对辐射功率和频率有较大的影响。图6为输出功率随反射器位置变化的关系图。由图可知,反射器与慢波系统第一个模片之间的距离(为方便设为 $d$ )为13 mm时,输出功率最大,器件工作效率最高;当 $d=1$  mm时,输出功

率最小,器件工作效率最低。 $d=13$  mm是反射器的最佳位置。

图7为反射器位置不同时的辐射频谱图(本文只讨论 $d=13$  mm和 $d=11$  mm两种情况)。从图中可以看出: $d=11$  mm时,频谱很差,存在很多寄生振荡模式,出现了严重的模式竞争现象;而 $d=13$  mm时,频谱图要好得多。为了分析反射器位置影响辐射功率和频率的物理机理,本文研究了慢波系统中第一个腔体中电子的群聚状态。图8为30~30.2 ns之间电子的群聚图。从图中可以看出:当 $d=13$  mm时,电子群聚较好,电荷群聚密度高,谐波分量小,因此注波相互作用效率高。当 $d=11$  mm时,电子群聚很差,谐波分量小,使得注波相互作用效率低。

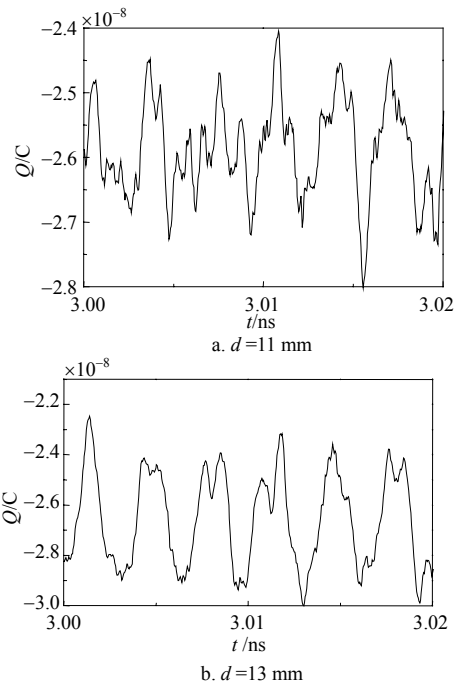


图8 反射器位置不同时慢波系统第一个腔体中电子随着时间的变化图

为了分析器件的工作模式,在高频结构输出端的光滑波导中任意横截面上观察 $E_z$ 沿 $r$ 方向的变化,结果如图9所示。从理论上讲,在圆波导中TM模式的 $E_z$ 场随 $r$ 的变化关系为: $E_z = T^2 U_0 J_n(T\rho) \times \cos n\phi e^{-j\beta z}$ ,对于对称的TM模式来说, $n=0$ ,在圆波导中的某一固定横截面,归一化的 $E_z$ 沿 $r$ 方向按零阶Bessel函数分布,图中圆点线为 $TM_{04}$ 模的 $E_z$ 随 $r$ 的变化关系。通过比较发现,模拟结果与理论计算结果在趋势上基本一致,说明器件工作模式的主模可能为 $TM_{04}$ 模,但是两条曲线并不完全重合,因此可能存在一些寄生振荡模式。这种大口径浅褶皱的过模结构波导,要实现器件的完全单模运行确实是比较困难的,因此对这种结构还有待于进一步研究。

(下转第420页)

Physics Letters, 2004, 388: 479-482.

- [7] LI Shu-guang, LIU Xiao-dong, HOU Lan-tian. The study of waveguide mode and dispersion property in photonic crystal fibers[J]. Acta Physica Sinica, 2003, 52(11): 2811-2817.
- [8] LIAO Yan-biao. Fibers optics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [9] KNIGHT J C, ARRIAGA J, BIRKS T A, et al. Anomalous

dispersion in photonic crystal fiber[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2000, 12(7): 807-809.

- [10] LOU Shu-qin, Fang Hong, Jian Shui-sheng. Polyethylene photonic crystal fibers as terahertz waveguides[J]. Proc of SPIE, 2005, 601941.1-601941.5.

编辑 税红

(上接第413页)

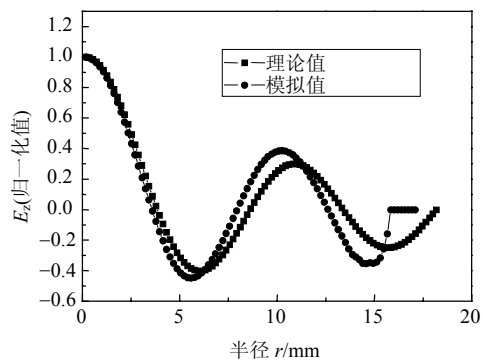


图9  $E_z$ 在 $r$ 方向的变化关系

## 4 结论

本文利用高频仿真软件和粒子模拟的方法对具有反射器的相对论绕射辐射振荡器进行了分析。结果表明,反射器对频率在31.5~34.5 GHz的对称模式具有较好的反射作用。粒子模拟发现,选择合适的反射器位置,器件输出功率及效率能得到有效提高。在反射器处于最佳位置时,慢波结构腔中的电子群聚电荷密度高,谐波分量小,因此效率高,频谱好。

### 参考文献

- [1] BUGAEV P S, CHEREPENIN V A, KANAVETS V I, et al. Investigation of a millimeter-wavelength-range relativistic diffraction generator[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 1990, 2(1): 518-524.

- [2] BUGAEV S P, VLASOV A N, KANAVETS V I, et al. Relativistic diffraction oscillators in the millimeter-wave region[J]. Radiotekhnika i elektronika, 1990, 11: 21-28.
- [3] 范菊平, 刘国治, 陈昌华, 等. 带有反射腔的相对论返波管初步实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2001, 13(3): 349-352.
- [4] VLASOV A N, SHKVARUNETS A G, RODGERS J C, et al. Over moded GW-class surface-wave microwave oscillator[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2000, 28(3): 550-560.
- [5] 李家胤, 于善夫, 李明光, 等. 8毫米相对论行波管的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1990, 2(1): 114-121.
- [6] 王浩英, 杨梓强, 史宗君, 等. 毫米波段高功率绕射辐射振荡器的研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(8): 1159-1162.
- [7] 王浩英, 梁正, 杨梓强. 高功率毫米波绕射辐射振荡器高频特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(4): 489-492.
- [8] WANG Hao-ying, YANG Zi-qiang, ZHAO Lin-xin, et al. Numerical computation of dispersion curves for symmetric and asymmetric modes in an arbitrary cylindrical metal SWS[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2005, 33(1): 111-118.
- [9] WANG Hao-ying, ZHENG Liang, YANG Zi-qiang. Interaction of electron beams with electromagnetic waves in cherenkov devices[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2005, 539: 37-34.
- [10] 张克潜, 李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 第2版. 北京: 电子工业出版社, 2001.

编辑 张俊