

文章编号: 1001-4322(2008)12-2055-04

# 一种新型结构低阻抗渡越辐射振荡器\*

曹亦兵, 贺军涛, 张建德

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 设计了一种不加栅网结构的低阻抗渡越辐射振荡器器件, 器件阻抗为  $20 \Omega$  左右, 采用同轴输出, 具有所需导引磁场小、起振时间较快等优点, 可望工作在重频和长脉冲状态。PIC 粒子模拟表明, 在输入电压和电流分别为  $550 \text{ kV}$  和  $27.6 \text{ kA}$ 、约束磁场为  $0.8 \text{ T}$  的条件下, 在 S 波段  $3.175 \text{ GHz}$  得到了平均功率大约  $4.0 \text{ GW}$  的微波输出, 束-波转换效率为  $26.4\%$ 。

**关键词:** 高功率微波; 渡越辐射振荡器; 阻抗; 同轴结构

**中图分类号:** TN752 **文献标志码:** A

渡越辐射振荡器是基于电子束渡越时间不稳定性的一种器件。近年来, 基于轴向渡越时间效应的高功率微波源器件的研究<sup>[1-2]</sup>取得了令人鼓舞的成果, 但不足之处主要在于: 由于这类器件的二极管阻抗高(普遍大于  $100 \Omega$ ), 限制了输入电子束的功率, 从而最终影响了器件的输出微波功率的进一步提高。因此, 如何降低器件的二极管阻抗, 提高输入电子束的功率, 同时又能保证高阻抗器件所具有的高效率的特点, 是这类器件实际应用的关键。本文提出了一种新型同轴结构的低阻抗渡越辐射振荡器(LITRO), 该器件采用双盘荷波导结构, 与加栅网结构的低阻抗渡越器件相比, 该器件可望工作在重频和长脉冲状态<sup>[3]</sup>。文章对该器件的工作特性进行了理论分析和 PIC 模拟, 得到了一些规律性认识。

## 1 理论分析

### 1.1 模型分析

双腔渡越辐射振荡器模型如图 1 所示, 主要由环形阴极、双腔调制结构以及电子收集极三部分组成。环形阴极发射的电子束在约束磁场的作用下纵向运动, 经过双腔调制结构区域时在腔内激励起高频驻波场, 高频驻波场反过来作用后进入腔体的电子束, 从电子束中吸收能量直至腔内高频场达到饱和。饱和后的高频电磁场与电子束之间不再发生净的能量交换, 而只是对后续电子束进行速度调制, 经过一段距离的漂移, 速度调制进一步转化为密度调制, 在提取腔处激励起高功率微波, 由同轴结构向外围空间辐射。

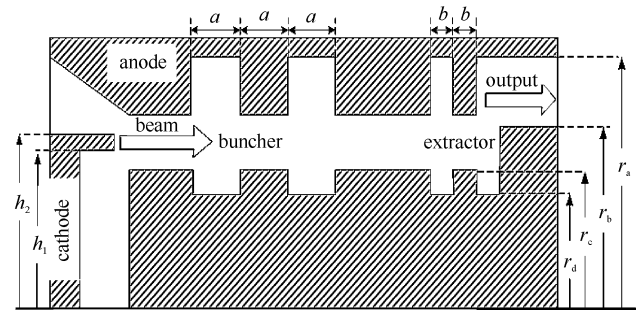


Fig. 1 Structure of LITRO

图 1 低阻抗渡越辐射振荡器结构图

图 1 所示双腔结构中, 每个电磁模式都可能存在 0 模和类  $\pi$  模两种模式<sup>[4]</sup>, 而类  $\pi$  模由于在各腔体中依次反向, 所以对电子束的调制最强, 最容易激励起高功率微波。同轴结构不仅有利于降低器件阻抗, 也有利于增大空间极限电流<sup>[5]</sup>, 双腔提取结构有利于高功率微波的提取<sup>[6]</sup>。此外, 该结构由于去除了栅网, 有利于器件工作在重频和长脉冲状态。然而, 由于去除了栅网结构而可能导致腔体内激励起的微波部分向左端泄漏, 在 PIC 粒子模拟中, 我们将考虑到这种情况。

### 1.2 高频特性分析

因为腔体结构的轴对称性, 在腔体中我们主要考虑的是轴对称的 TM 模式。考虑到  $\text{TM}_{01}$  为其中的最低模式, 在模式竞争中处于优势, 而且我们可以通过调整结构参数来抑制或减弱高次模, 保证电子束尽可能地与  $\text{TM}_{01}$  模式作用, 通过谐振的色散来计算最低模  $\text{TM}_{01}$  工作在类  $\pi$  模模式下的工作频率, 取  $k_z p = \pi$  (其中  $k_z$  为腔体中激励起电磁波的相移常数,  $p$  为慢波结构空间周期,  $p = 2a$ ), 将谐振腔的几何参数代入色散关系公式<sup>[7]</sup>

\* 收稿日期: 2008-03-12; 修订日期: 2008-10-08

基金项目: 国家高技术发展计划项目

作者简介: 曹亦兵(1983—), 男, 硕士, 目前主要从事高功率微波源器件的理论和模拟研究; caoyibing\_1983@163.com。

$$\frac{I_1(\gamma r_c)}{K_1(\gamma r_c)} \frac{\frac{k}{F(kr_d, kr_c)} - \gamma \frac{I_0(\gamma r_c)}{I_1(\gamma r_c)}}{\frac{k}{F(kr_d, kr_c)} + \gamma \frac{K_0(\gamma r_c)}{K_1(\gamma r_c)}} = \frac{I_1(\gamma r_b)}{K_1(\gamma r_b)} \frac{\frac{k}{F(kr_a, kr_b)} - \gamma \frac{I_0(\gamma r_b)}{I_1(\gamma r_b)}}{\frac{k}{F(kr_a, kr_b)} + \gamma \frac{K_0(\gamma r_b)}{K_1(\gamma r_b)}} \quad (1)$$

由此可以算出工作频点  $f$ 。式中： $\gamma^2 = k_z^2 - k^2$ ,  $k = 2\pi f \sqrt{\mu\epsilon}$ ；函数  $F(x, y)$  的表达式为  $F(x, y) = \frac{Y_0(x)J_1(y) - J_0(x)Y_1(y)}{Y_1(x)J_0(y) - J_0(x)Y_0(y)}$ 。

## 2 数值模拟

### 2.1 腔体冷测和小信号理论

在没有电子束参与的情况下进行冷腔本征模测试,可得到各种模式的本征频率。如图 1 所示,在选取结构参数为  $r_a=8.0$  cm,  $r_b=6.0$  cm,  $r_c=4.0$  cm,  $r_d=3.0$  cm,  $a=1.8$  cm,  $h_1=4.8$  cm,  $h_2=5.4$  cm 时,用 SUPER-FISH 程序计算得到了电子束中心轴线  $r=5.1$  cm 上的纵向电场类  $\pi$  模的分布情况,如图 2 所示。对应工作频点为 3.001 GHz,而根据公式(1)得到的工作频率数值解为 3.295 GHz,理论和模拟存在一定的差异,这是因为理论公式假定同轴线无限长,而模拟时的两腔结构谐振频率受到两端漂移段长度的影响。此外,通过曲线拟合得到电子束中心轴线上纵向电场  $E_z$  的变化情况如图 3 所示。模拟发现,纵向电场  $E_z$  的归一化曲线几乎不随漂移段长度的变化而变化,这是因为漂移段内对应的  $TM_{01}$  模的截止频率为 7.49 GHz<sup>[8]</sup>,器件的工作模式在漂移段截止,腔体内激励起的  $TM_{01}$  主要限制在双腔调制区域内。

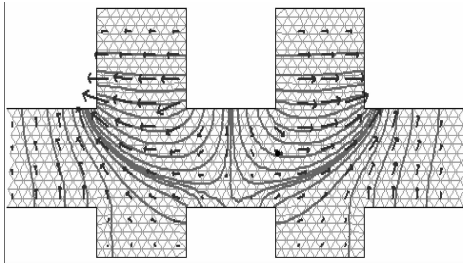


Fig. 2  $E$  distribution of  $\pi$ -like mode

图 2 类  $\pi$  模电场分布图

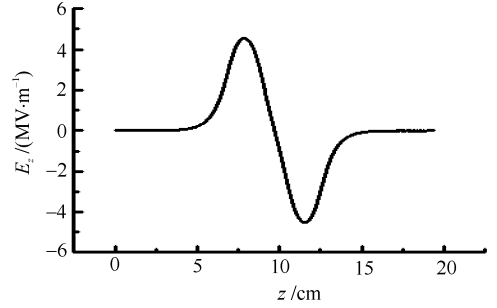


Fig. 3  $E_z$  distribution of mid-beam

图 3 束中心线上  $E_z$  的变化情况

根据电子束与微波场相互作用的小信号理论,有下面的重要公式<sup>[9-10]</sup>:

$$M(k_z) = \frac{1}{d} \int_{-\infty}^{+\infty} f(z) [\cos(k_z z) + j \sin(k_z z)] dz = M_1 + j M_2 \quad (2)$$

$$G_e/G_0 = 0.25 k_z d |M|^2 / \partial k_z \quad (3)$$

式中: $f(z)$ 为电子束中心轴线上纵向电场的归一化分布函数,由曲线拟合得到; $k_z$ 为微波场相移常数; $d$ 为电子束通过的作用区域距离。 $G_e/G_0$ 表示电子束归一化电导率,取值为负时表示电子束向微波场传递能量,使微波场得到增长,负得越多微波场增长越大,越有利于产生高功率微波;归一化电导取值为正时器件无法工作。

对于所选模型得到的电子注归一化电导  $G_e/G_0$  与  $k_z$  的关系如图 4 所示,显然器件的工作范围为图中所示的 AC 区域,最佳工作点对应为 B 点。按照文献[6]中相同的分析方法,得到器件工作范围大于 481 kV。需要说明的是,随着器件工作电压的不断升高,电子束速度也不断增大,由束波同步条件得到的波矢将从图中右端向左端移动,但由计算可知,对应 C 点的工作电压要求电子超光速运行,这是不可能实现的,所以器件不存在最佳工作点。理论上,电压越高,工作点越靠近 C 点,束-波作用越强。

值得注意的是,由于小信号理论的局限性,它只能对我们的研究提供一定的参考。器件的电压工作范围还受到其它各种因素的制约,如场击穿、空间极限电流等。

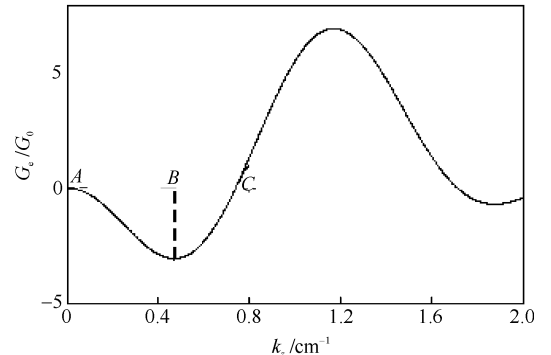


Fig. 4 Normalized conductivity  $G_e/G_0$  vs phase shift  $k_z$

图 4 归一化电导与相移常数  $k_z$  的关系图

## 2.2 PIC 粒子模拟

由于小信号理论得到的器件电压工作范围大于 481 kV, 实际模拟时我们尝试在 500~600 kV 之间优化结构参数, 以便得到尽可能高的微波功率输出。通过反复优化图 1 所示结构, 在输入电压为 550 kV, 自洽输入电流为 27.6 kA 时(器件阻抗为 20.0  $\Omega$ ), 得到了大约 4.0 GW 的微波功率输出, 束波转换效率为 26.4%, 工作频点为 3.175 GHz, 约束磁场 0.8 T, 双腔提取结构间隙宽 1.2 cm。从图 5 可以看出, 器件起振时间较快, 在 10 ns 左右。

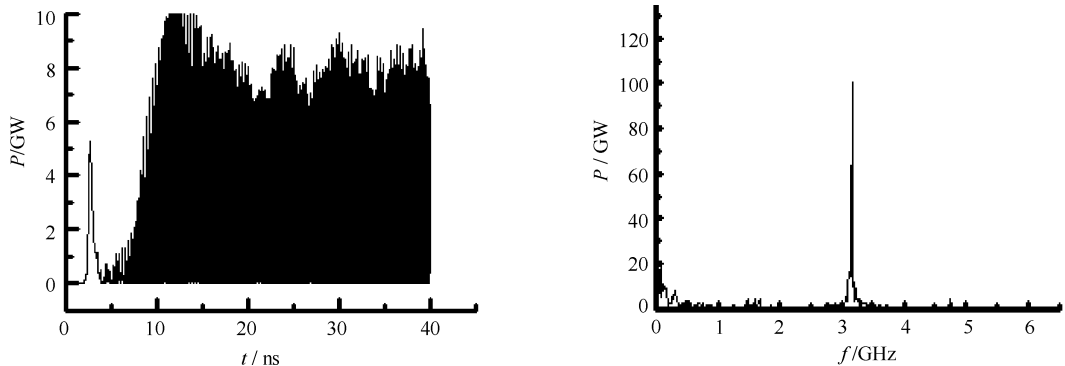


Fig. 5 Power waveform and spectrum of output microwaves

图 5 输出微波功率波形和频谱

电子的相空间图如图 6 所示。可以看出, 从阴极发射出来的电子束, 在二极管区域被加速, 又在两腔调制腔腔体结构模的作用下依次加速和减速, 经过一段距离的漂移和双腔提取结构的进一步调制, 最后被电子收集极收集。图中未出现虚阴极的现象。

分析电子束的电流频谱图可以发现, 在电子束刚离开双腔调制区域时, 电子束的一阶电流调制系数  $m$  为 0.42(见图 7), 经过一段时间的漂移后, 一阶电流调制系数加深(见图 8), 这是速度调制进一步向密度调制转化的结果。在经过双腔提取结构后靠近收集极处一阶电流调制系数增大到 0.68(见图 9), 双腔提取结构对电子束的调制作用明显。此外不难看出, 随着一阶调制的加深, 二阶调制系数有明显减弱的趋势, 这说明随着一阶调制的加深, 高阶振荡受到抑制。

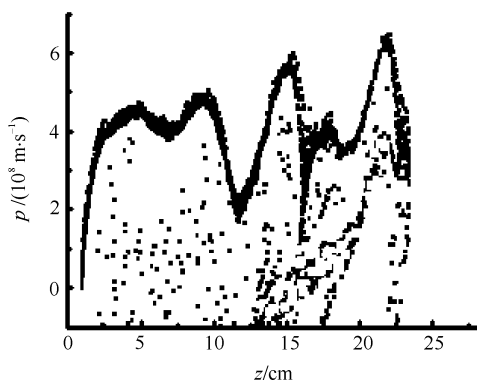


Fig. 6 Phasespace for all particles at 39.989 ns

图 6 在 39.989 ns 时刻粒子相空间图

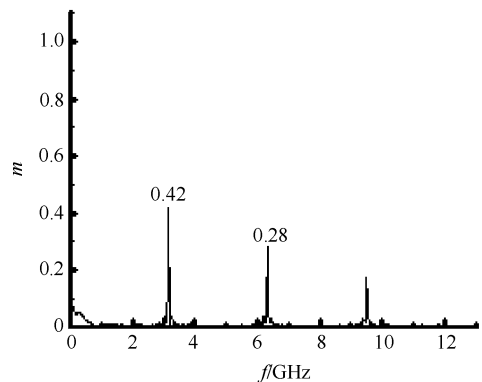


Fig. 7 Spectrum of current at the end of buncher

图 7 两腔末尾处电流频谱图

通过观察分析腔体中的电磁场分布, 可以判断电磁场工作在  $TM_{01}$  模。通过优化腔体结构参数以保证尽可能高的输出功率的情况下, 观察各腔内  $E_z$  电场的分布可以发现器件工作在类  $\pi$  模。通过监测阴极前面的功率流和功率流谱不难发现, 功率流未发生明显的振荡, 功率谱基本只有直流分量, 这说明模拟中腔体内微波场未向左泄漏。

此外, 我们发现电子束厚度由 0.6 cm 增加到 1.0 cm 时, 器件的输出微波功率明显增加。通过这种方法, 我们在输入电压为 510 kV、电流为 32.5 kA 时(器件阻抗为 15.7  $\Omega$ ), 得到了大约 5.0 GW 的平均功率输出, 束波转换效率达到 30.2%, 这说明在器件允许的正常工作范围内, 适当增加电子束的厚度有利于提高微波输出功率。

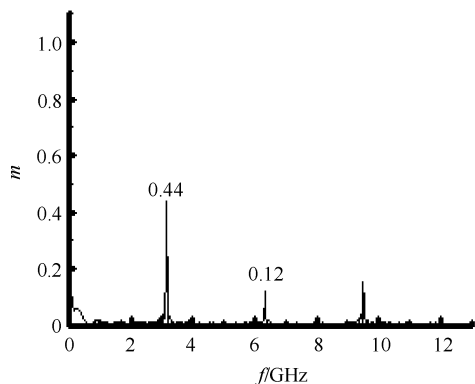


Fig. 8 Spectrum of current before the two-cavity extractor

图 8 两腔提取结构前电流频谱图

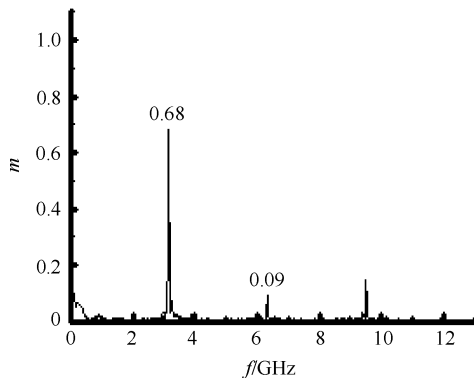


Fig. 9 Spectrum of current before the collector

图 9 收集极前电流频谱图

### 3 结 论

本文提出了一种新型结构的低阻抗渡越辐射振荡器,该器件允许较大的输入电流和输入功率。在输入电压和电流分别为 550 kV 和 27.6 kA、约束磁场为 0.8 T 的条件下,在 S 波段 3.175 GHz 得到了平均功率大约 4.0 GW 的微波输出,束波转换效率为 26.4%。该器件所需导引磁场小、起振时间较快,可望工作在重频和长脉冲状态,比栅网结构的低阻器件具有更加光明的应用前景。

### 参 考 文 献:

- [1] Barroso J J, Kostov K G. Design facts in the axial monotron [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2000, **28**:652-656.
- [2] 贺军涛. 新型渡越时间振荡器的研究[D]. 长沙:国防科技大学,2004:59-75. (He J T. Investigation on novel transit-time oscillators. Changsha: National University of Defense Technology, 2004: 59-75)
- [3] Benford J, Benford G. Survey of pulse shortening in high-power microwave sources[J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 1997, **25**: 311-317.
- [4] 范植开,刘庆想,刘锡三,等. 三腔渡越管振荡器高频结构的解析研究[J]. *强激光与粒子束*, 2000, **12**(4):491-496. (Fan Z K, Liu Q X, Liu X S, et al. Analytic research on the high frequency structure of the three-cavity transit-time tube oscillator. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, **12**(4):491-496)
- [5] 肖仁珍,刘国治,林郁正,等. 同轴慢波结构相对论高功率微波产生器理论分析[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(2):241-244. (Xiao R Z, Liu G Z, Lin Y Z, et al. Analytic theory of relativistic high power microwave generator with coaxial slow wave structure. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(2):241-244)
- [6] 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,2007:138-141. (Zhou C M, Liu G Z, Liu Y G, et al. High power microwave source. Beijing: Atomic Energy Press, 2007:138-141)
- [7] 刘盛纲. 微波电子学导论[M]. 北京:国防工业出版社,1985:276-278. (Liu S G. Introduction to microwave electronics. Beijing: National Defense Industry Press, 1985:276-278)
- [8] 张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论[M]. 北京:电子工业出版社,1994:298-302. (Zhang K Q, Li D J. Electromagnetic theory in microwaves and optoelectronics. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 1994:298-302)
- [9] 吴鸿适. 微波电子学原理[M]. 北京:科学出版社,1987. (Wu H S. Microwave electronic principles. Beijing: Science Press, 1987)
- [10] 何琥. X 波段六腔渡越辐射振荡器的理论和实验研究[D]. 北京:中国工程物理研究院研究生部,2003:8-13. (He H. Theoretical and experiment research of the X-band six-cavity TRO. Beijing: Graduate School of China Academy of Engineering Physics, 2003:8-13)

## Novel low-impedance transit-time radiation oscillator

CAO Yi-bing, HE Jun-tao, ZHANG Jian-de

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

**Abstract:** A novel foilless S-band low-impedance transit-time oscillator was designed. The impedance of this oscillator is about 20  $\Omega$ . Such an oscillator with coaxial structure has the advantages of low guide magnetic field and quick saturation time, expectantly operating repetitively and in a long-pulse state. As indicated by PIC simulations, the average power of output microwave is about 4.0 GW at the main frequency of 3.175 GHz with the input-diode voltage of 550 kV, the input-diode current of 27.6 kA, and the extra magnetic field of 0.8 T. Based on the simulation results, the power efficiency of microwave is about 26.4%, much better than that of a high-impedance transit-time radiation oscillator at the same input voltage.

**Key words:** high power microwave; transit-time radiation oscillator; impedance; coaxial structure