

文章编号:1001-2486(2004)03-0048-04

## 轴向提取反馈式虚阴极振荡器的结构设计与其特性\*

刘振祥,舒挺,张建德,钱宝良

(国防科技大学理学院,湖南长沙 410073)

**摘要:**为进一步提高虚阴极振荡器输出微波的功率和效率,同时为使其输出微波的频率更加稳定、模式更加单纯,设计了一种轴向提取的反馈式虚阴极振荡器,并利用粒子模拟方法分析了反馈装置对输出微波的影响,得到了一些规律性的认识。模拟结果表明,在相同的运行条件下,与不加反馈装置时的普通虚阴极振荡器相比,这种反馈式虚阴极振荡器的微波输出功率可以提高两倍以上,而且带宽窄、模式纯。

**关键词:**虚阴极振荡器;反馈;粒子模拟

**中图分类号:**TN128 **文献标识码:**A

## The Structure Configuration and Operation Characteristics of the Axially Extracted Vircator with a Feedback Annulus

LIU Zhen-xiang, SHU Ting, ZHANG Jian-de, QIAN Bao-liang

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** An axially extracted virtual cathode oscillator (vircator) with a feedback annulus is configured through particle-in-cell (PIC) simulation. And the effects of the feedback mechanism are studied through PIC method. The simulation results indicate that the new vircator can increase the output power more than two times compared with the conventional axially extracted vircator under the same condition. Besides it can narrow the bandwidth and purify the modes.

**Key words:** vircator; feedback; particle simulation

虚阴极振荡器以其结构简单、输出功率高、频率可调等优点而成为高功率微波源的首选器件之一,但它也同时存在束波转换效率低、频带较宽、多模并存、主频不稳定等缺点,促使人们不断地对它进行探索和改进<sup>[1-6]</sup>。利用谐振腔的锁频和锁模作用来进行改进是一种较为成功的方法<sup>[5]</sup>,它通过在腔体边缘上开孔来提取微波,但由于内部微波向外耦合效率较低,只有很少一部分微波能够提取出来。

### 1 反馈式虚阴极振荡器结构及运行过程分析

我们尝试提出了一种结构如图1所示的虚阴极振荡器。实际上就是在普通轴向提取虚阴极振荡器的下游波导管内加上了一个反馈环。反馈环的用途主要有两个:一是与波导管、阳极网构成谐振腔;二是用来吸收透射电子。虚阴极振荡产生的微波在波导管内传输的过程中,一部分被反馈回来,再调制虚阴极,使虚阴极振荡加强,束波相互作用也随之加强,从而提高了能量转换效率和输出功率,谐振腔的锁频和选模作用使输出微波的频率更加稳定,模式更加单纯;另外,反馈环吸收透射电子的作用也有利于提高微波输出功率(如图2)。

虚阴极是由圆对称发射的电子束在圆对称波导内形成的,轴向提取时的微波主模式为 $TM_{0n}$ 。可以通过调整二极管电压、电流或阴阳极间距,使虚阴极振荡的频率位于要求的范围(本文为C波段);为了实现单模输出,可适当选取波导半径,使之只传输 $TM_{01}$ 模,而截止其它高次模式。 $TM_{01}$ 模电场 $E_z$ 的绝对值沿径向在轴心处为极大值,沿轴向在腔体两底面处为极大值,所以对于轴向提取反馈式虚阴极振荡器

\* 收稿日期:2003-10-30

基金项目:国家863计划基金资助项目

作者简介:刘振祥(1967—),男,博士生,副教授。

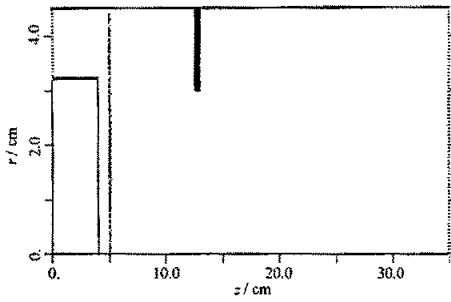


图1 改进后的虚阴极振荡器结构模型

Fig.1 Schematic of the improved vircator model

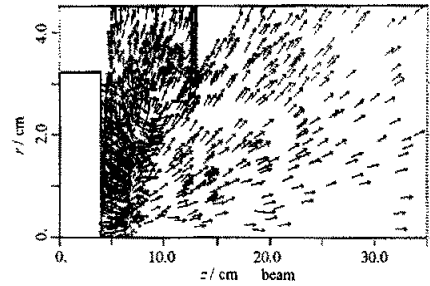


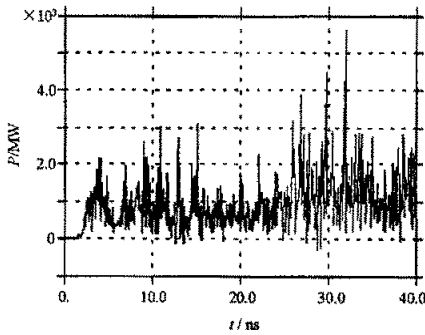
图2 反馈环吸收透射电子

Fig.2 The electron absorbing of the annulus

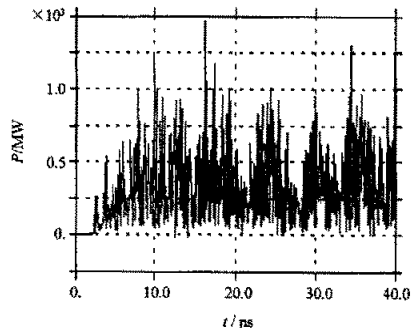
内的腔体来说,这种模式不但有利于虚阴极振荡电子与轴向电场的相互作用,而且有利于微波与下游波导的耦合。

虚阴极振荡在腔中产生微波并形成谐振场,如果谐振场的振荡与虚阴极振荡“合拍”,它会使虚阴极振荡得到加强。同时,这些微波与虚阴极电子发生作用,进行能量交换,而振荡的电子主要集中在阳极网附近(在阳极网下游,与阳极网的距离大约等于阴阳极间距),腔中虚阴极位置处的束波相互作用对提高束波转化效率和微波输出功率起着非常重要的作用。

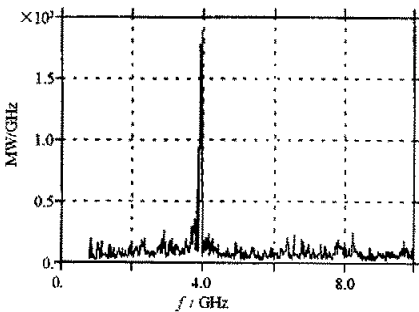
通过粒子模拟选定一套结构参数和二极管输入电压、电流参数:波导管半径  $R = 4.5\text{cm}$ ,反馈环的开



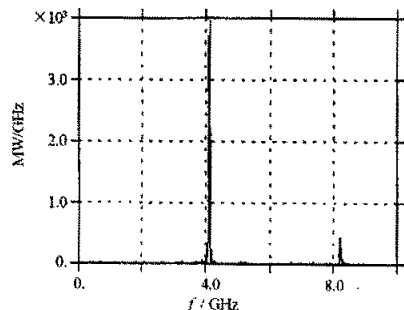
(a) 普通虚阴极振荡器输出功率随时间的变化( $\langle p \rangle = 94.004$ )



(b) 改进后的虚阴极振荡器输出功率随时间的变化( $\langle p \rangle = 335.808$ )



(c) 普通虚阴极振荡器的功率谱



(d) 改进后的虚阴极振荡器的功率谱

图3 普通虚阴极振荡器和改进型虚阴极振荡器的模拟结果

Fig.3 Simulation results of conventional vircator and the improved vircator

孔半径  $a = 3.0\text{cm}$ , 厚度  $c = 0.5\text{cm}$ ; 二极管电压  $U = 500\text{kV}$ , 电流  $I = 40\text{kA}$ 。固定以上参数, 只改变反馈环的位置, 粒子模拟结果发现, 当反馈环的位置在距阳极网  $7.8\text{cm}$  时, 腔体内的微波谐振场与虚阴极振荡“合拍”, 此时输出微波的平均功率为  $335\text{MW}$ (图 3(b)), 而不加反馈时只有  $94\text{MW}$ (图 3(a)), 说明反馈装置对提高输出功率起了很明显的作, 而且相对普通虚阴极而言, 输出微波的带宽窄、模式纯(图 3(c)、(d))。

## 2 反馈环几何参数对微波输出功率的影响

### 2.1 反馈环开孔的大小对输出功率的影响

仍然采用以上参数, 只改变开孔半径的大小, 通过模拟得到图 4 所示的结果。可以看出, 当开孔过大时, 输出功率提高不明显, 这是因为微波反馈不足, 因而不能有效地对虚阴极和电子束进行调制; 当开孔太小时又因反馈环阻碍了微波向下游耦合传输而不能有较高的微波输出。只有当开孔大小恰当时, 微波的输出功率才有最大值。

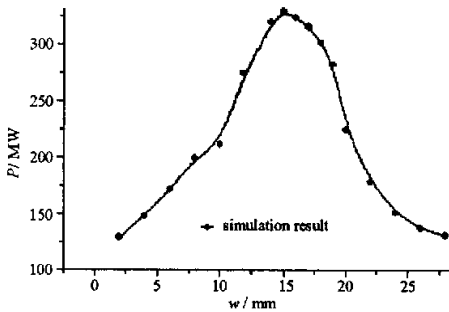


图 4 微波输出功率随反馈环宽度变化情况  
Fig.4 The output power vs. the width of the annulus

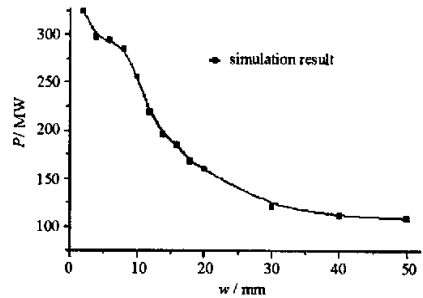


图 5 微波输出功率随反馈环厚度变化情况  
Fig.5 The output power vs. the thickness of the annulus

### 2.2 反馈环厚度对输出功率的影响

图 5 是只改变反馈环的厚度时通过模拟得到的结果, 说明反馈环越薄越有利于微波传输。但考虑到器件在运行过程中, 要经常受到电子束的轰击, 如果将反馈环做得太薄, 就会影响运行的稳定性, 而且也会给加工、安装器件带来困难。

## 3 参数优化结果

在这里, 我们根据现有的条件并通过粒子模拟筛选给出了一组参数: 二极管电压  $U = 600\text{kV}$ , 电流  $I = 50\text{kA}$ , 阴阳极间距  $d = 1.1\text{cm}$ , 反馈环耦合口大小  $a = 3.0\text{cm}$ , 厚度  $c = 3\text{mm}$ 。为做到 C 波段单模输出, 波导半径保持不变。根据这组参数, 模拟结果如图 6 所示。

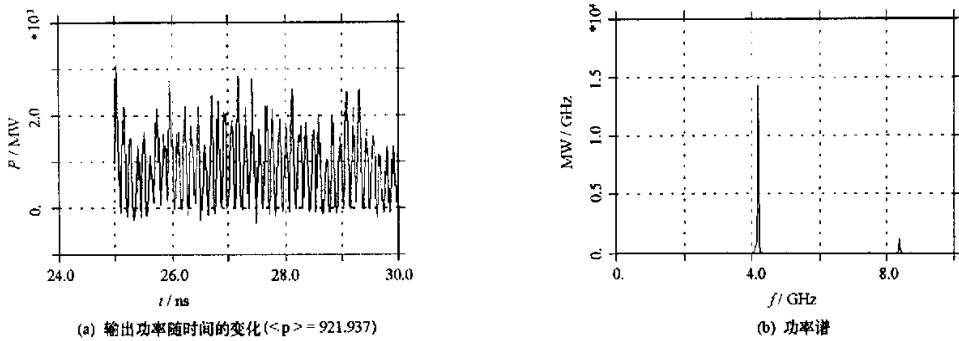


图6 优化参数后的模拟结果

Fig. 6 The simulation results for the optimized configuration

#### 4 结论

模拟结果表明,和普通虚阴极相比,这种轴向提取的反馈式虚阴极振荡器不但能够大幅度地提高微波输出功率,而且腔体的谐振选模作用能够使输出微波频带更窄、模式更纯,具有较好的应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Sullivan D J. High Power Microwave Generation from a Virtual Cathode Oscillator (Vircator)[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1983,30:3426.
- [2] Price D, Sze H, Fittinghoff D. Phase and Frequency Locking of a Cavity Vircator Driven by a Relativistic Magnetron[J]. J. Appl. Phys., 1985, 65:5185.
- [3] Benford J, Price D, Sze H, Bromley D. Interaction of a Vircator Microwave Generator with an Enclosing Resonant Cavity[J]. J. Appl. Phys., 1987,61:2098.
- [4] Fazio M V, Kenross Wright J, Haynes B, Hoerberling R F. Virtual Cathode Microwave Amplifier Experiment[J]. J. Appl. Phys., 1989,66:2675.
- [5] Fazio M, Hoerberling R, Kenross J. Narrow-band Microwave Generation from an Oscillating Virtual Cathode in a Resonant Cavity[J]. J. Appl. Phys., 1989,65:1321.
- [6] Sze H, Price D, Harteneck B. Phase Locking of Two Strongly Coupled Vircators[J]. J. Appl. Phys, 1990,67:2278.

