

文章编号: 1001-2486(2001)01-0114-04

## 同轴虚阴极的粒子模拟\*

周少平, 刘永贵, 李传胪, 钱宝良

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 采用  $2\frac{1}{2}$  维全电磁模相对论 PIC 粒子模拟程序对同轴虚阴极振荡器进行了数值模拟。通过改变装置的结构参数和电气参数等方法, 对该类装置取得了一系列规律性的认识。通过模拟还发现, 对要求的频段, 通过加入电子收集极的方法, 可以有效地提高功率和压制倍频现象的发生。

**关键词:** 高功率微波; 同轴虚阴极; 粒子模拟

**中图分类号:** TN609 **文献标识码:** A

## Particle Simulation of the Coaxial Vircator

ZHOU Shao-ping, LIU Yong-gui, LI Chuan-lu, QIANG Bao-liang

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

**Abstract:** A  $2\frac{1}{2}$  dimension particle-in-cell (PIC) code is used to simulate a coaxial virtual cathode (vircator). By changing the geometrical and electrical parameters of the device, a series of regular knowledge has been achieved. Simulation results show that the output power of microwave is enhanced and the phenomenon of multiple frequencies is also suppressed by adding an electron collector.

**Key words:** high power microwave; coaxial vircator; particle simulation

虚阴极是一类能产生频率从 100MHz ~ 10GHz, 能量达 100MW ~ 10GW 的微波源, 与其它微波源相比, 它具有以下 3 个显著的优势: 结构简单、一般情况下不需外加磁场、可达极高的功率。然而, 近 20 年大量的试验研究表明, 虚阴极振荡器的效率较低。通常轴向提取约为 2%, 横向提取仅为 0.6%, 并且, 这种低效率的物理原因没有很好的解释。

虚阴极振荡器产生微波的原理如图 1 所示, 电子被加速通过阳极网, 当束流超过空间极限电流时, 就会形成虚阴极, 虚阴极的位置和对电子的反射率主要依赖于电子的能量, 如果入射电子按一定频率调制, 则虚阴极的位置和反射率的变化也会按此频率。入射电子被电磁场调制后, 其结果是按一定频率振荡的虚阴极和反射电流反过来和电磁场相互作用, 如果电磁场从电子束获得能量, 则会加强电磁场, 产生效率较高的高功率微波输出<sup>[1]</sup>。

同轴虚阴极具有使电子束预调制的结构, 图 2 中右边是向内发射电子典型的同轴虚阴极结构简图, 它具有明显的微波反馈通道, 反馈的微波能对入射电子束进行预调制。与如图 2 左边所示的一般虚阴极振荡器相比, 同轴虚阴极具有以下几个特点:

(1) 同轴虚阴极振荡器产生的微波有一部分在阴极形成的类腔结构中振荡, 这使得电子一发射出阴极表面便受到反馈微波电磁场的预调制, 从而提高了束波转换效率。

(2) 同轴虚阴极的特定结构使得虚阴极更易形成, 因为电子束不断加速朝向一个减小的容积, 空

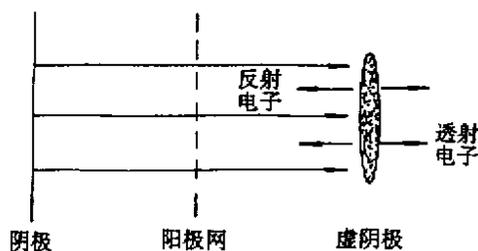


图 1 虚阴极振荡器的结构简图

Fig.1 Schematic of vircator

\* 收稿日期: 2000-07-05

基金项目: 国家 863 高技术计划资助项目

作者简介: 周少平 (1976-), 男, 硕士生。

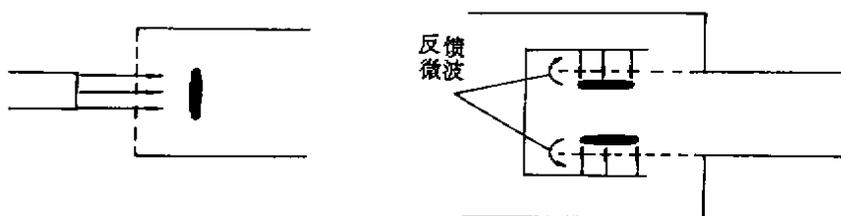


图2 不同结构的两种虚阴极

Fig.2 Two different structure vircators

间极限电流更容易达到。

(3) 由于电子发射面积大，这样就减小了电流强度，使得对阳极网的烧蚀减小，这对重复运行很有好处。

对于虚阴极振荡器，其输出的微波频谱特性与电子束能-微波能转换效率是至关重要的两个参数。同时频谱特性与能量转换效率这两个参数又是相互联系的，通常情况下窄的频谱特性才能导致高的转换效率。我们采用  $2\frac{1}{2}$  维全电磁模相对论 PIC 粒子模拟程序，对图 3 所示同轴虚阴极振荡器进行了数值模拟。关于 PIC 粒子模拟方法的细节，读者可参阅本文所列的文献 [2]。下面我们介绍一些主要结果。

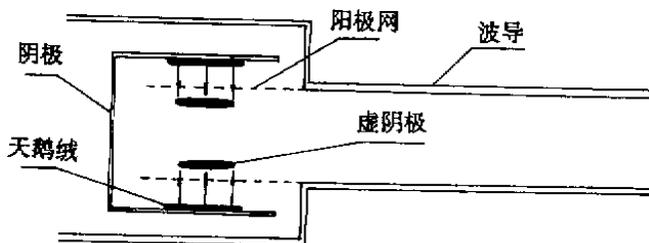


图3 同轴虚阴极的结构简图

Fig.3 Schematic of coaxial vircator

## 1 同轴虚阴极的粒子模拟结果及分析

### 1.1 反馈微波与频率和功率的关系

在模拟中发现，同轴虚阴极的输出微波主频和功率与同轴虚阴极中的微波反馈有密切的关系。按反馈式虚阴极振荡器的理论<sup>[3]</sup>，当反馈微波的相位角为  $2n\pi$  时，调制的电子束与虚阴极振荡达到理论的最佳耦合。对输出主频为 4GHz 的微波，其导波波长约为 8cm，模拟中也发现电子入射区中心线到阳极基座距离  $d$  对输出微波的功率是一个很重要的参数。模拟结果显示，当  $d$  为 3.8cm 时，对应一个较高的输出功率，当  $d$  增大时输出功率减小。但当  $d$  继续增大到等于 7.8cm 处，又有一极大的输出功率。按微波反馈理论计算，对应波长为 8cm 的微波，其相位角改变  $2\pi$  的距离为 8cm，是两极大值之间的距离的两倍  $((7.8 - 3.8) \times 2)$ ，理论的符合证明在同轴虚阴极振荡器中，反馈微波对电子束的预调制是其高效率的一个重要因素。但模拟中还发现，在两处不同  $d$  值对应的极大微波功率输出的主频也有些变化，在  $d = 3.8\text{cm}$  处对应的微波主频为 4GHz，而在  $d = 7.8\text{cm}$  处的微波主频为 3.3GHz (电压和电流都不变)。

在对电子束中线到波导口端面的距离和输出功率关系的模拟中，有图 4 所示的对应关系。其中  $L$  为波导口端面到电子束中心的距离， $P$  为输出的功率。由图 4 得出，两个输出极大值之间的距离为 3.5mm (12.75mm - 9.25mm)。这说明反馈微波透过电子束，达到波导口端面，在端面反射后再对电子束进行预调制。由于阴极和阳极网之间通过入射电子束透射的微波不是主要的，所以对电子束的预调制也没有直接调制的影响大。从而可见在电子束中心线到阳极基座的距离和到波导口端面的距离这

两个参数中,前者是关键参数,后者也是一个重要参数。

### 1.2 输出主频和功率的稳定性研究

对于一定结构的微波器件,我们希望在一定范围内变化电压和电流时能稳定地工作。在模拟中,用非自治发射模型,对电压和电流的值单独在一定范围内改变,得到微波输出的结果。如图 5 所示,对于给定的结构参数,当电压在 380kV ~ 430kV、电流在 41kA ~ 45kA 范围内变化时,微波输出功率可稳定在 400MW 左右。

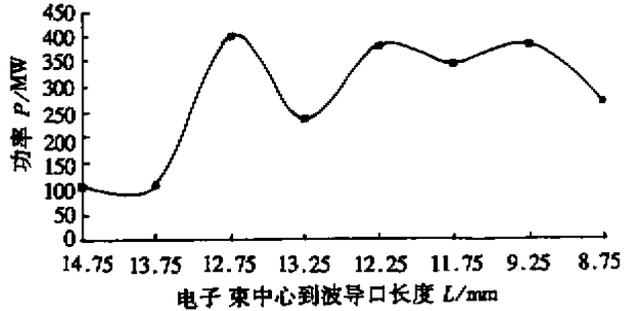


图 4 输出功率随距离 (L) 的变化曲线

Fig.4 Output power versus different distance (L)

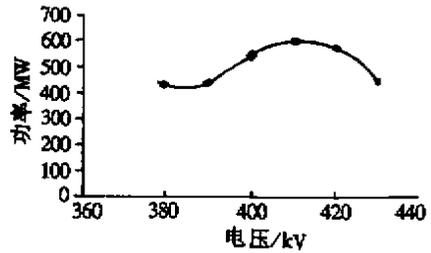
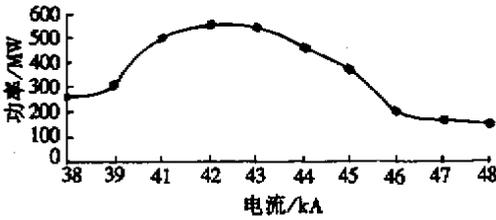


图 5 输出功率随电流和电压的变化曲线

Fig.5 Output power versus different current and voltage

### 1.3 倍频现象

在模拟中出现倍频现象,关于虚阴极中倍频的理论解释,在文献 [4] 中有详细的解释。由于频谱的窄带性与输出的功率有密切的关系,在虚阴极结构设计中要尽量避免产生倍频。模拟中发现以下四种因素与倍频有关。

(1) 脉冲的长短,模拟中发现在小于 15ns 的时间内不会出现倍频,当时间较长时,则有可能出现倍频现象。

(2) 出现倍频现象时,减小波导的尺寸,可压制倍频中的高频。

(3) 出现倍频现象时,增加收集极 (如图 6 所示),可压制倍频中的高频。

(4) 通过改变反馈长度 (即调整电子束中心线到阳极基座的距离),使对基频微波的反馈在理论上最佳耦合,则对高频就可压制。同理,如果希望输出高频的微波,则也可以通过调整  $d$  值,使对高频的反馈微波理论上达到最佳耦合。

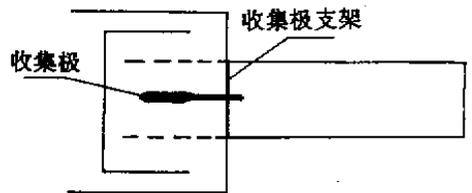


图 6 收集极的位置

Fig.6 Location of electron collector

### 1.4 增加收集极

在模拟中跟踪电子,向中心发射的电子,在其失去群聚后向下漂移,滞留在微波区,与微波相互作用。由于其相位混乱,在束波作用中使微波功率下降。在中心增加收集极后,使虚阴极中的透射电子尽量通过收集极收集,以避免再次的束波作用。模拟的结果表明增加收集极能明显地增强微波的输出。图 7 是对要求频段 (3.8GHz ~ 4.2GHz) 在同一结构参数下没有收集极 (左图) 和有收集极 (右图) 的功率对比图。从图 7 可以看出,有收集极的功率比没有收集极的功率增加一倍。图 8 给出加收集极后装置的能量转换效率与装置运行时间的关系。从图 8 右可以看出,当加入收集极后,装置的能量转换效率可达 12%,但图 8 左给出不加收集极的能量转换效率,最大只能达到 6%。

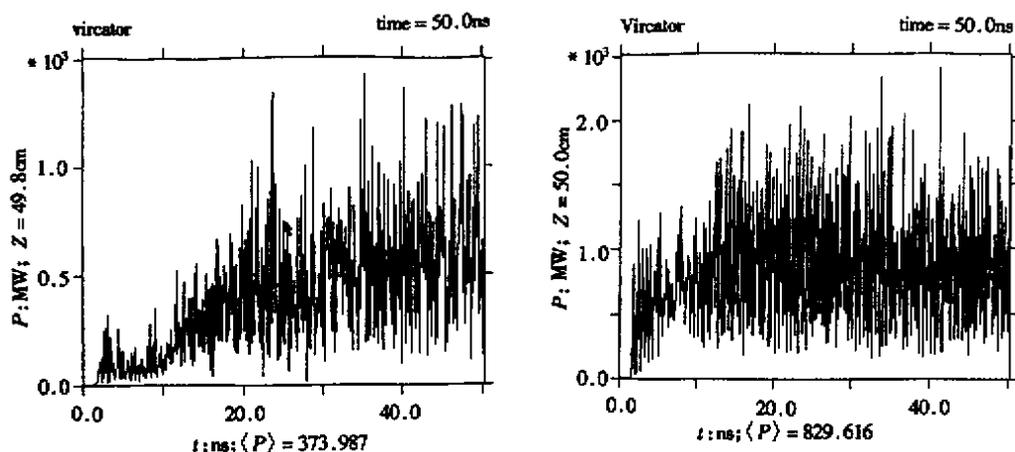


图7 没有收集极和有收集极的输出功率的比较

Fig.7 Different output powers of structures without electron collector and with electron collector

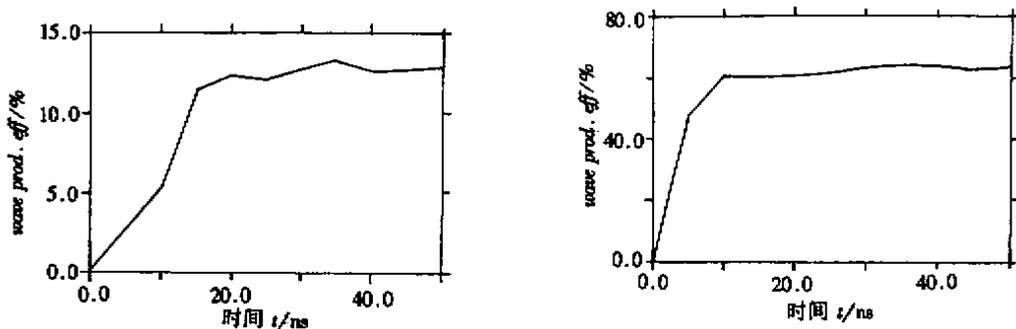


图8 有收集极和没有收集极的微波效率比较

Fig.8 Different output efficiencies of structures with electron collector and without electron collector

## 2 结论

国内和国外很多科研机构 and 大学对同轴虚阴极振荡器进行了大量的模拟和实验研究<sup>[1 5 6]</sup>, 本文首先引入微波反馈机制对其准腔结构进行计算, 设计几何参数使得入射的电子得以按其虚阴极的振荡频率预调制, 并对同轴虚阴极的稳定性和倍频现象出现的条件进行了概括和总结, 得出了压制倍频现象中的高频部分的办法。还模拟了通过增加收集极收集失去群聚的电子, 有效地提高能量转换效率, 并压制倍频现象发生的情况。

## 参考文献：

- [1] Jiang Weihua. High Power Microwave Generation by a Coaxial Virtual Cathode Oscillator [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1999, 27 (5).
- [2] 王闯. 等离子体物理及其计算机模拟 [M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 王宏刚. 反馈式虚阴极振荡器的研究 [D]. 国防科技大学理学院定向能技术研究所, 1999.
- [4] 叶卫民. 虚阴极振荡器理论及其改进型研究 [D]. 国防科技大学理学院定向能技术研究所, 1998.
- [5] 邵浩. 同轴虚阴极振荡器数值模拟研究 [J]. 强激光与粒子束, 1998, 10 (4).
- [6] 谢文指. 同轴 Vircator 的理论及数值模拟 [A]. 全国高功率微波会议论文集, 北海, 1998.

