

## 束流调制型虚阴极振荡器的研究\*

王弘刚, 张亚洲, 陈宇中

(国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073)

**摘要:** 运用改进的“环形输运”模型和粒子模拟方法研究了调制型虚阴极振荡器中束流调制参数变化对虚阴极振荡器特性的影响。研究表明: 束流的调制对虚阴极振荡器的运行性能有显著的影响, 对电子束流进行适当的调制可以显著提高器件的束波转换效率。研究结果为设计高性能的虚阴极振荡器提供了基础。

**关键词:** 虚阴极振荡器; 粒子模拟; 束流调制

**中图分类号:** TN 751. 2 **文献标识码:** A

## Study on Virtual Cathode Oscillator with E-beam Modulated

WANG Hong-gang, ZHANG Ya-zhou, CHEN Yu-zhong

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

**Abstract:** Virtual cathode oscillator (vircator) with electron beam (e-beam) modulated was studied using an improved “cellular conveyer” model and particle in cell (PIC) simulation. It is shown that the variation of the e-beam modulation parameters result in the change of vircator character, and microwave efficiency can be increased in proper e-beam modulation.

**Key words:** virtual cathode oscillator; PIC simulation; e-beam modulation

高功率微波技术具有广阔的军用和民用前景, 作为其中关键技术的高功率微波源近年来得到广泛的关注和迅速发展<sup>[1]</sup>。在众多的高功率微波源中, 虚阴极振荡器以其结构简单、频率可调、输出功率高等特点, 一直受到各国研究者的重视。传统虚阴极振荡器具有束波转换效率低、微波频带宽的缺点, 因而使用范围受到限制。为了提高虚阴极振荡器的束波转换效率、降低微波频带宽度, 许多研究者提出了改进型虚阴极振荡器<sup>[2-4]</sup>, 其中, 对入射电子束进行调制是提高虚阴极振荡器运行性能的较好方法。

## 1 模型的提出

虚阴极振荡器的工作机制十分复杂, 目前仍没有解析理论可以对其内在物理特性作全面的描述, 但其基本工作原理是: 当注入漂移空间的电子束流超过其空间电荷限制电流时, 在阳极后将形成等于阴极电位的电势极小区域, 即虚阴极。振荡的虚阴极以及在阴极和虚阴极之间振荡的束电子均辐射强电磁波。研究者主要采用粒子模拟和实验方法研究虚阴极振荡器, 但是从粒子模拟和实验中获得的规律性认识是十分有限的, 因此许多研究者在合理假设的基础上, 利用各种简化模型来分析虚阴极振荡器的物理特性, 获得了一些规律性认识, 这些认识对进一步的粒子模拟和实验研究是非常有价值的<sup>[5-7]</sup>。文献[5]运用“环形输运”模型来分析简单虚阴极振荡器中粒子的运动状态以及场的变化, 研究结果与粒子模拟得到的结果相符, 说明采用此模型描述虚阴极振荡器中粒子的运动状态是合理的。文献[5]的模型中, 每个时间周期  $\Delta\tau$  内进入到漂移空间的电荷元的带电量  $\Delta q$  是固定的, 只能用来分析以恒定电流注入到漂移空间的简单虚阴极振荡器。对于注入到漂移空间电子束流随时间变化的调制型虚阴极振荡器, 模型将不再适用。因此, 本文对其进行改进, 设每个时间周期  $\Delta\tau$  内进入到漂移空间的电荷元的带电量  $\Delta q$  随时间作周期变化, 其形式为:

\* 收稿日期: 2003 - 04 - 15

基金项目: 国家 863 计划项目(2002AA 834020)

作者简介: 王弘刚(1975-), 男, 博士生。

$$\Delta q = \begin{cases} \Delta q_0 \cdot (1 + b \cdot \sin(2\pi f(t - t_1) + \phi)), & t \geq t_1 \\ \Delta q_0, & t < t_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $f$  为调制频率,  $t_1$  为调制的初始时刻,  $\phi$  为调制的初始位相,  $\Delta q_0$  为电荷元的平均带电量,  $b$  为调制幅度, 当调制幅度  $b = 0$  时,  $\Delta q$  将与没有调制时相同。模型中运用的主要假设是: 漂移空间的电场强度仅由空间的电荷总量决定, 电荷元的空间运行轨迹只由其注入到漂移空间时刻的空间电场强度决定。设电荷元运动到漂移空间左右两个端面后均不再返回漂移空间, 根据电荷守恒定律, 可以推导出电荷元的寿命为:

$$\tau_{ife} = \begin{cases} 2 \cdot (1 - \sqrt{1 - E})/E, & E < 1 \\ 4/E, & E \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

电荷元的运动方程为:

$$x = (t - t_0) - E \cdot (t - t_0)^2/4 \quad (3)$$

$x$  为电荷元的空间坐标,  $t$  为时间,  $t_0$  为电荷元进入漂移空间的时刻,  $E$  为电场强度。设电场强度与空间电荷量之间的关系为<sup>[5]</sup>:

$$E = A \cdot Q^{1.1} \quad (4)$$

$A$  为空间电场强度与电荷量之间的耦合系数,  $Q$  为空间电荷的总量。通过改变束流调制参数并进行计算, 可以分析它们对电场振荡性质的影响。

## 2 数值计算结果与分析

本节根据以上的模型, 利用数值计算分析束流调制参数对电场振荡性质的影响。在虚阴极振荡器中, 当注入束流超过空间电荷限制流时, 将形成虚阴极使部分束电子反射, 并使空间电场振荡。“环形输运”模型中, 当  $\Delta q_0/\Delta\tau$  大于临界值时, 部分电荷元运行轨迹出现反向, 同时空间电场强度出现振荡<sup>[5]</sup>, 这些性质与虚阴极振荡器中的振荡性质相同。

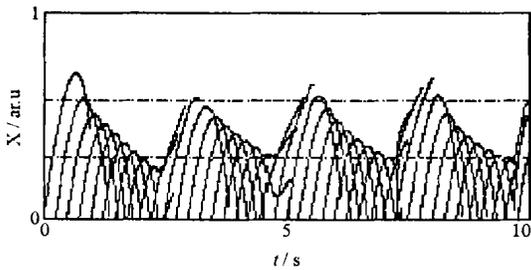


图1 无调制的电荷元轨迹图

ig.1 Space-time diagram of particle without modulation

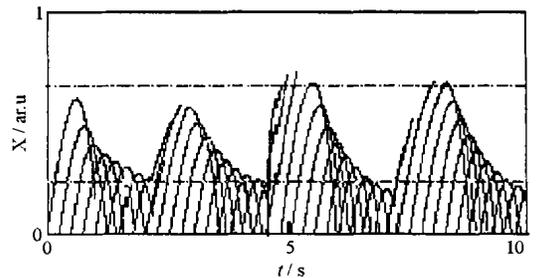


图2 具有调制的电荷元轨迹图( $f = f_0, b = 0.3$ )

Fig.2 Space-time diagram of particle with modulation

计算中, 设置  $\Delta q_0 = 0.003$ ,  $\Delta\tau = 0.005$ , 满足电场振荡的条件。通过改变束流调制幅度  $b$  和频率  $f$  以分析其对电荷元运行轨迹以及空间电场振荡的影响。图1、图2分别给出了恒流电子束和调制束流电子束的电荷元轨迹图。通过对比可知: 对束流进行调制后, 电荷元运动方向(即虚阴极位置)的变化范围增大, 且随时间增长变化幅度增大。说明对束流调制后, 虚阴极振荡幅度显著增大, 因而提高了辐射微波的强度。图3给出了束流调制频率等于无调制时电场振荡的频率, 在不同的调制幅度下, 电场强度随时间的变化关系。图中显示: 电流调制幅度越大电场振荡幅度越大, 且电场振荡幅度随时间单调递增。图4给出了调制幅度  $b = 0.3$ , 在不同的束流调制频率下, 电场强度随时间的变化关系。计算结果说明: 当调制频率与电场本征振荡频率相近时, 对电子束调制将增大电场的振荡幅度, 且调制幅度越大, 电场的振荡幅度越大; 当调制频率与电场本征振荡频率相差较远时, 对电子束调制将破坏电场的振荡周期性, 不利于电场振荡的增强。

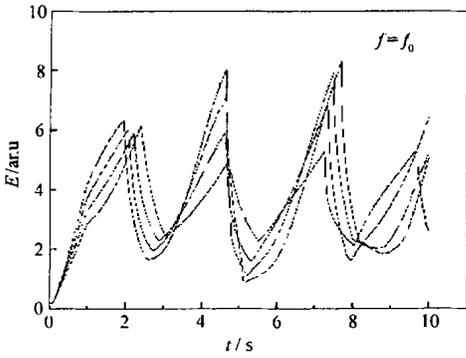


图3 不同调制幅度的空间电场与时间关系图  
1-  $b = 0$ , 2-  $b = 0.2$ , 3-  $b = 0.4$ , 4-  $b = 0.6$   
Fig.3  $E$  vs. time

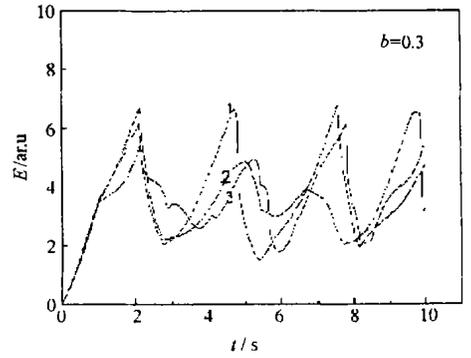


图4 不同调制频率的空间电场与时间关系图  
1-  $f = f_0$ , 2-  $f = 0.7f_0$ , 3-  $f = 1.3f_0$   
Fig.4  $E$  vs. time

### 3 粒子模拟结果

为了进一步分析束流调制参数对虚阴极振荡器运行性能的影响,同时验证上节模型分析结论的正确性,本节采用粒子模拟方法通过大量计算分析束流调制参数对虚阴极振荡器运行性能的影响。在模拟中,采用平面二极管结构,注入到漂移空间的束电子能量为:  $W = 450\text{keV}$ , 电子束流的调制形式为:  $I = I_0[1 + \alpha \sin(2\pi ft)]$ ,  $\alpha$  为电流调制系数,  $f$  为调制频率。

束流功率转换效率和频谱特性是虚阴极振荡器的运行性能的主要参数,在模拟中分别研究了电流调制频率和调制幅度变化对虚阴极振荡器的效率和振荡频率的影响。首先在调制幅度  $\alpha = 0.3$  的条件下,以虚阴极自由振荡的频率( $f_0 = 5\text{GHz}$ )为中心改变束流调制频率  $f$ ,分析虚阴极振荡器运行性能的变化。模拟结果表明:虚阴极振荡器中束波转换效率随束流调制频率改变而改变,在虚阴极自由振荡的频率附近达到最大值(如图5所示),输出微波频率等于束流调制的频率;当束流调制频率与虚阴极自由运行的频率相差较小时输出频率单一,而频率相差较大时出现倍频现象(如图7、图8所示)。其次在调制频率固定在虚阴极自由振荡频率( $f = f_0$ )的条件下改变束流调制幅度,分析虚阴极振荡器运行性能的变化。模拟结果显示:虚阴极振荡器中束波转换效率随调制幅度的增大而增大(如图6所示),输出微波频率等于束流调制频率。

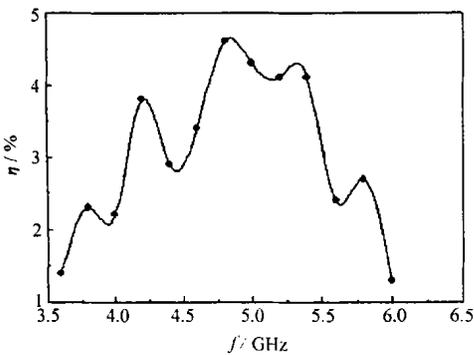


图5 微波效率与调制频率的关系图( $\alpha = 0.3$ )  
Fig.5 Microwave efficiency vs. modulation frequency ( $\alpha = 0.3$ )

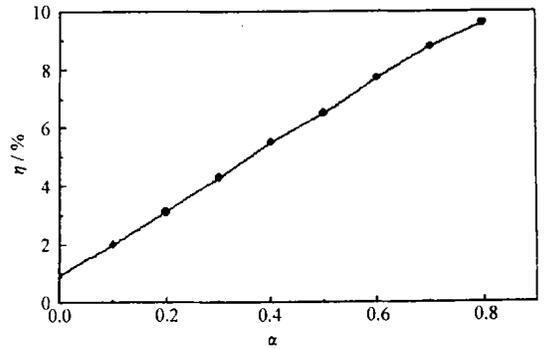


图6 微波效率与调制幅度的关系图( $f = 5\text{GHz}$ )  
Fig.6 Microwave efficiency vs. modulation amplitude ( $f = 5\text{GHz}$ )

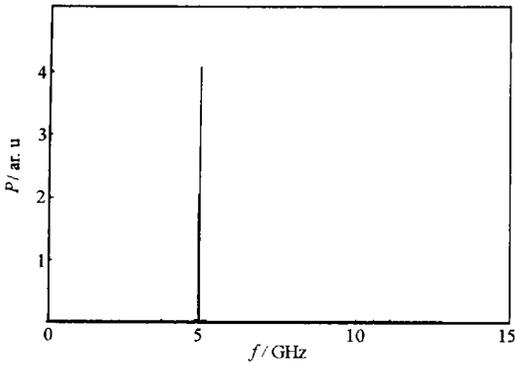


图7 微波频谱( $\alpha = 0.3, f = 5.0\text{GHz}$ )  
Fig. 7 Frequency spectrum in vircator

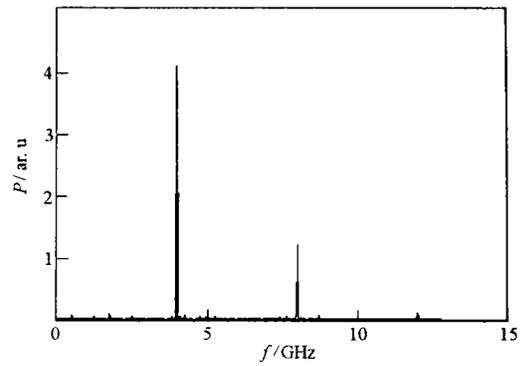


图8 微波频谱( $\alpha = 0.3, f = 4.0\text{GHz}$ )  
Fig. 8 Frequency spectrum in vircator

## 4 讨论

利用改进的“环形输运”模型研究束流调制型虚阴极振荡器得到的结论与粒子模拟所得到的结论相符,同粒子模拟方法相比,运用“环形输运”模型计算仅需要很少的时间,说明“环形输运”模型是可以用来研究虚阴极振荡器的简单而合理的模型。研究结果同时显示:对入射电子束进行调制将改变虚阴极振荡器的运行性能,若电子束调制频率与虚阴极振荡器自由运行的频率相近,可以显著提高虚阴极振荡器的束波转换效率,且转换效率随调制幅度的增大而增大;若电子束调制频率与虚阴极振荡器自由运行的频率相差较大,对电子束调制反而降低虚阴极振荡器的束波转换效率,同时输出微波的频谱特性也较差。为了提高虚阴极振荡器的运行性能,对束流调制时应采用频率与虚阴极自身振荡频率相近的微波信号,而虚阴极振荡产生的微波反馈到二极管区域调制入射束电子将是理想的方法之一。

## 参考文献:

- [1] Benford J, Swegle J. High Power Microwave [M]. Artech House, Boston London, 1992.
- [2] Jiang W, Masugata K, Yatsui K. New Configuration of a Virtual Cathode Oscillator for Microwave Generation [J]. Phys. Plasmas, 1995, 2(12): 4635.
- [3] Korvin S, Kisanov S, Klimov A, et al. Tunable Vircators with E-beam Premodulation [C]. 13<sup>th</sup> IEEE International Pulse Power Conference, 2001: 495.
- [4] Zhang Y Z, Wang H G, et al. The Primary Study of an Improved Vircator [C]. 13<sup>th</sup> International Conference on High-power Particle Beams, Japan, 2000: 693.
- [5] Hramov A E, Koronovskii A A, et al. On the Simple Model on the Electron Beam with Overcritical Current [C]. Proceedings of International University Conference “Electronics and Radiophysics of Ultra-high Frequencies”, Russia, 2006.
- [6] Woo W, Benford J, et al. Phase Locking of High-power Microwave Oscillators [J]. J. Appl. Phys., 1989, 65(2): 861.
- [7] 王弘刚, 张亚洲. 微波调制型虚阴极振荡器的理论分析 [J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(3): 335.