

一种新型径向三腔同轴虚阴极振荡器 全三维粒子模拟研究*

杨超[†] 刘大刚 周俊 廖臣 彭凯 刘盛纲

(电子科技大学物理电子学院, 成都 610054)

(2010年9月8日收到; 2011年1月5日收到修改稿)

提出了一种新型径向三腔同轴虚阴极振荡器, 并进行了数值模拟研究. 研究表明: 这种径向三腔结构在束波转换面进行电场调制, 能够大幅提高束波转换效率; 同时, 由阳极栅网和径向三腔结构构成的谐振装置能有效地抑制模式竞争; 另外, 由于采用了同轴引出结构, 在提高能量引出的同时还能有效吸收漂移管中被利用过的电子, 因此这种新型虚阴极振荡器能够获得较高的输出功率. 模拟的电子束电压为 400 kV, 电流为 50 kA, 主频为 4.5 GHz, 峰值功率达到 6 GW, 平均输出功率为 3.1 GW, 束波转换效率达到 15%.

关键词: 高功率微波, 同轴虚阴极振荡器, 粒子模拟, 束波转换效率

PACS: 41.20.Jb

1. 引言

作为高功率微波源, 虚阴极振荡器由于具有结构简单、频率可调、无需外加磁场等特性而被广泛应用^[1-3]. 在 100 MHz—10 GHz 的频率范围内, 能够产生 100 MW—10 GW 的微波功率, 然而其效率很低(通常不超过 2%)^[4], 其输出频率不够稳定且频谱较宽. 多年来, 国内外很多学者围绕如何提高虚阴极振荡器的效率及其频谱纯度展开了研究^[4-11].

近来, 许多专家致力于如何利用共振腔来提高虚阴极振荡器的束波转换效率的研究^[1,5]. 如果共振腔的谐振模式具有与虚阴极振荡方向相同的电场分量, 那么这个电场分量能在合适的条件下从虚阴极中引出净功率. 理想条件下, 在虚阴极相互作用区(特别是在虚阴极周围)谐振模式必须具有较高的振幅(波腹), 使得引出电子束中的能量最大化. 另外, 所选择的模式也是设计腔体需考虑的一个重要因素^[12,13]. 谐振腔中的电场强度不仅与腔内模式的增长有关, 而且还与谐振腔终端能量成比例. 因此, 谐振模式特征值的实部和虚部共同决定了从虚

阴极振荡中提取的功率大小. 我们所感兴趣的是开放腔的尺寸和腔壁分离度对微波功率的产生和微波效率的提取的影响, 它们分别决定了谐振腔特征值的虚部和谐振腔特征值的实部

本文提出了一种新型三腔同轴虚阴极振荡器结构并对其进行了三维粒子模拟研究, 通过优化共振腔结构, 平均输出功率达到 3.1 GW, 束波转换效率超过 15%.

2. 传统径向发射虚阴极振荡器

空间电荷效应是产生虚阴极现象的根本原因. 当电流密度很高时, 电子会受到周围其他电子对其的排斥力, 且当电流超过一个临界电流即空间电荷限制流 I_{SCL} 时, 一些电子将减速继而反向朝发射面运动. 临界电流大小取决于漂移空间, 而电子减速后反向运动的区域被称为虚阴极. 这个区域具有高电子密度, 呈水滴状, 如图 1 所示. 随着时间的推移, 越来越多的电子将会堆积到这个水滴状区域, 进入的电子因受到越来越大的排斥力而快速减速, 导致虚阴极面向着发射面移动. 随着电荷数目的增多, 空间电荷力增大以致将电子拉出水滴区, 虚阴

* 国家重点基础研究发展计划(批准号:2007CB310401)资助的课题.

[†] E-mail: ychao@uestc.edu.cn

极面则朝着发射面的相反方向移动,继而外加电场占据主导地位,虚阴极面又朝发射面移动,最终虚

阴极面以空间某位置为中心来回振荡,并且向外辐射该振荡频率的微波。

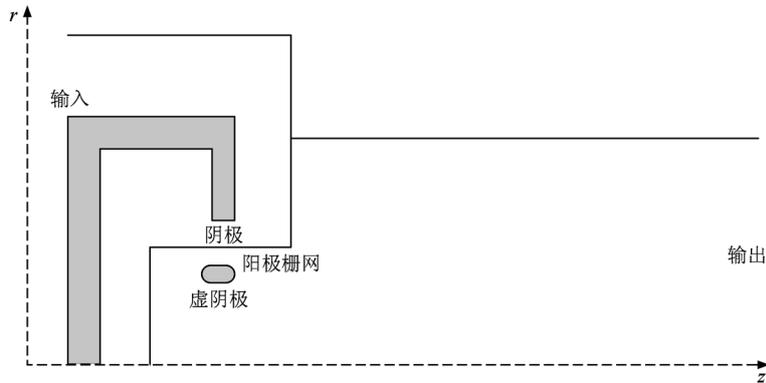


图1 传统的径向同轴虚阴极振荡器原理示意图

3. 新型径向三腔虚阴极振荡器的提出及模型描述

早期关于虚阴极振荡器的相关报道都没有考虑存在谐振模式的情形,随着电子进入漂移空间并减速,然后向外辐射微波。然而,只有与谐振腔具有相同模式的微波才能存在。考虑在虚阴极活动区域存在一个主模,它的电场导致虚阴极发生受迫振荡。如果该主模的频率与虚阴极振荡频率相匹配,那么虚阴极振荡的振幅将增大。振幅的增大导致虚阴极辐射功率增大,使得这种模式增长。显然,这种振荡机理将大幅度提高功率输出。此外,合理的引出装置不仅能有效地提高引出功率,而且可以吸收被利用过的电子,得到更纯净的微波功率。因此,设计合理的具有谐振机理的虚阴极振荡器,可以在实现较大功率输出的同时还能提高束波转换效率。

为了引入合适的谐振模式,以实现虚阴极自身振荡与谐振模式发生共振,达到模式增长,本文在上述传统虚阴极振荡器基础上引入共振腔,提出一种新型径向三腔同轴虚阴极振荡器结构,如图2所示。该结构包括二极管区(腔I)、束波互作用区(腔II)以及微波输出区(腔III)三个部分。阳极栅网半径为7.0 cm,阴极半径为8.0 cm,阴极发射面与阳极栅网的距离为0.9 cm,阳极挡板位于 $z=3.0$ cm处。径向、轴向和角向网格分别设置为100,135和20。时间步长设为0.00035 ns。另外,不需外置磁场。本文采用电子科技大学自主开发的全三维电磁粒子模拟软件CHIPIC,对该三腔虚阴极振荡器实现粒子模拟研究。模拟中,器壁都设置为良导体,二极管电压通过左端口输入,右端口输出微波。在共振结构中,我们感兴趣的参数是径向三腔结构中挡板的高度 H 、输出端开口尺寸 L_1 、阳极挡板与径向三腔结构中挡板的间距 L_2 以及第三腔的长度 L_3 。 L_2

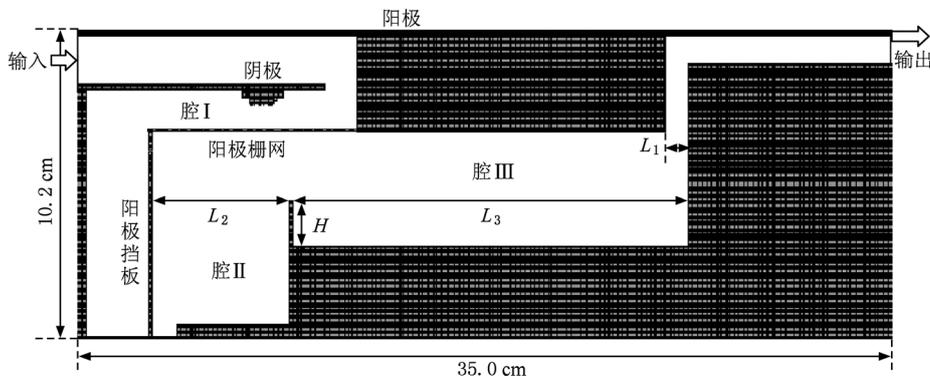


图2 新型径向三腔同轴虚阴极振荡器粒子模拟结构示意图

控制漂移管传输电流和谐振频率, H 影响微波输出效率和频率. 由于 $L_2 > H$, 主模受 L_2 的影响比受 H 的影响大. 此外, L_1, L_3 决定腔的终端功率, 是优化功率和效率的重要手段.

4. 新型三腔虚阴极振荡器谐振机理

相对于如图 1 所示的传统虚阴极振荡器, 本文提出的新型径向三腔同轴虚阴极振荡器(图 2)主要在以下两方面加以改进: 一是添加了开放腔 II 和腔 III 构成了径向三腔结构; 二是增加了同轴引出装置. 因此, 本文所研究的新虚阴极振荡器包括一个同轴二极管、束波转换区、一个漂移管和一个同轴引出装置. 同轴虚阴极振荡器存在大量的竞争模式, 这是导致同轴虚阴极振荡器效率较低的主要原因. 由于引入了同轴径向三腔结构, 在束波转换区(图 2 中腔 II), 电场将被调制使电子沿轴向运动, 从而提高电子束与 TM_{01} 的转换效率. 在漂移区(图 2 中腔 III), 由于左端存在一个导体挡板, 右端开口较小, 构成了一个开口较小的腔体, 这有利于腔内模式增长. 另外, 由于腔体存在共振, 使得引出功率得到提高.

由文献[1, 4]可知, 当输入电压较高时虚阴极振荡频率取决于等离子体振荡频率. 相对论情况下等离子体振荡频率 ω_p 可表示为

$$\omega_p = \left(\frac{n_0 e^2}{\epsilon_0 m \gamma_0} \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中 n_0 为电子密度, e 为单位电荷, ϵ_0 为真空介电

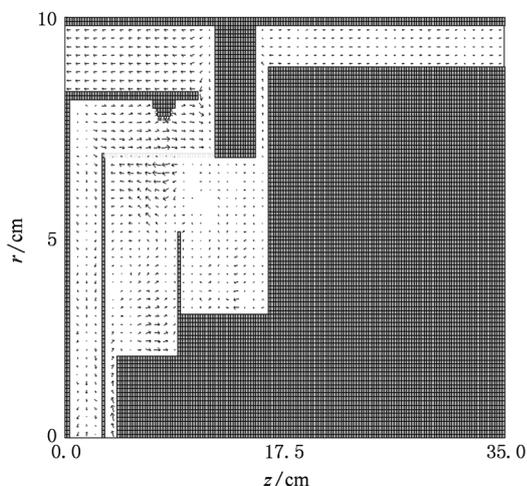


图 3 电场在径向三腔结构中的分布

常数, m 为电子质量, γ_0 为相对论因子. 根据小信号理论, 如果调制电场频率 ω_1 满足 $\omega_1 = 2.8\omega_p$, 那么虚阴极振荡器将获得高增益. 调节同轴三腔结构参数, 使其固有频率 ω 满足 $\omega \approx \omega_1 \approx 2.8\omega_p$. 这样, 径向三腔虚阴极振荡器将获得高增益. 另外, 阳极栅网、径向三腔结构以及引出结构共同构成了一个共振腔, 它具有与虚阴极振荡器相似的电场模式, 如图 3 所示. 对于传统虚阴极振荡器而言, 其微波主要成分是 TM_{01} 和 TE_{11} . 然而, 本文提出的新型结构中引入了共振腔, 因此只要适当调节 H, L_2 和 L_3 等参数, 使该三腔结构的固有频率与 TM_{01} 模匹配, 共振效应将使 TM_{01} 模与电子束的转换效率得到大幅度提高, 而 TE_{11} 模又被有效地抑制. 因此, 本文提出的三腔结构能在很好地抑制模式竞争的同时提高了虚阴极效率.

此外, 通常模拟传统虚阴极振荡器时, 在输出端测得的能量中含有部分直流分量(电子自身的动能), 设计合理的引出装置可有效地剔除这些直流分量. 这一点对于微波器件的设计具有重要的意义. 由文献[5]可知, 由于本文的同轴引出装置的开口 L_1 远小于 L_3 , 且输出端开口较小, 因此它能很好吸收进入漂移管已被利用过的电子, 可在输出口获得较纯净的微波功率.

5. 新型三腔虚阴极振荡器模拟结果

本文利用全三维电磁粒子模拟软件 CHIPIC 对新型三腔虚阴极振荡器进行粒子模拟, 证明了该径向三腔虚阴极振荡器能提高束波转换效率和产生高微波功率. 模拟时采用以下参数: 阴极半径为 7.8 cm, 阳极栅网半径为 6.9 cm, 阳极挡板距输入入口 2.8 cm, 发射面中心距输入入口 8.0 cm, $L_1 = 1.0$ cm, $L_2 = 6.0$ cm, $L_3 = 7.0$ cm, $H = 2.0$ cm. 梯形电压脉冲输入, 输入峰值电压为 450 kV, 上升时间为 1 ns. 采用爆炸式发射, 且阴极发射体长为 1.0 cm. 脉冲持续 40 ns 后, 我们得到一系列模拟截图, 图 4 所示为新型三腔同轴虚阴极振荡器的电子实空间分布. 从图 4 可知, 电子从阴极发射且被二极管加速沿径向朝阳极栅网运动. 而后, 电子进入漂移空间, 通过栅网后开始减速. 当电子接近虚阴极时, 一些电子改变运动方向或向反方向运动. 最终, 相空间呈现菱形状, 即出现虚阴极现象. 在同轴虚阴极

振荡器中,电子从阴极发射后朝中央运动,因而容易出现虚阴极现象. 图5所示为电子的相空间分布,其中纵坐标 V_r 表示相对论因子与电子速度的乘积. 从图5可知:虚阴极已经形成;虚阴极到阳极栅网的距离与二极管的阴阳极间距相等. 图6所示为阴阳极间电流随时间的变化,图7所示为阴阳极间电压随时间的变化. 从图6和图7可以看出,稳定后得到输入二极管的电压为400 kV,电流为50 kA,故而输入功率为20 GW,且输入阻抗为8 Ω .

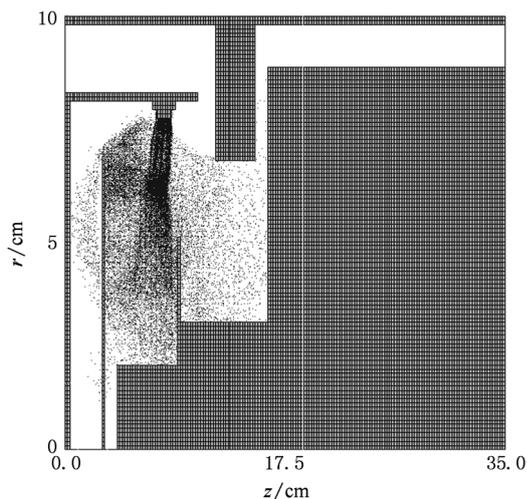


图4 电子在实空间的分布

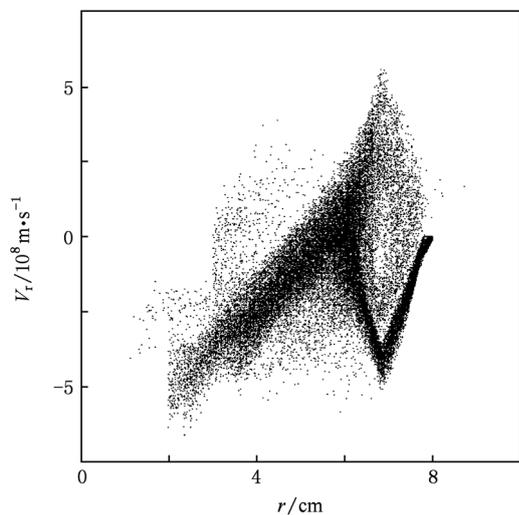


图5 电子的相空间分布

把相关的参数代入(1)式,计算得到 $\omega_p = 1.6$ GHz,由输出功率的频谱(图8)可知 $\omega = 4.5$ GHz,故而谐振频率满足 $\omega \approx 2.8\omega_p$. 模拟结果也证实了该新型径向三腔同轴虚阴极振荡器能达到高功率和

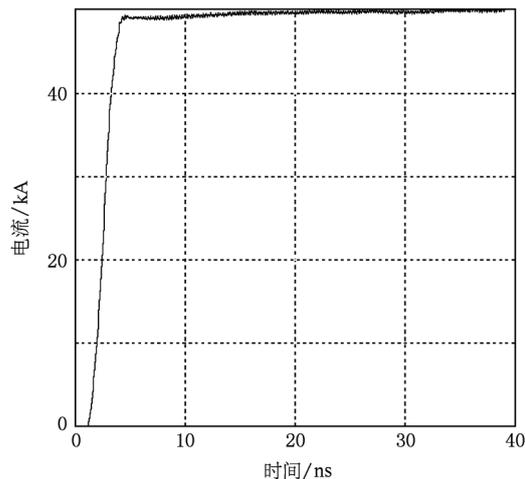


图6 阴阳极之间电流随时间的变化

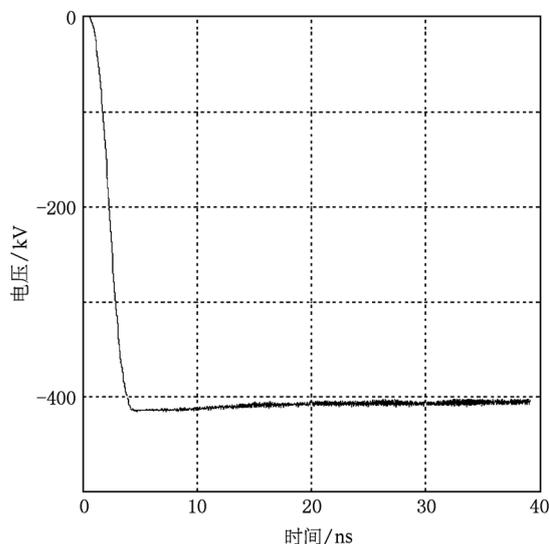


图7 阴阳极之间电压随时间的变化

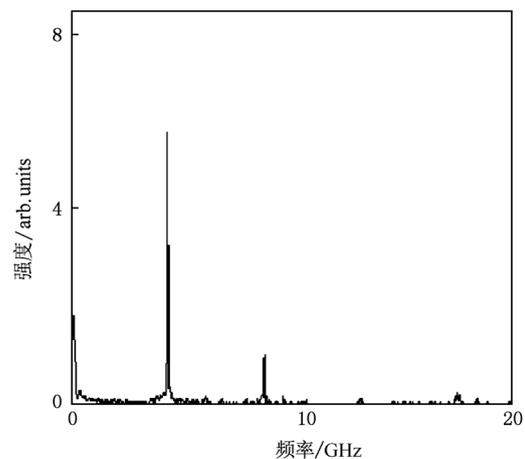


图8 输出功率的频谱

高束波转换效率的目的. 图 9 所示为输出功率随时间的变化, 图 10 所示为平均输出功率随时间的变化. 从图 9 和图 10 可以看出, 当时间 $t = 3 \text{ ns}$ 时, 输出功率稳定, 瞬时峰值功率超过 6 GW, 平均功率为 3.1 GW, 且效率高达 15%. 图 11 所示为输出端横向磁场的矢量分布, 图 12 所示为输出端横向电场的矢量分布. 从图 11 和图 12 可以看出, 在能量引出区, 电磁场的主要成分是 E_r 和 B_ϕ , 因而其主要辐射模式是横电磁模.

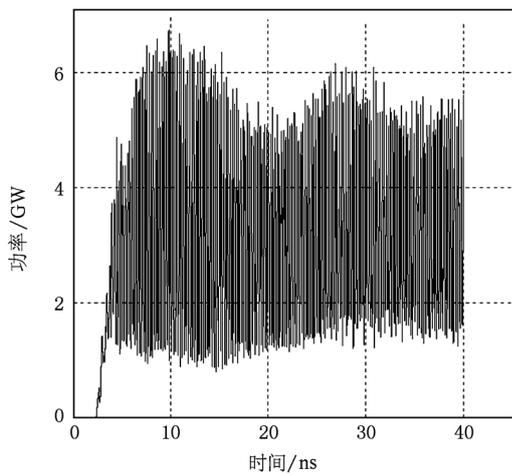


图 9 输出功率随时间的变化

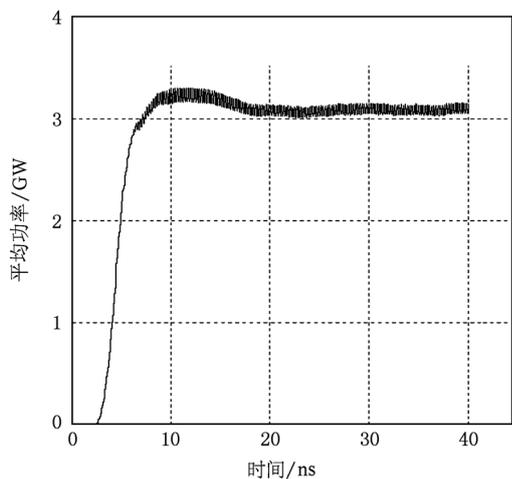


图 10 平均输出功率随时间的变化

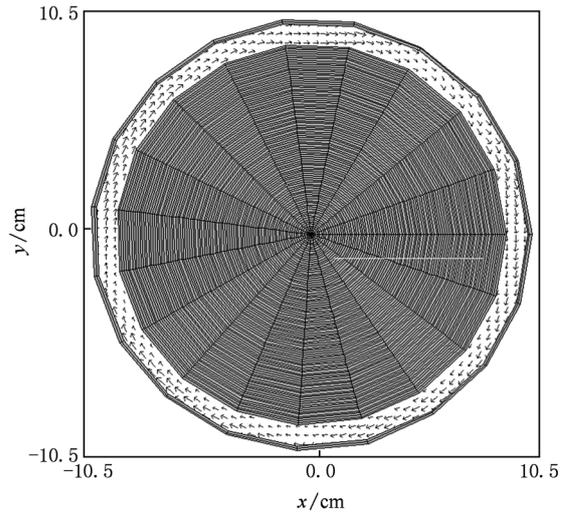


图 11 输出端横向磁场的矢量分布

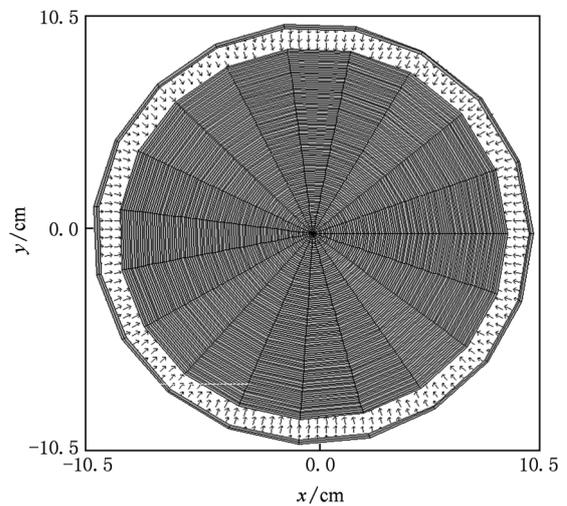


图 12 输出端横向电场的矢量分布

6. 结 论

本文主要研究如何提高虚阴极振荡器的输出功率和效率. 在传统虚阴极振荡器基础上, 提出一种新型径向三腔虚阴极振荡器. 对其进行理论分析并通过软件模拟验证, 在输入电压为 400 kV 和电流为 50 kA 的条件下, 得到的峰值功率为 6 GW, 平均功率为 3.1 GW, 束波转换率达到 15%.

[1] Luo X, Liao C, Meng F B 2006 *The 7th International Symposium on Antennas, Propagation, and EM Theory* (Beijing: IEEE) p1

[2] Möller C, Elfsberg M, Larssonsten A, Nyholm E 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1318

[3] Xing Q Z, Wang D, Huang F, Deng J K 2006 *IEEE Trans.*

- Plasma Sci.* **34** 584
- [4] Xing Q Z, Wu J, Zheng S X, Tang C X 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 298
- [5] Biswas D, Kumar R 2010 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1313
- [6] Chen X D, Toh W K, Peter A 2004 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **32** 1191
- [7] Song K B, Lim J E, Seo Y, Choi E H 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 304
- [8] Luo X, Liao C, Meng F B, Zhang Y J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5774 (in Chinese)[罗 雄、廖 成、孟凡宝、张运俭 2006 物理学报 **55** 5774]
- [9] Shao H, Liu G Z 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 2387 (in Chinese) [邵 浩、刘国治 2001 物理学报 **50** 2387]
- [10] Langmuir I, Blodgett K B 1923 *Phys. Rev.* **21** 419
- [11] Lin M C, Chang P C 2008 *IEEE International Vacuum Electronics Conference (Piscataway: IEEE)* p213
- [12] Yu D L, Wang G, Liu Y Z, Wen J H, Qiu J 2006 *Chin. Phys. B* **15** 266
- [13] Wang C L, Wu J, Lin J T 2003 *Chin. Phys. B* **12** 1120

Three-dimensional particle-in-cell simulation studies on a new radial three-cavity coaxial virtual cathode oscillator*

Yang Chao[†] Liu Da-Gang Zhou Jun Liao Chen Peng Kai Liu Sheng-Gang

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

(Received 8 September 2010; revised manuscript received 5 January 2011)

Abstract

A new radial three-cavity structure of the coaxial virtual cathode oscillator is proposed and studied numerically in this paper. Using the radial three-cavity structure, the beam-wave conversion efficiency is enhanced by modulating the electric field in the beam-wave interaction area, while the resonator composed of the radial three-cavity configuration and the mesh anode helps restrain mode competition effectively. And then the coaxial extraction structure benefits the energy extraction, and it can also absorb the used electrons entering into the drifting tube. Therefore, this new kind of virtual cathode oscillator can achieve a high output power. With an electron beam of 50 kA at 400 kV, a peak power of about 6 GW is achieved by simulation at 4.5 GHz. The mean power reaches 3.1 GW and the beam-wave conversion efficiency is about 15%.

Keywords: high power microwave, coaxial virtual cathode oscillator, particle-in-cell simulation, beam-wave conversion efficiency

PACS: 41.20.Jb

* Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2007CB310401).

[†] E-mail: ychao@uestc.edu.cn