

文章编号: 1001-4322(2009)03-0421-04

# 多腔虚阴极振荡器研究\*

李志强, 舒挺, 钟辉煌, 樊玉伟, 杨建华, 许流荣, 赵延宋

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 长沙 410073)

**摘要:** 提出了一种具有预调制腔、主谐振腔和提取腔组成的多腔轴向提取虚阴极振荡器结构。腔体特性分析表明其在工作频段可以获得更高的提取效率。粒子模拟显示该结构在电压 700 kV, 电流 23 kA 的条件下, 可输出功率大于 1.7 GW, 频率 4.0 GHz, 功率效率大于 10% 的微波。初步的实验研究获得了辐射功率约 700 MW, 频率约 4.1 GHz 的微波输出。对实验结果的进一步分析表明, 通过适当加大器件虚阴极振荡工作区微波管直径的方法可以有效改善器件的谐振性能, 从而获得更好的工作性能。

**关键词:** 高功率微波; 虚阴极振荡器; 谐振腔; 粒子模拟

**中图分类号:** TN609 **文献标志码:** A

虚阴极振荡器具有结构简单、频率可调、不需要外加磁场等优点, 是目前研究的热点之一。近年来, 出现了各种各样的改进型虚阴极振荡器, 比较典型的有反射三极管、同轴虚阴极振荡器<sup>[1]</sup>、具有谐振腔的虚阴极振荡器<sup>[2]</sup>、轴向反馈式虚阴极振荡器<sup>[3-4]</sup>等。本文在轴向反馈式虚阴极振荡器的研究基础之上, 提出了多腔虚阴极振荡器, 并进行了模拟和实验研究。

## 1 器件结构

轴向反馈式虚阴极振荡器能够有效利用反馈机制稳定频率, 提高功率, 但也正是由于反馈环的存在, 使得微波提取效率不高。为保证在适当加强反馈的情况下能提高振荡器的输出功率, 我们提出了多腔虚阴极振荡器的结构, 如图 1 所示。该结构能够有效消除结构突变引起的强反射, 从而高效率提取微波。其主要特点为: 在阳极网下游不远处放置了 1 个开口比较大的调制环, 同阳极网构成第 1 个腔体对电子束进行弱调制; 接着放置了主反馈环进行强反馈调制, 并且和第 1 个环组成第 2 个开口谐振腔; 最后在结构突变处放置了提取环, 构成了提取腔。

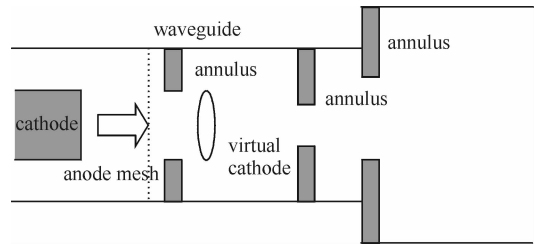


Fig. 1 Schematic of the vircator with several resonant cavities  
图 1 多腔虚阴极振荡器结构简图

## 2 腔体分析

首先利用电磁仿真软件对器件的腔体特性进行分析。在不加载电子束的情况下, 对器件的工作频点进行计算, 结果如图 2 所示, 其中,  $D(k^2)$  是关于  $k$  的一个多项式, 用于计算谐振点,  $k$  是波数,  $f$  是频率。  $D(k^2)$  为 0 和  $dD(k^2)/df$  为 -1 时, 表明该处过 0 点值为稳定谐振点<sup>[5]</sup>。显然, 在 4.28 GHz 附近存在一个稳定谐振点, 在 4.03 GHz 附近存在一个不稳定点。如果选择合适的二极管参数, 调整虚阴极工作在谐振点附近, 将会得到更强的束波作用。在束波作用得到加强的前提下, 有效地增加振荡器对微波的提取是提高输出功率的重要手段。为测定该结构的提取特性, 将普通轴向反馈式虚阴极振荡器<sup>[3]</sup>和多腔虚阴极振荡器进行了提取微波效率的比对研究: 假设管子一个端口馈入工作频率的微波, 检测另一端

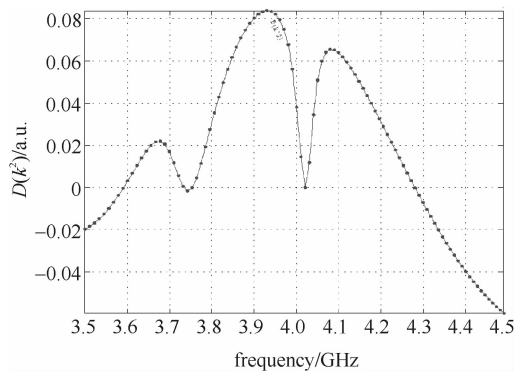


Fig. 2 Resonant points

图 2 腔体谐振点

\* 收稿日期: 2008-07-25; 修订日期: 2009-01-04

基金项目: 国家高技术发展计划项目

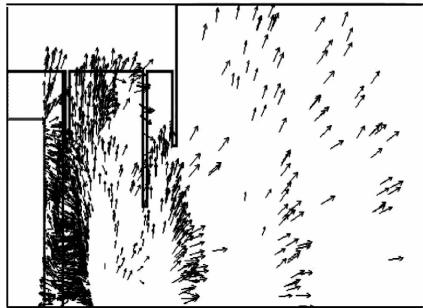
作者简介: 李志强 (1977—), 男, 讲师, 博士, 主要从事高功率微波和脉冲功率技术研究; wh\_lzq@hotmail.com.

口输出情况。仿真计算时不需要加第 1 个调制环,这和实际上束波作用主要发生在第 2 个腔内是一致的。

电磁仿真软件所做的比对结果见表 1。可以看出,如果虚阴极振荡器激励微波频率在 4.0 GHz 附近,则普通轴向虚阴极振荡器提取微波效率不高,其能量透过率不到 20%。但若采用改进后的多腔结构,则当微波频率在 4.0 ~ 4.1 GHz 之间时,微波提取效率高于 60%。图 3 是电磁仿真软件计算得到的微波频率 4.1 GHz 时管内电场分布图,从图可见,主反馈环和提取环处电场非常强,说明该处的耦合作用相当强。

### 3 粒子模拟

采用 Karat 粒子模拟程序进行了模拟计算,设置阳极网电子透过率为 70%。图 4 是电子空间和相空间分布图。从图 4(a)中可以看到,电子透过阳极网后,大部分箍缩后被调制成群聚状态。透过阳极网的部分边缘电子被第 1 调制环吸收,而通过束波作用后的部分电子也被第 2,第 3 调制环吸收掉,从而避免其从微波场中回收能量。图 4(b)显示虚阴极形成的非常好,一个良好的棱形出现,并且透射电子沿  $z$  轴被强微波调制形成强的群聚状态。



(a) bunching of electrons in real space

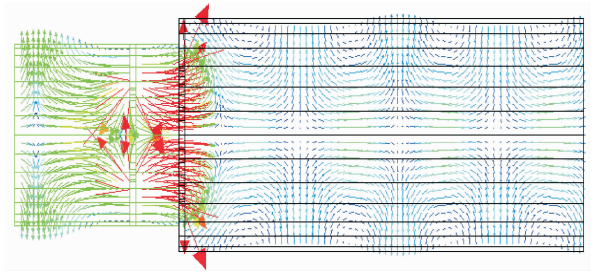
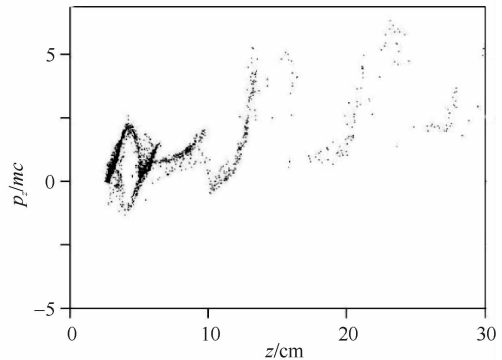


Fig. 3 Electric field distribution in the waveguide at 4.1 GHz

图 3 频率 4.1 GHz 时电场分布图



(b) bunching of electrons in the phase space

Fig. 4 Bunching of electrons in real and phase spaces

图 4 电子空间和相空间分布图

图 5 是微波输出功率随二极管电压的变化情况。随着二极管电压的升高,微波输出功率增长很快,在 700 kV 时输出功率约 1.7 GW,功率效率高于 10%。图 6 给出的是辐射微波频谱图,频率约 4.0 GHz。

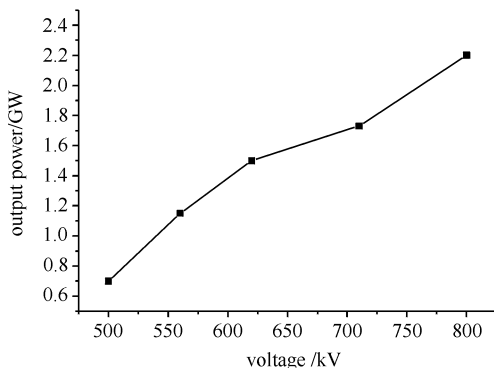


Fig. 5 Output power versus diode voltage

图 5 微波输出功率随二极管电压变化情况

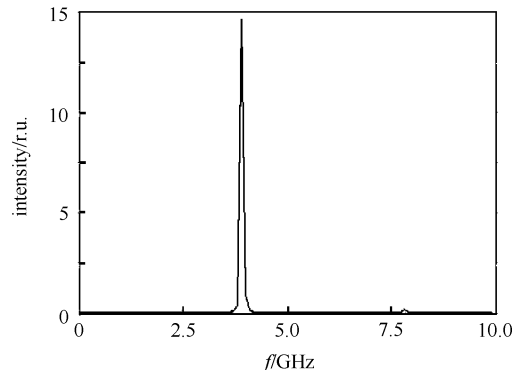
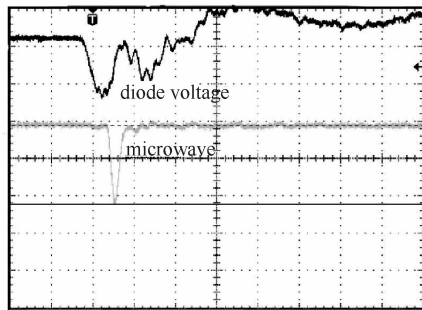


Fig. 6 Frequency spectrum

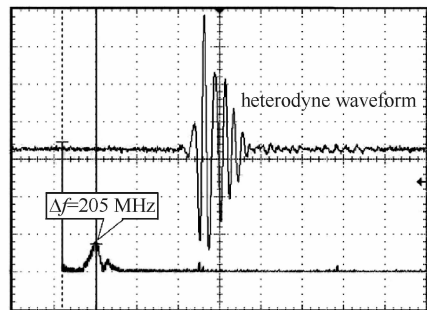
图 6 辐射微波频率

## 4 实验结果及分析

根据理论分析和粒子模拟研究情况,设计加工了微波管,并进行了相应的实验研究。



(a) waveforms of the diode voltage and the microwave



(b) heterodyne waveform with the upper reference frequency of 4.3 GHz

Fig. 7 Typical experimental results

图7 典型实验结果

在二极管电压为 600 kV、电流为 23 kA 的条件下,运用远场辐射测量法,得到了  $TM_{01}$  模,辐射频率为 4.095 GHz(用混频法测量,实验中设置本振频率为 4.3 GHz)、脉宽为 22 ns、功率约为 700 MW 的微波输出。图 7 即为典型实验结果。实验中,微波输出功率和效率都比粒子模拟时要低,推测主要是由两方面的因素造成:(1)从图 2 所示的谐振点扫描来看,器件工作在一个相当不稳定的工作点,因此虚阴极振荡频率若偏离谐振点过远,很容易造成器件性能下降;(2)实验所用阴极是不锈钢针状阴极,大面积均匀发射存在一定的难度,发射电子质量较差。因此,在下一步的设计中,需重点考虑

工作点的选取问题。从当前的实验结果来看,虚阴极振荡应该工作在 4.0 GHz 附近,如果能够进一步将器件 4.0 GHz 处的 Q 值(腔内总储能和损伤能量的比值)进行加强,估计会得到比较好的结果。这个想法通过适当加大虚阴极振荡工作区波导直径的方法得到了实现。重新扫频得到的谐振点分布如图 8 所示,显然 4.05 GHz 这个点是一个稳定的工作点。根据研究情况,对器件结构进行了一定程度地修改,同时采用空心阴极,在同一台加速器上,获得了功率 1 GW,频率为 4.1 GHz 的微波输出<sup>[6]</sup>。

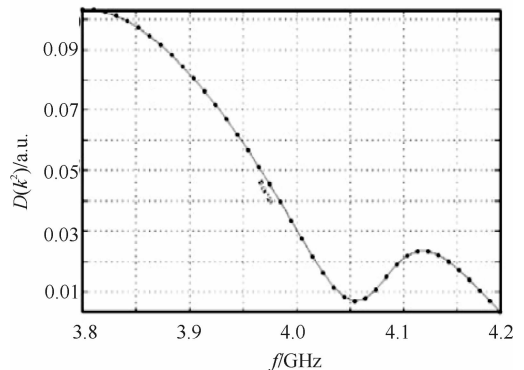


Fig. 8 Resonant points for the improved structure

图8 改进后结构谐振点扫描

## 5 结论

论文研究了一种多腔虚阴极振荡器结构。分析表明,该结构相比普通轴向反馈式虚阴极振荡器而言,提取效率在工作频带内从不到 20%到改进后的 60%,提高了约 2 倍。利用该结构在粒子模拟研究中获得了功率 1.7 GW、效率大于 10%的微波输出。而在初步实验中获得了 700 MW、频率约 4.1 GHz 的微波输出。冷腔分析表明工作点不太稳定以及阴极技术不过关是造成实验效率偏低的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 杨占峰,邵浩,刘国治,等. 向内发射同轴虚阴极振荡器实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(12):1217-1219. (Yang Z F, Shao H, Liu G Z, et al. Preliminary experimental study on inner-emitting coaxial vircator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12):1217-1219)
- [2] Jiang W H, Nami S, Prasad S D, et al. Experimental and simulation studies of new configuration of virtual cathode oscillator[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2004, **32**(1):54-59.
- [3] Shu T, Wang Y, Qian B L, et al. A compact vircator with feedback annulus operated in quasi-single  $TM_{01}$  mode within the C band[J]. *Chin Phys Lett*, 2002, **19**(11):1646-1648.
- [4] 李志强,舒挺,钱宝良,等. 轴向反馈式虚阴极振荡器的频率特性研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(12):1209-1212. (Li Z Q, Shu T,

- Qian B L, et al. Frequency feature of an axial feedback vircator[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(12): 1209-1212)
- [5] Halbach K, Holsinger R F. Superfish -a computer program for evaluation of RF cavities with cylindrical symmetry[J]. *Particle Accelerators*, 1976, **7**(4): 213.
- [6] Li Z Q, Zhong H H, Shu T, et al. Simulation and experimental research of a novel vircator[J]. *Chin Phys Lett*, 2008, **25**(7): 2566-2568.

## Investigation of an axially-extracted vircator with several resonant cavities

Li Zhiqiang, Shu Ting, Zhong Huihuang, Fan Yuwei,

Yang Jianhua, Xu Liurong, Zhao Yansong

(*College of Optoelectrical Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

**Abstract:** A new configuration of an axially-extracted vircator with several resonant cavities was put forward. Electromagnetic feature analysis shows this structure can get higher extraction efficiency. Particle simulation indicates this device can produce of 4.0 GHz microwave with an averaged power of over 1.7 GW a quasi-single  $TM_{01}$  mode under the diode voltage of 700 kV and the beam current of 23 kA. The power conversion efficiency is more than 10%. In the following experiment, the 410 GHz microwave with an output power of over 700 MW.

**Key words:** high power microwave; vircator; resonant cavity; particle simulation