

## 8 mm 径向扩展互作用振荡器

雷颜铭, 鄢 扬, 傅文杰

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要:**提出并研究了一种具有结构紧凑、散热性好、输出功率大等特点的新型扩展互作用结构——径向扩展互作用振荡器(EIO),并推导了小信号理论.利用电磁仿真软件分析了径向 EIO 高频结构中的谐振特性与场分布,并采用三维粒子模拟软件开展了注波互作用研究.研究表明在工作电压为 5 kV, 电流为 8.48 A 时,所设计的径向 EIO 输出功率达到 2.6 kW,热腔工作频率为 30.011 GHz,效率为 6.1%.

**关键词:**扩展互作用振荡器;径向注波互作用;小信号分析

中图分类号:TN129 文献标识码:A

## 8mm radial extended interaction oscillator

LEI Yan-Ming, YAN Yang, FU Wen-Jie

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

**Abstract:** A radial extended interaction oscillator has been presented in this paper. This new structure has characteristics such as compact structure, good heat dissipation and high output power. The characteristics trends of 4-cavities radial EIO has been determined through the analysis of a single coaxial resonator gap. And the operating frequency and voltage is more accurately tested by simulation of electromagnetic simulation software and small signal theory analysis. Since the electron emission surface of the electron gun of radial EIO is much larger than that of conventional EIO, so in the case of small current density, a large current can be obtained. When the voltage is 5kV and the current is 8.48A, the PIC simulation shows that the radial EIO could generate 2.6 kW in 30.011 GHz.

**Key words:** extended interaction oscillator, radial interaction, small signal analysis

**PACS:** 84.40. Fe, 84.47. +w, 85.45. -w, 85.45. Bz

### 引言

扩展互作用振荡器(Extended Interaction Oscillator, EIO)是一类重要的电真空器件,目前在毫米波乃至太赫兹波段已成为一种重要的高功率源器件.作为一种振荡器件,EIO的谐振电路要短于返波振荡器等其他类型振荡器件采用的高频系统,从而减轻了整体重量,降低器件对工艺的要求,加工精度也易于保证.EIO通常由多个耦合间隙的慢波结构构成腔体,既保证了功率、带宽和效率的提升,同时又实现了器件的小型化轻量化.扩展互作用器件的高可靠性使其不但在雷达应用上日益广泛,而且在

空间任务方面也发挥了越来越重要的作用.

目前国内对 EIO 的研究工作已经展开,在模拟研究上已取得较好的效果,常用的 EIO 慢波结构有周期加载波导结构、折叠波导结构、矩形重入耦合腔结构等<sup>[1-3]</sup>.本文提出了一种径向扩展互作用振荡器结构,该结构具有较大的功率容量和较好的散热能力,并具有较大的尺寸便于微细加工.由于其特有的柱对称结构,使得加工简单且更能有效的减小装配误差.电子光学系统的阴极位于器件中心,结构紧凑.并且由于其阴极发射面的面积较大,在相同电流密度的情况下能获得更大的工作电流,相比于其他结构的 EIO 更能满足高功率输出的要求.

收稿日期:2014-06-16,修回日期:2015-05-25

基金项目:国家自然科学基金(U1134006,61401064)

Foundation items:Supported by National Natural Science Foundation of China(U1134006,61401064)

作者简介(Biography):雷颜铭(1987-),男,博士,从事等离子体物理研究. E-mail:261071358@qq.com

Received date:2014-06-16, revised date:2015-05-25

## 1 径向 EIO 基本原理与高频结构分析

### 1.1 物理模型

研究的径向 EIO 的结构如图 1 所示,整体为柱对称结构,阴极位于结构中心,通过上下 2 个绝缘环与阳极隔开.电子注沿径向运动,进入谐振腔后,与各个间隙中的径向电场相互作用.间隙中电磁场能量可以通过电子注通道相互耦合,在相互作用过程中加强了内间隙中的电场,使得直流电子注在通过内间隙时能够获得更好的速度调制,在更短的漂移段距离内更有效的群聚.聚束磁场由 2 个对称位于谐振腔轴向上的同轴结构的聚束磁场线包构成,在电子注通道上磁场方向为径向,与电子注的运动方向一致能够有效聚束.

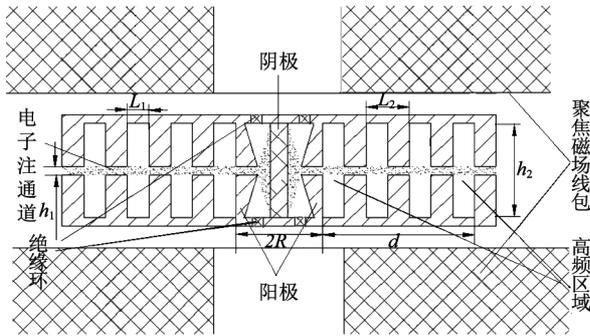


图 1 径向 EIO 结构示意图

Fig. 1 The Schematic diagram of radial EIO

### 1.2 注波相互作用理论

径向 EIO 由多个耦合间隙构成腔体,具有慢波系统的特性,可以将 EIO 中的场分解为无数个空间谐波,各个空间谐波具有相同的频率  $\omega$  和不同的传播常数  $\beta_n$ . 空间谐波是一个统一波动过程沿空间的分解,它们不能单独存在,只有各空间谐波同时存在才能满足系统的边界条件,它们的幅值是严格成比例的<sup>[4-8]</sup>.

在径向 EIO 中,在电子注通道上的场为类似同轴腔的  $TM_{p\phi z(mnp)}$  模,为便于计算,在特征值  $m$  较小的情况下,第  $k$  次空间谐波可以表示为

$$E_k^*(r, \varphi, z, t) = E_k(\varphi, z) \sin(\omega t - \beta_k r + \phi_k) \quad (1)$$

式中,  $E_k$  为谐波电场幅值,  $\omega$  为频率,  $\beta_k$  为谐波传播常数,  $r$  为电子注传播方向坐标,  $\phi_k$  为电子注进入慢波系统时感受到的谐波电场的相位.

引入电子注传播常数<sup>[7]</sup>  $\beta_e = \omega/v_0$ , 可推出电子所受到的电场表达式为

$$E_k^*(\varphi, z, t) = E_k(\varphi, z) \sin\left(\frac{\beta_e - \beta_k}{\beta_e} \omega t + \phi_k\right) \quad (2)$$

仅考虑第  $k$  次空间谐波的作用,并令  $\check{V}_k(\varphi, z) = E_k(\varphi, z)d$ , 在小信号条件下,电子经过长度为  $d$  的相互作用距离后速度  $v_d$  可以表示为

$$v_d = v_0 \left[ 1 + \frac{\check{V}_k(\varphi, z)}{2V_0} \sin(\delta_d/2 + \phi_k) \sin(\delta_d/2) / (\delta_d/2) \right] \quad (3)$$

上式中,  $\delta_d = (\beta_e - \beta_k)d$ . 电子在第  $k$  次空间谐波的作用下得到的能量可以表示为

$$\begin{aligned} \Delta E &= eV_{\text{eff}} \sin(\delta_d/2 + \phi_k) \\ &= e\check{V}_k(\varphi, z) \sin(\delta_d/2) \sin(\delta_d/2 + \phi_k) \end{aligned} \quad (4)$$

$V_{\text{eff}}$  表示电子受到的有效调制电压. 对于第  $k$  次空间谐波,有效调制电压可以表达为<sup>[9]</sup>

$$V_{\text{eff}} = N_k \check{V}_k \quad (5)$$

$$N_k = \sin(\delta_d/2) / (\delta_d/2) \quad (6)$$

当电子注与谐波同步时 ( $\beta_e = \beta_k$ ), 耦合系数  $N_k$  达到最大值. 根据式(4), 当电压满足时  $\Delta E < 0$ , EIO 可能起振. 当工作电压与第  $k$  次谐波同步时, 各次谐波耦合系数满足

$$N_k = 1 \quad (7)$$

$$N_{k+n} = \frac{\sin(n\pi/2)}{n\pi/2} \quad (8)$$

$$N_{k\pm 1} = 0.637 \quad (9)$$

根据式(7)~(9)可以看出, 当电子注与某一次谐波同步时, 其他非同步空间谐波与电子之间的相互作用也是不能忽略的. 同时, 由于小信号条件下对注波互作用的分析并不能完全描述大信号下的物理过程, 因此工作电压需要根据 PIC 模拟结果在一定范围内做进一步的调整.

### 1.3 4 间隙径向 EIO 高频特性分析

本文设计 4 间隙径向 EIO, 径向采用周期性参数(即各个间隙宽度一致, 间隙间距离一致), 应用 CST 仿真软件模拟 EIO 本征模情况. 表 1 给出的结构参数已经过优化. 由于各个相互作用间隙中的场通过电子注通道相互耦合, 因此在选定径向 EIO 工作模式前提下, 间隙的径向参数取决取径向 EIO 工作电压  $V_0$ , 频率可以通过各个间隙的轴向参数进行调节.

表 1 径向 EIO 主要结构参数

Table 1 The parameters of EIO

$L_1/\text{mm}$	$L_2/\text{mm}$	$h_2/\text{mm}$	$R/\text{mm}$
0.6	1.8	4.25	5

在径向 EIO 中, 电子注沿径向运动, 要发生有效的注波互作用, 在相互作用间隙中的电子通道位置

应存在径向方向电场;同时各个相互作用间隙中的场通过电子注通道能够相互耦合,在电子注通道上应存在与径向方向垂直的电场.因此径向 EIO 的工作模式应满足,在电子注通道区域场为类似同轴结构的 TM 模,相互作用区域的场为类似同轴结构的 TEM 模.同时,为了在相同结构参数的情况下获得较高的工作频率,本文中采用了较高阶工作模式,对应模式频率 29.3811GHz,其场分布情况如图所示

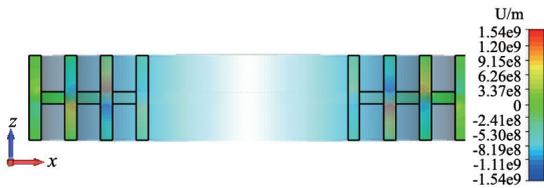


图2 径向 EIO 径向电场分布  
Fig. 2 The radial electric field

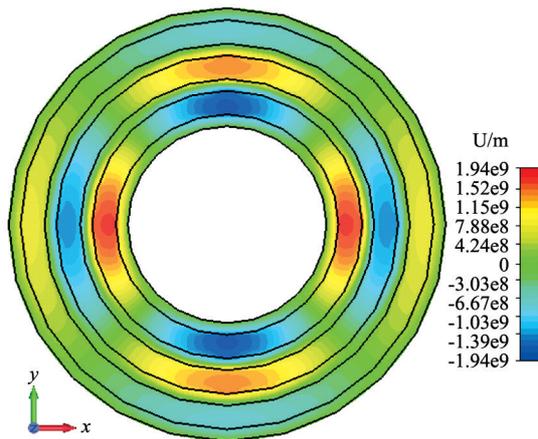


图3 径向 EIO 轴向电场分布  
Fig. 3 The axial electric field

电子注通道上场为类似同轴结构的 TM<sub>23</sub> 模;同时由于电子注通道的存在,在各个相互作用间隙中场为上下反相的类似同轴结构 TEM 模.在电子注通道与相互作用间隙交界处存在较强的径向电场分量,满足注波相互作用条件.本文中取电子注通道边缘区域径向电场周期性扩展后做傅立叶积分,计算作用于电子注的各次径向空间谐波的调制电压比值.

图4为根据冷腔模拟得到的场分布计算出的各次谐波归一化电场幅值,图5为考虑了第17次到第24次谐波的贡献计算出的有效调制电压.理论上, $V_{eff}$ 值越大,径向 EIO 越容易起振.在 $\beta_e \approx \beta_{18}, \beta_{22}$ 处有效调制电压具有较大的值,考虑相对论效应后求得与第18次和第22次谐波同步的工作电压分别为 $V_{18} = 4.5 \text{ kV}$ ,  $V_{22} = 3 \text{ kV}$ .

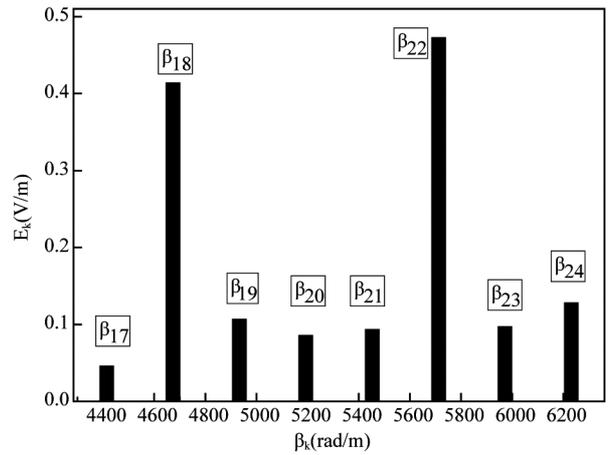


图4 各次谐波归一化电场幅值  
Fig. 4 The normalized amplitude of each harmonic electric field

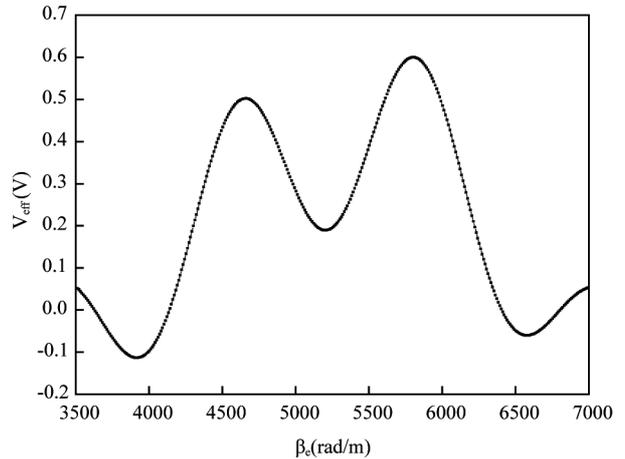


图5 电子注传播常数与有效调制电压  
Fig. 5 The relationship of  $V_{eff}$  and  $\beta_e$

## 2 PIC 模拟分析

径向 EIO 采用孔耦合的方式输出,耦合孔设于第4个间隙上方.采用矩形耦合孔,在间隙内电场为径向,耦合孔内场的模式为 TE<sub>10</sub> 模,因此耦合孔的长边需要与径向方向垂直.设置耦合孔长 2.9 mm,宽 0.2 mm,高 1 mm,高频区域采用表1给出的结构参数.根据第1节中的分析与 PIC 模拟进一步调节,当电压为 5 kV 时,径向 EIO 中有效的激励起所选取的工作模式,粒子模拟结果如图6所示

模拟结果表明:腔体材料采用铜(电导率为  $5.99 \times 10^7 \text{ S/m}$ ),电压为 5 kV,电流为 8.48 A 时,输出功率为 2.6 kW,输出效率为 6.1%,热腔工作频率为 30.011 GHz,比冷腔本征频率提高了 0.63 GHz.

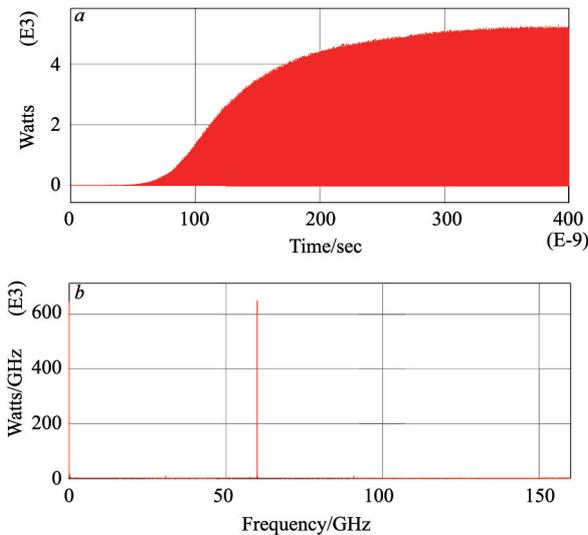


图6 粒子模拟结果(a)输出功率,(b)频谱图  
Fig.6 The PIC simulation results (a) output power, (b) frequency

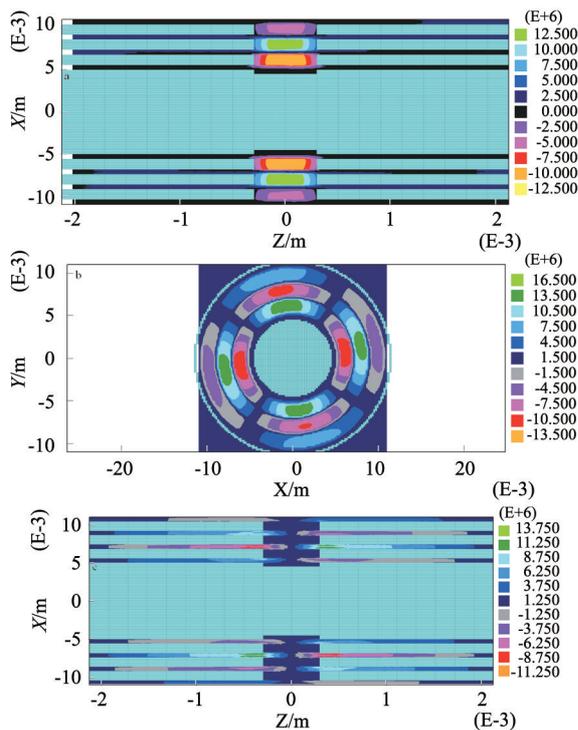


图7 电场分布(a)ZX面轴向电场分布,(b)XY面轴向电场分布,(c)ZX面径向场分布  
Fig.7 The filed distribution (a)  $E_z$  in the Z-X plane, (b)  $E_z$  in the X-Y plane, (c)  $E_x$  in the Z-X plane

如图7所示,为径向EIO稳定工作时的电场分布图.轴向电场主要分布于电子注通道区域,径向电场主要分布于相互作用间隙区域.热腔稳定工作时电场分布与冷腔模拟结果一致,径向电场在电子注通道两侧分布相位相反.电子注通过径向EIO高频结构,电子与高频场发生相互作用并经过一定距离的漂

移段进入下一个相互作用间隙,电子注的调制、群聚、交能三个过程交替进行.

### 3 结论

本文研究了一种新型的径向扩展相互作用振荡器结构,分析了各个参数对输出特性的影响,采用三维模拟软件对注波相互作用进行了分析,在此基础上设计了一支30 GHz,4间隙径向EIO,结果表明在设计电压5 kV、电流8.48 A时,输出功率为2.6 kW,注波相互作用效率为6.1%,证明了径向EIO可以获得良好的输出特性.

径向EIO采用了独特的环形带状电子注,显著的增大了电子注通道面积,相比于传统的EIO结构,在相同电流密度条件下更能满足大功率的需求.本文对于径向EIO高频结构的研究,说明了该种新结构的可行性,为进一步研究紧凑型的高频率、高功率、高效率径向EIO、EIK奠定了基础.

### References

- [1] YAN Yang, YE Ji-Ruo, Particle simulation of 8mm Coaxial extended interaction oscillator (EIO) [J]. *Modern electronic technology*, (鄢扬,叶际若. 8mm 同轴扩展相互作用振荡器(EIO)的粒子模拟研究. *现代电子技术*), 2008, **17**:1-3.
- [2] Day W R, Noland J A. The millimeter wave extended interaction oscillator [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1966, **54** (4):5392543.
- [3] CHEN Ling, YIN Yong, MENG Lin. PIC simulation of W-band sheet beam extended interaction oscillator [J]. *High power laser and particle beams*. (陈玲,殷勇,蒙林. W波段带状注扩展相互作用振荡器的粒子模拟. *强激光与粒子束*), 2012, **24**(12):2869-2872.
- [4] YIN Hai-Rong, GONG Yu-Bin, WEI Yan-Yu. Linear theory of millimeter-wave channel ladder slow-wave structure of traveling wave tube [J]. *High power laser and particle beams*, (殷海荣,宫玉彬,魏彦玉. 毫米波沟道梯型慢波结构行波管的线性理论[J]. *强激光与粒子束*), 2006, **18**(10):1663-1668.
- [5] ZHANG Ke-Qian, LI De-Jie. *Electromagnetic theory in the microwave and optoelectronics* [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, (张克潜,李德杰. 微波与光电子学中的电磁理论. 北京:电子工业出版社), 2001: 123-127.
- [6] ZHU Mei, WANG E-Feng, FENG Jin-Jun. Characteristics of slow synchronous wave traveling-wave tube [J]. *High power laser and particle beams*, (朱玫,王峨峰,冯进军. 慢同步波行波管特性研. *强激光与粒子束*), 2007, **19** (10): 1671-1676.
- [7] DING Yao-Gen. *Theory and Computer Simulation of High Power Klystron* [M]. Beijing: Publishing House of National Defense Industry, (丁耀根. 大功率速调管的理论与计算模拟. 北京:国防工业出版社), 2008:27-54.
- [8] WANG Wen-Xiang, *Microwave engineering* [M]. Sichuan: Uestc Press, (王文祥. 微波工程技术. 四川:电子科技大学出版社), 2006:370-372.