

# 准两腔振荡器的理论和实验研究 \*

李正红 常安碧 鞠炳全 张永辉 向 飞 赵殿林 甘延青 刘 忠 苏 祖 黄 华

(中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

(2006年7月14日收到 2006年8月31日收到修改稿)

根据两腔振荡器和返波管的特点提出了准两腔振荡器,其作用机理是两腔振荡器的机理,结构类似返波管。这种结构主要由调制腔组和换能腔组两部分组成,调制腔组实现电子束速度调制,调制后的电子束在通过一个微波场较弱的区间时实现电子束群聚,然后在换能腔组实现电子能量到微波能量的转化,并通过输出结构输出;同时,调制腔组和换能腔组之间存在微波耦合,换能腔组中的一部分微波能量可以耦合到调制腔组,形成一个正反馈回路,在一定条件下实现微波振荡。根据此理论,根据 Sinus-700 加速器的参数(800 kV, 10 kA)设计了一个 X 波段的高功率微波器件 2.5 维 Particle in Cell (PIC) 程序模拟的效率为 28%, 微波频率为 9.42GHz, 微波输出功率为 2.25 GW, 实验上得到的微波输出为微波频率 9.40 GHz, 微波输出功率 2.44 GW。

关键词: 两腔振荡器, 返波管, 多波切伦可夫微波器件

PACC: 4100, 0200

## 1. 引言

准两腔振荡器属于 O 型器件, 作用机理是 Cherenkov 辐射, 目前利用 Cherenkov 辐射的典型振荡微波器件是返波管(BWO)<sup>[1]</sup>, 由于在返波管中返波辐射随着离阴极距离的减小而增加, 使该器件不利于在高功率下工作, 俄罗斯大电流研究(IHC)提出了多波 Cherenkov 微波器件<sup>[2]</sup>。准两腔振荡器类似多波 Cherenkov 微波器件, 由调制腔组和换能腔组两部分组成, 场分布由结构决定, 通过结构优化使微波腔中微波场集中在输出端, 并电子束尽可能同工作模式作用, 利于器件在高功率下工作, 器件的设计和优化过程是通过 SUPERFISH 和 ASTRA 程序<sup>[3]</sup>给出电子束同微波腔工作模式的相互作用来进进行, 然后用全电磁 2.5 维相对论粒子模拟程序进行验证和进一步优化, 实验上得到的微波输出为微波频率 9.40GHz, 微波输出功率 2.44 GW。

两腔振荡器<sup>[4]</sup>主要有调制腔和换能腔组成, 两者之间存在微波耦合, 在相应电子束驱动下能输出较高功率微波, 并维持近 30% 的效率, 但是存在微波起振困难的问题, 为了克服此缺陷, 准两腔振荡器将调制腔扩展为由 4 个强耦合腔体组成的多腔结

构, 输出腔扩展为由 3 个腔体组成的多腔结构, 形成一个准两腔振荡器, 两个准腔的工作频率非常接近, 但不完全一致, 这样不仅克服了微波起振困难的问题, 而且也能在相应电子束驱动下输出较高功率微波, 并维持近 30% 的效率, 并有效地降低了非工作模式的影响, 同时两个准腔之间的耦合和间距同两腔振荡器一样仍然是控制微波器件效率和输出功率的关键参数。

## 2. 两腔振荡器理论和模型

两腔振荡器结构图<sup>[4]</sup>如图 1 所示, 其工作模式为 TM 模。图 2 为两腔振荡器作用区场分布, 图中实线为模拟结果, 虚线为近似场分布。由图 2 可以看出, 在作用间隙微波场分布可以近似为均匀场<sup>[5]</sup>。作用区近似场分布可以表示为(图 2)

$$E_z(z) \approx \begin{cases} E_1 & (0 < z < d_1), \\ 0 & (L < z < d_1 + L), \\ -E_2 & (d_1 + L < z < d_1 + L + d_2). \end{cases} \quad (1)$$

只考虑工作模式, 微波腔中电子的一维运动方程为<sup>[6]</sup>

\* 国家高技术研究发展计划(批准号 863-803-403)资助的课题。

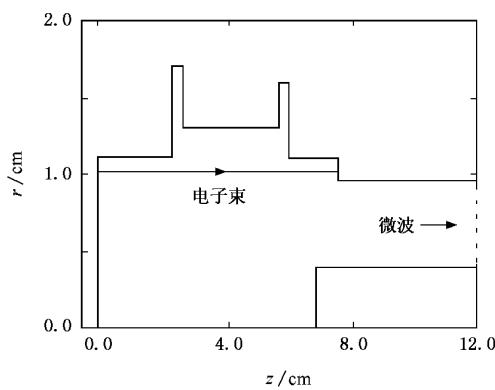


图 1 两腔振荡器结构示意图

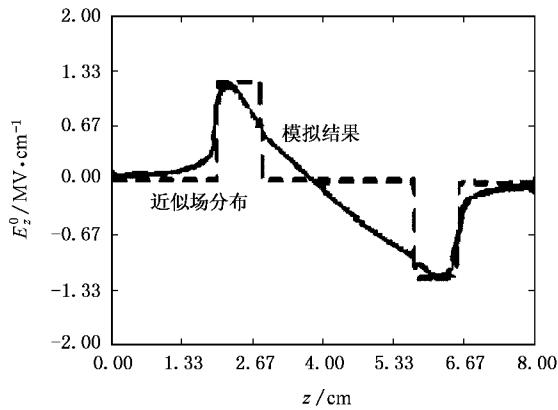


图 2 两腔振荡器作用区场分布

$$\frac{d\gamma}{dz} = \frac{e}{m_0 c^2} \alpha_0 E_z(z) \sin \varphi + \frac{e}{m_0 c^2} E_z^{sc}, \quad (2a)$$

$$\frac{d\varphi}{dz} = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}, \quad (2b)$$

式中  $\alpha_0$  为微波场幅度,  $\alpha_0 E_z(z)$  为实际微波场电场,  $E_z^{sc}$  为空间电荷场的轴向分量,  $m_0$  为电子静止质量,  $c$  为真空光速,  $\gamma$  为电子相对论速度因子,  $\lambda$  为微波波长,  $\varphi = \omega t$ .

方程(2)的初始条件( $z=0$ )为

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}, \varphi = \varphi_0.$$

这里  $v_0$  为电子进入微波腔时的速度,  $\varphi_0 = \omega t_0$  为电子注入相位.

微波腔中第  $n$  个电子束段中电子在  $t$  时刻的运动状态为( $\gamma_n, \varphi_n$ ),忽略空间电荷场的作用时,方程的一级近似解为

$$\varphi \approx \varphi_0 + k' V_1 L \sin \varphi_0 + \varphi_s, \quad (3)$$

$$\gamma \approx \gamma_0 + V_1 \sin(\varphi_0)$$

$$- V_2 \sin(\varphi_0 + k' V_1 L \sin \varphi_0 + \varphi_s), \quad (4)$$

这里

$$V_1 = \frac{e \alpha_0 E_1 d_1}{m_0 c^2}, V_2 = \frac{e \alpha_0 E_2 d_2}{m_0 c^2},$$

$$k' = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{1}{\sqrt{(\gamma_0^2 - 1)^3}}, \varphi_s \approx \frac{2\pi L}{\lambda} \frac{\gamma_0}{\sqrt{(\gamma_0^2 - 1)}}.$$

在相对论微波器件中,电子进入微波腔时的速度接近光速,忽略初始速度分散度影响<sup>[7]</sup>,将初始电子束近似为单能束,同时利用数学关系

$$e^{ix \sin \varphi} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} i^m J_m(x) e^{im\varphi},$$

其中  $J_m(x)$  为  $m$  阶 Bessel 函数<sup>[8]</sup>.

由此可得当微波场幅度为  $\alpha_0$  时,电子束中电子相对论因子的平均变化为

$$\bar{\Delta \gamma} = \gamma_0 - \bar{\gamma},$$

$$= - V_2 J_1(k' V_1 L) \cos(\varphi_s). \quad (5)$$

根据能量守恒定律,可得束波转换效率为<sup>[9]</sup>

$$\eta = \frac{\bar{\Delta \gamma}}{\gamma_0 - 1}. \quad (6)$$

束波互作用饱和时,  $V_1 + V_2 \approx \gamma_0 - 1$ ,同时在微波腔的设计中可以使得  $\cos(\varphi_s) = 1$ ,则由(5)和(6)式可得

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{V_2 J_1(\alpha)}{V_1 + V_2} \\ &= \frac{E_2 d_2 J_1(\alpha)}{E_1 d_1 + E_2 d_2}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $\alpha \approx k' V_1 L$  为与微波腔场强有关的微波腔作用因子<sup>[10]</sup>,  $d_1$  和  $d_2$  分别为两腔有效作用长度(见图 2).

由(7)式可以看出,当  $\alpha \approx 1.5$  时,束波转换效率  $\eta$  达到一个理想值,则互作用饱和状态下的理想束波转换效率为<sup>[11]</sup>

$$\eta = 0.588 \frac{E_2 d_2}{E_1 d_1 + E_2 d_2}. \quad (8)$$

由(8)式可以看出,束波转换效率在 29.4%—58.8% 之间.当  $E_2 d_2 \gg E_1 d_1$  时,束波转换效率达到最大,其值为 0.588,而当  $E_2 d_2 = E_1 d_1$  时,束波转换效率为最小,其值为 0.294.图 3 为  $E_2 d_2 \gg E_1 d_1$  时,束波转换效率随微波腔中微波腔作用因子的变化曲线<sup>[12,13]</sup>,当  $\alpha = 1.5$  时,束波转换效率为理想状态值<sup>[14]</sup>.

### 3. 2.5 维 PIC 程序模拟

采用图 4 所示结构的振荡器,由环形电子束

(800 kV, 10 kA)驱动,引导磁场为3.5 T时,得到图5,6,7,8所示2.5维PIC程序的模拟结果,输出模式为 $\text{TM}_{01}$ 。图5为输出处微波电场随时间的变化图。图6为输出处电场的频谱,微波频率为9.42 GHz。图7为输出处微波功率随时间的变化图,微波功率为2.25 GW。图8为束波互作用效率随时间的变化曲线,由图8可以看出其效率为28%。

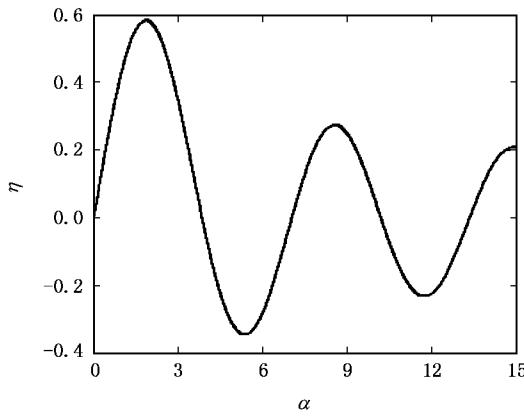


图3 束波转换效率随微波腔作用因子的变化曲线

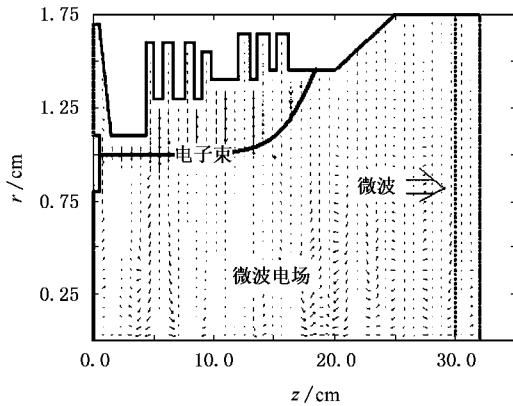


图4 微波模拟结构图

#### 4. 微波实验

微波功率测量是采用馈源辐射场远场测量来测量微波器件,测量时接收天线处在距离馈源喇叭的远场区,接收天线是BJ-100开口波导,接收的微波信号先通过高频电缆、衰减器和检波器,最后检波后的信号通过信号电缆输出到示波器上显示(测试框图见图9)。微波频率测量是采用混频法进行,利用标准信号源向混频器注入频率为 $f$ 的标准信号,并同时向混频器注入所测微波信号,然后利用示波器

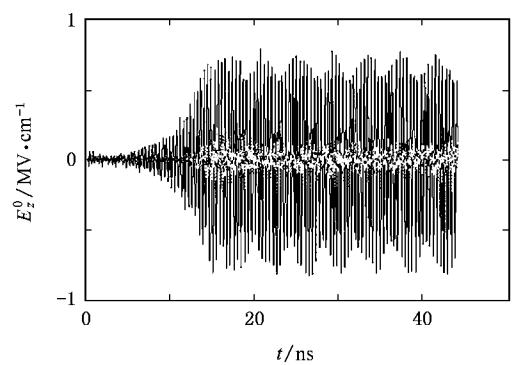


图5 输出处微波电场随时间的变化图

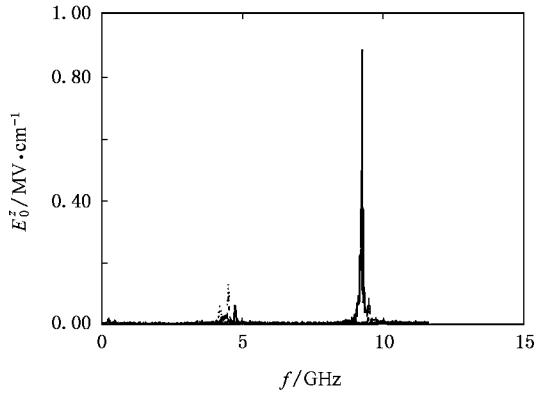


图6 输出处电场的频谱

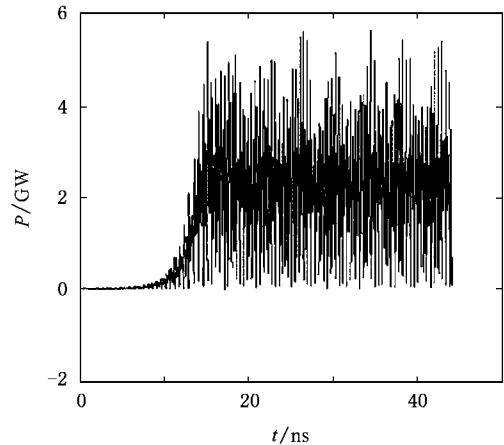


图7 输出处微波功率随时间的变化图

测量并计算出差频的信号频率 $\Delta f$ ,则可以得到微波信号频率( $f + \Delta f$ 或 $f - \Delta f$ )。

根据馈源天线的增益接收波导的有效接收截面、电缆和衰减器的损耗及检波器的检波功率,利用下式可以计算出器件的产生功率 $P_t$ :

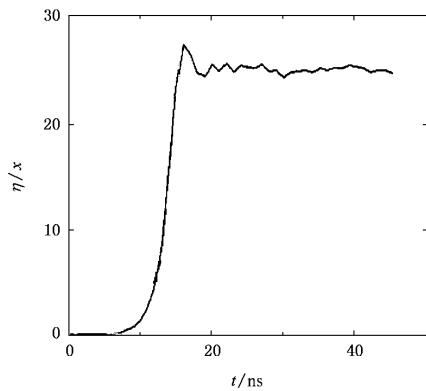


图 8 束波互作用效率随时间的变化曲线

微波测量波形 峰值和脉冲宽度见表 1.

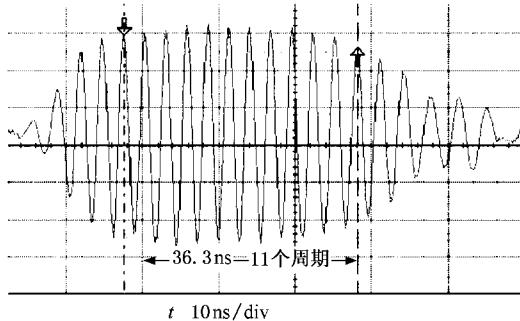


图 11 差频信号(基频为 9.7 GHz)

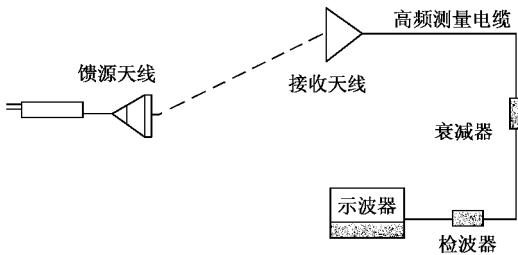
表 2 为微波频率测试结果 ,微波频率 9.4 GHz.  
图 11 是典型差频信号波形 .

图 9 功率测试框图

$$P_t = \frac{4\pi R^2 P(V)K}{A_r G_t}, \quad (9)$$

式中  $V$  表示检波后经电缆传输在示波器读到的电压幅度 , $P(V)$  表示微波检波功率 , $A_r$  是接收波导天线的有效面积 , $K$  是波导接收天线到检波器之间的高频电缆和衰减器的总衰减 , $R$  表示接收天线到馈源天线中心的距离 , $G_t$  是馈源天线的增益 .

表 1 为微波功率测量结果 ,微波功率 2.44 GW ,脉冲宽度 18 ns ,图 10 为微波器件典型输出波形 ,CH2 与 CH3 分别为辅路微波测量波形 ,CH4 为主路

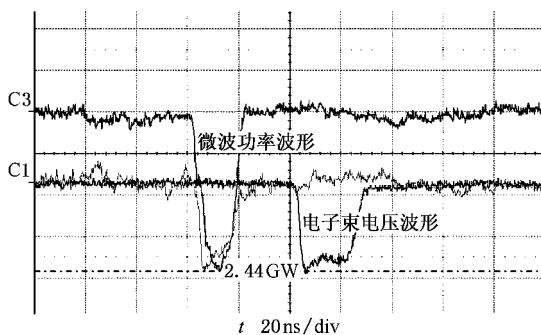


图 10 单次典型微波辐射波形

表 1 微波功率容量测试记录表

测试序号	脉冲重复频率/Hz	微波信号幅值/mV	辐射微波功率/GW	微波脉冲宽度/ns
1	单次	56.5	2.20	19
2	单次	56.5	2.20	19
3	单次	61.6	2.44	17

表 2 微波频率测试记录表

测试序号	标准信号源输出微波频率 f/GHz	差频后测试微波频率 Δf/GHz	所测微波频率/GHz	备注
1	9.0	0.41	9.39	$f + \Delta f$
2	9.7	-0.30	9.40	$f - \Delta f$

## 5. 讨 论

本文用群聚的观点来研究高功率微波器件 ,克服了常规色散方法中不能反映大信号的不足 ,同时由于器件中的电子束是环形电子束 ,并紧贴管壁运动 ,束波互作用长度小于电子束等离子体波波长 ,因而可以忽略空间电荷效应 . 器件理论模型中涉及的器件结构很简单 ,是一种新型器件 ,现在更深入的研究工作仍在进行 ,下一步的工作准备将这种器件应用于高功率微波放大器 . 在实验中器件实验功率 (2.44 GW ) 大于模拟是因为在模拟中功率 (2.25 GW ) 电子束参数为 800 kV ,10 kA , 低于加速器的极限运行参数 (1 MV ,10 kA ) , 实验中最大微波功率是在电子束功率高于模拟参数条件下获得的 .

- [ 1 ] Xie H Q ,Liu P K 2006 *Chinese Physics* **15** 2042
- [ 2 ] Freund H P 2000 *IEEE Trans . Plas . Sci.* **28** 748
- [ 3 ] Li Z H , Hu S K , Zhang H 2002 *High Power Laser and Particle Beam* **13** 99 ( in Chinese ) 李正红、胡克松、张 红 2002 强激光与粒子束 **13** 99 ]
- [ 4 ] Li Z H , Meng F B ,Chang A B 2005 *Acta Phys . Sin.* **54** 3578 ( in Chinese ) 李正红、孟凡宝、常安碧 2005 物理学报 **54** 3578 ]
- [ 5 ] Huang H , Fan Z K , Tan J et al 2004 *Acta Phys . Sin.* **53** 1129 ( in Chinese ) [ 黄 华、范植开、谭 杰等 2004 物理学报 **53** 1129 ]
- [ 6 ] Chen X , Lindsay P A , Zhang J 2000 *IEEE Trans . Plas . Sci.* **28** 462
- [ 7 ] Barroso J J 2000 *IEEE Trans . Plas . Sci.* **28** 652
- [ 8 ] Brant H E 1996 *IEEE Trans . Plas . Sci.* **28** 924
- [ 9 ] Zhu M ,Wu H S 1987 *Acta Electronics* **4** 8 ( in Chinese ) 朱 敏、吴 鸿适 1987 电子学报 **4** 8 ]
- [ 10 ] Wang S H , Luo Z H , Luo Y X 1980 *Principle of Linac for Proton* ( Beijing :Atomic Energy Press ) p143 ( in Chinese ) [ 王书鸿、罗紫华、罗应雄 1980 质子直线加速器原理 ( 北京 原子能出版社 ) 第 143 页 ]
- [ 11 ] Wu H S 1986 *Principle of Microwave Electronics* ( Beijing , :Science Press ) p250 ( in Chinese ) 吴宏适 1986 微波电子学原理 ( 北京 科学出版社 ) 第 250 页 ]
- [ 12 ] Liang K M 1978 *Mathematics and Physics Method* ( Beijing , People 's Education Press ) p364 ( in Chinese ) 梁昆淼 1978 数学物理方法 ( 北京 :人民教育出版社 ) 第 364 页 ]
- [ 13 ] Li Z H , Meng F B , Hu S K 2004 *Acta Phys . Sin.* **53** 3627 ( in Chinese ) 李正红、孟凡宝、胡克松 2004 物理学报 **53** 3627 ]
- [ 14 ] Li Z H , Huang H , Meng F B 2005 *Acta Phys . Sin.* **54** 1564 ( in Chinese ) 李正红、黄 华、孟凡宝 2005 物理学报 **54** 1564 ]

## Experimental and theoretical study of a quasi-bitron as a new high-power microwave device \*

Li Zheng-Hong Chang An-Bi Ju Bing-Quan Zhang Youg-Hui Xiang Fei Zhao Dian-Lin

Gan Yan-Qing Liu Zhong Su Chang Huang Hua

( Institute of Applied Electronics , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China )

( Received 14 July 2006 ; revised manuscript received 31 August 2006 )

### Abstract

A new type of high power microwave device is developed as a quasi-bitron. The device is simple and composes of two parts , the modulation cavity and the extraction cavity , with a coupling between the cavities. The structure has two working modes , one of them is the working mode , and competition between modes can be easily avoided even when the RF field in the device is very strong compared with the BWO( backward wave oscillator ). Besides the theoretical analysis , the model has been realized on 2.5 PIC( particle in cell ) simulation code. A 9.42GHz bitron oscillator is designed and its theoretical efficiency is 29.4% . The simulation shows the device achieves the efficiency 28% when the beam is 800 kV and 10 kA , and outputs RF power of 2.25 GW. The experiment was also carried out on Sinus-700 accelerator. The measured microwave power is 2.44 GW at the frequency 9.4G Hz.

**Keywords** :bitron ,backward wave oscillator( BWO ) ,multi-wave Cherenkov device

**PACC** :4100 ,0200

\* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China( Grant No.863-803-403 ).