

# 重复频率 X 波段类周期加载微波腔的实验研究

马乔生<sup>1,2;1)</sup> 李正红<sup>2</sup> 孟凡宝<sup>1</sup> 甘延青<sup>1</sup> 刘忠<sup>1</sup> 常安碧<sup>1</sup> 周传明<sup>3</sup>

1 (中国工程物理研究院应用电子学研究所 绵阳 621900)

2 (中国工程物理研究院研究生部 北京 100088)

3 (中国工程物理研究院 绵阳 621900)

**摘要** 在CHP-01加速器上对我所提出的X波段类周期加载微波腔进行了实验研究. 在实验中, 首先对加速器进行了调试, 使其能够稳定运行; 然后对磁场、电压等参数与微波输出的关系进行了研究; 最后在二极管电压约为790kV、电流约为6.7kA时得到了微波输出功率为1.4GW、微波频率为9.4GHz、微波脉宽为30ns、束波转换效率为26%的实验结果.

**关键词** 高功率微波 类周期加载微波腔 加速器

## 1 引言

随着高功率微波技术研究的深入, 重复频率高功率微波产生技术的研究就成为了当务之急. 为了解决这个问题, 在相对论返波管(RBWO)<sup>[1, 2]</sup>的基础上, 提出了一种新型的X波段高功率微波器件——类周期加载微波腔<sup>[3]</sup>. 相对论返波管(RBWO)器件在X波段高功率微波研究具有代表性, 然而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. 为了克服这种问题, 采用类周期加载微波腔<sup>[3]</sup>, 通过结构优化, 使电子束同前向波作用, 在微波腔中微波场主要集中在输出端, 利于器件在高功率下工作.

以自行研制的重复频率电子束加速器CHP-01作为驱动源对X波段类周期加载微波腔进行了实验, 其结果为: 微波功率1.3GW, 脉冲宽度~30ns, 微波频率9.4GHz, 以100Hz的重复运行.

## 2 类周期加载微波腔结构模型<sup>[3]</sup>

图1为类周期加载微波腔结构图, 图中1区( $0 < z < L_1$ )为微波腔主结构(周期结构), 2区( $L_1 < z < L_2$ )是漂移段, 3区( $L_2 < z < L_3$ )是换能区, 图2为微波腔中 $r = 0.7\text{cm}$ 处轴向电场 $E_z$ 的近似分布.

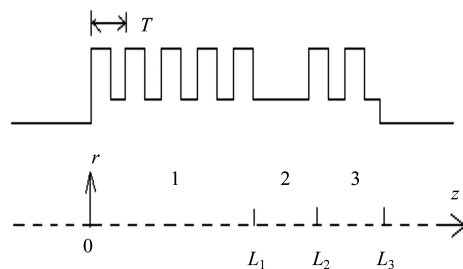


图1 类周期加载微波腔结构图

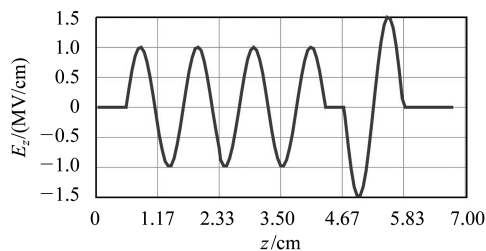


图2 类周期加载微波腔的近场分布

图3为束波转换效率随微波场幅度的变化曲线, 由图可以看出, 束波转换效率随微波场幅度不断变化, 存在一个峰值转换效率 $\eta_{\max}$ , 及其对应的微波场 $E_{\text{opt}}$ ; 当电子初始能量变化时, 不仅峰值转换效率改变, 而且对应的微波场幅度也改变, 只有当电子初始能量同结构平衡电子能量 $\gamma_s$ 一致<sup>[4]</sup> (即:  $\gamma_0 = \gamma_s$ )时(曲线2), 峰值转换效率最大; 同时峰值转换效率对应微波场幅度随电子初始能量升高而提高(如: 曲线3).

2005 - 01 - 17 收稿, 2005 - 04 - 14 收修改稿

1) E-mail: mqshcaep@yahoo.com.cn

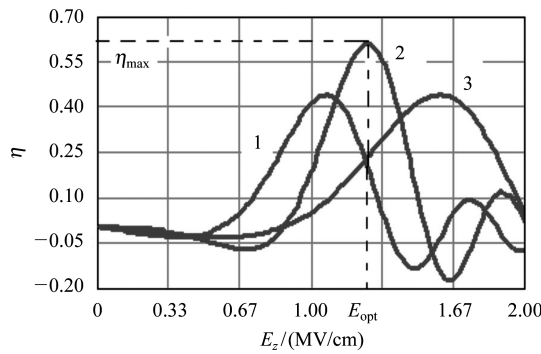


图 3 束波转换效率随微波场幅度的变化图  
1:  $\gamma_0 = 0.8\gamma_s$ , 2:  $\gamma_0 = \gamma_s$ , 3:  $\gamma_0 = 1.2\gamma_s$ .

### 3 实验研究方法及结果

微波功率测量是用大功率检波管在微波辐射空间测量, 辐射喇叭的增益  $G = 51$ , 测量探头喇叭的有

效吸收面积  $S = 0.8\text{cm}^2$ , 因此辐射喇叭辐射微波功率(即: 微波器件产生的微波辐射)为<sup>[5]</sup>

$$P = \frac{4\pi L^2 p(V)}{G S}, \quad (1)$$

式中  $L = 3.2\text{m}$  为辐射喇叭同探头喇叭之间的距离,  $p(V)$  为探头喇叭接受的微波辐射功率,  $V$  为探头喇叭输出的信号幅度. 微波频率是通过混频(或差频)<sup>[6]</sup>来测量.

#### 3.1 加速器参数的调试

由于实验是在 CHP-01 加速器上进行的, 加速器能否稳定运行将直接影响到实验的可靠程度, 因此首先对加速器进行了调试, 得到了器件实验所要求的二极管阻抗约为  $120\Omega$  的比较稳定的  $100\text{Hz}$  重复频率运行的电压和束流输出(图 4), 这样就为后面的器件实验打下了良好的基础.

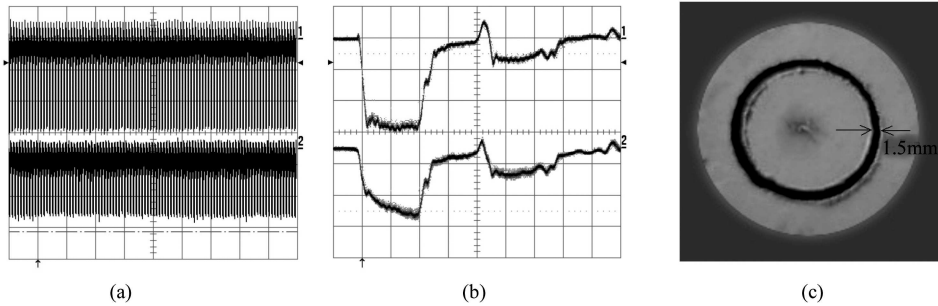


图 4 二极管输出波形及束斑  
(a)  $100\text{Hz}$  运行的波形序列; (b)  $100\text{Hz}$  运行的波形重叠; (c) 束斑. 1. 电压  $273\text{kV}/\text{div}$ ; 2. 电流  $3\text{kA}/\text{div}$ ;  $20\text{ns}/\text{div}$ .

#### 3.2 微波频率与磁场强度的关系

类周期加载微波腔需要一个较强的引导磁场对电子束进行引导. 该引导磁场的大小将影响电子束的质量, 因此将不可避免地影响到输出微波频率和功率.

微波频率是一个重要的参数, 在本实验中, 首先测量了微波频率随引导磁感应强度之间的关系(图 5). 由于频率测量是通过射频信号与标准信号进行差频后测量低频信号得到的, 因而测量误差较小, 约为  $\pm 20\text{MHz}$  量级.

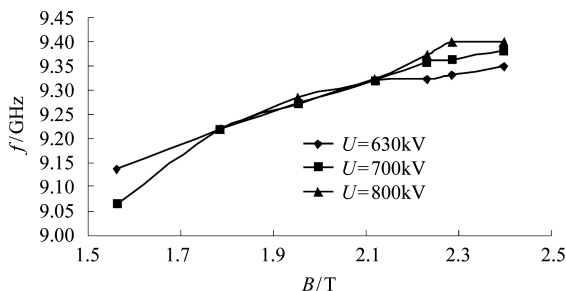


图 5 微波频率与引导磁感应强度之间的关系

从实验结果看, 微波频率首先随着磁感应强度的增强大而增大, 直到磁感应强度约大于  $2.3\text{T}$  时, 微波频率趋于稳定. 同样地, 从实验结果可以看出, 随着电子束束压的升高, 微波频率增大. 该结果的出现主要是由于随着磁感应强度的增大和电压的升高, 电子束的纵向速度分量增大, 从而升高了电子束直线  $\omega = k_z v_0$  的斜率, 实际上使得该直线与微波腔色散曲线交点处的频率增大, 当磁感应强度大于一定值之后, 电子束的横向速度分量已很小, 因此微波频率趋于稳定<sup>[7]</sup>.

#### 3.3 微波功率与磁场强度的关系

输出微波的功率是衡量器件水平的一个重要参数, 同时输出微波的功率又受到引导磁场强度的影响, 在本实验中, 测量了输出微波功率与磁感应强度之间的关系. 在同样的条件下, 若干次测量值之间存在着不大于  $5\%$  的误差, 这主要是由于: 1) 爆炸发射电子枪几次发射之间电流的微小差异; 2) 读数误差.

从测量结果来看, 当电子束的束压取 800kV 时, 输出微波功率在磁感应强度约为 2.3T 时有一个最大点.

图 6 可以看出, 对于输出微波与引导磁场之间的关系, 实验结果和模拟结果在引导磁场的强度大于 2.3T 时不相符合. 这主要是由于在数值模拟时, 电子束被认为是一个单能束, 而在实验中, 由于空间电荷效应, 因此越靠近轴线, 电子束中的电子能量越低. 正是由于这些低能电子在大于 2.3T 与引导磁场发生回旋共振吸收, 因此造成输出微波减小.

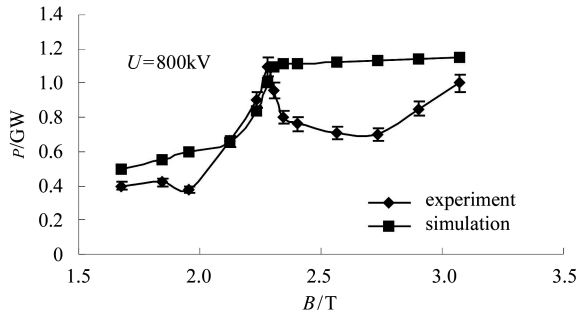


图 6 微波输出功率与引导磁感应强度之间的关系

### 3.4 微波输出功率与电子束束压的关系

电子束束压(阻抗一定时, 及为电子束功率)也是影响微波输出功率的一个重要参数. 对于某一特定的磁感应强度, 总有一个特定的电压值使得电子束的纵向速度分量取得最大值, 从而对应着最大的微波输出<sup>[8]</sup>.

图 7 为微波输出功率与电子束束压之间关系(测量误差产生的原因与前面解释的一样). 从图中可以看出, 当磁感应强度为 2.3T, 如果取电子束束压约为 800kV 时, 不论实验结果还是模拟结果都可以得到最大的微波输出.

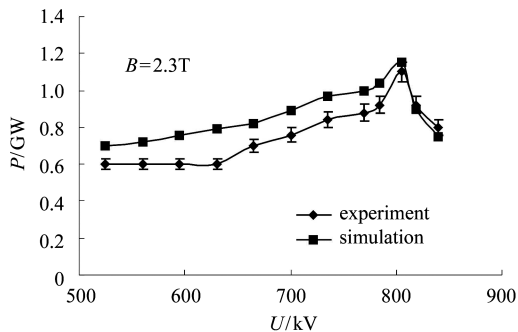


图 7 微波输出功率与电子束束压之间的关系

为了保证器件得到最大的微波输出, 电子束束压必须选在束波同步的范围内, 太高或太低的电子束束压都可能使电子束与空间谐波的作用不充分, 从而降低束波转换效率, 降低输出微波的功率. 这就是取电子束束压为 800kV 的原因.

### 3.5 重复频率运行实验

通过上面的研究, 最后在取磁感应强度为 2.3T 的情况下, 对二极管阻抗和电压进行了仔细的调节, 最后在二极管输出电压为 790kV, 束流约为 6.7kA 得到最佳的微波输出. 图 8 即为在最佳状态下 100Hz 重复频率运行时的波形, 其中微波功率约为 1.4GW、微波频率为 9.4GHz、微波脉宽约为 30ns、束波转换效率约为 26%.

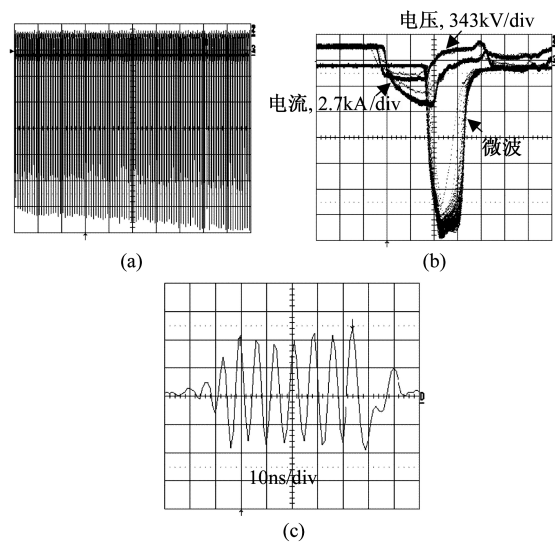


图 8 100Hz 重复频率运行时的输出波形

(a) 100Hz 运行的波形序列; (b) 100Hz 运行的波形重叠序列(20ns/div); (c) 差频法测得的微波波形(基频为 9.13GHz).

## 4 结论

在 CHP-01 加速器上, 对提出的 X 波段类周期加载微波腔进行了实验研究, 最后在二极管电压约为 790kV、电流约为 6.7kA 时得到了微波输出功率为 1.4GW、微波频率为 9.4GHz、微波脉宽为 30ns、束波转换效率为 26% 的实验结果, 该结果达到了国内先进水平并与国际先进水平相近.

## 参考文献(References)

- 1 LIU Guo-Zhi, CHENG Chang-Hua, ZHANG Yu-Long. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(4): 467—470 (in Chinese)  
(刘国志, 陈昌华, 张玉龙. 强激光与粒子束, 2001, **13**(4): 467—470)
- 2 XIE Hong-Quan, YAN Yang, LIU Sheng-Gang. High Power Laser and Particle Beams, 2001, **13**(3):345—348 (in Chinese)  
(谢鸿全, 郗杨, 刘盛纲. 强激光与粒子束, 2001, **13**(3):345—348)
- 3 LI Zheng-Hong, MENG Fan-Bao. High Power Laser and Particle Beams, 2004, **16**(3):367—371 (in Chinese)  
(李正红, 孟凡宝. 强激光与粒子束, 2004, **16**(3): 367—371)
- 4 LIU Nai-Quan. Accelerator Theory. Beijing: Atomic Energy Press, 1990. 276—285 (in Chinese)  
(刘乃泉. 加速器理论. 北京: 原子能出版社, 1990. 276—285)
- 5 ZHANG Fu-Sun, ZHANG Jin-Min. Antenna Measurement. Xi'an: Xi'an Electronic Scientific University Press, 1995. 149—160 (in Chinese)  
(张福顺, 张进民. 天线测量. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1995. 149—160)
- 6 TANG Shi-Xian. Microwave Measurement. Beijing: Beijing Scientific Technology University Press, 1990. 242—250 (in Chinese)  
(汤世贤. 微波测量. 北京: 北京理工大学出版社, 1990. 242—250)
- 7 QIAN Bao-Liang. Plasma- or Dielectric-Loaded Backward-Wave Oscillator. Tsinghua University Ph. D Thesis, 1996,**11**: 56—59(in Chinese)  
(钱宝良. 具有等离子体背景或电介质衬套的返波管振荡器. 清华大学博士论文, 1996, **11**: 56—59)
- 8 MA Qiao-Sheng, LIU Qing-Xiang, SU Chang. High Energy Phys. and Nucl. Phys., 2003, **27**(6): 542—545 (in Chinese)  
(马乔生, 刘庆想, 苏昶. 高能物理与核物理, 2003, **27**(6): 542—545)

## Experimental Investigation of Repetitive X-Band Quasi-Periodic RF Cavity for High Power Microwave Source

MA Qiao-Sheng<sup>1,2;1)</sup> LI Zheng-Hong<sup>2</sup> MENG Fan-Bao<sup>1</sup> GAN Yan-Qing<sup>1</sup>  
LIU Zhong<sup>1</sup> CHANG An-Bi<sup>1</sup> ZHOU Chuan-Ming<sup>3</sup>

1 (Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China)

2 (Graduate Department, CAEP, Beijing 100088, China)

3 (Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract** A novel resonator of quasi-periodic structure is introduced in the paper. On the accelerator CHP-01, its output power and frequency's dependences on system parameters are experimentally investigated. When voltage and current of repetitive diode are 790kV and 6.7kA, respectively, and its repetitive rate is 100Hz, the performance of 1.4GW microwave output power at 9.4GHz microwave frequency with 30ns pulse width and 26% conversion efficiency are reached.

**Key words** HPM, quasi-periodic RF cavity, accelerator

---

Received 17 January 2005, Revised 14 April 2005

1) E-mail: mqshcaep@yahoo.com.cn