

## 8mm 二次谐波回旋速调放大器的研究

徐寿喜, 刘濮鲲, 张世昌, 粟亦农, 顾伟, 秦文珍, 金锋, 薛谦忠, 耿志辉

(中国科学院电子学研究所, 北京 100190)

**摘要:**对8mm高功率二次谐波回旋速调放大器进行了理论研究和优化设计,已研制出回旋速调放大器实验样管,并进行了热测实验,得到了如下结果:在中心频率为35GHz的情况下,得到的最大脉冲输出功率为180kW,效率为13%,增益为21dB;在电子束电压为58kV,电子束电流为25A的情况下,得到了150kW的输出功率,3dB带宽110MHz(0.3%)。

**关键词:**毫米波;回旋速调放大器;二次谐波  
**中图分类号:**TN129 **文献标识码:**A

## STUDIES ON 8mm SECOND HARMONIC GYROKLYSTRON AMPLIFIER

XU Shou-Xi, LIU Pu-Kun, ZHANG Shi-Chang, SU Yi-Nong, GU Wei, QIN Wen-Zhen,  
JIN Feng, XUE Qian-Zhong, GENG Zhi-Hui

(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Theoretical research and optimization design of 8mm second harmonic gyrokylytron amplifier were reported. A three-cavity, second harmonic gyrokylytron amplifier prototype was fabricated according to the results of numerical simulation. Initial experiments show a peak output power of 180 kW at 35 GHz with an efficiency of 13% and a gain of 21dB. A peak output power of 150 kW with a 3-dB bandwidth of 110 MHz (0.3%) at 58kV beam voltage and 25A beam current was obtained.

**Key words:** millimeter wave; gyrokylytron amplifier; second harmonic

### 引言

回旋速调放大器在毫米波段具有高峰值功率、高平均功率和一定带宽等优点,在高性能毫米波雷达、电子对抗、通信和高能加速器等领域有着广泛的应用前景,在国际上受到特别的重视,并取得了一系列重大进展.俄罗斯科学院应用物理研究所(IAP)和美国海军实验室(NRL)等单位研制出了一批高水平的回旋速调放大器.其中,IAP研制的Ka波段二次谐波回旋速调放大器,获得了260kW峰值输出功率、18%的效率和17dB增益,带宽为0.1%.由美国海军实验室领头,已研制出峰值功率210kW、饱和增益23dB、带宽0.36%、效率37%的Ka波段回旋速调放大器<sup>[1-3]</sup>.国内回旋管放大器方面的研究在十·五期间才刚刚起步,由于国外的技术封锁,目前的研究虽然取得了很大进步,但是还有一定的差距<sup>[4,5]</sup>.下面介绍中科院电子所独立自主开展的

8mm二次谐波回旋速调管放大器方面的最新研制工作.

回旋速调放大器由磁控式注入电子枪产生螺旋形电子注.在输入腔,高频信号对电子注进行初始的角向群聚,然后通过无场漂移区,进入群聚腔激励起高频场,高频场进一步群聚电子束,在输出腔电子束和高频场完成相互作用,高频信号得到放大,通过真空密封窗输出到负载.

在高频系统、磁控注入电子枪、电子注-波相互作用模拟分析的基础上,研制出了8mm二次谐波回旋速调放大器,并进行了热测实验,得到了如下结果,当中心频率为35GHz时,最大脉冲输出功率为180kW,效率为13%.

### 1 模拟与设计

回旋速调放大器主要部分包括磁控式注入电子枪、聚焦系统、相互作用线路、收集极和输出窗等(见

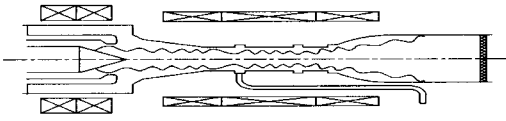


图1 三腔回旋速调管放大器的结构示意图

Fig. 1 A schematic diagram of the three - cavity gyrokystron amplifier

图1),考虑到电子注-波互作用的特点、腔体的损耗及功率容量,腔体的工作模式为圆电模  $TE_{021}$  模,高频场和电子束的二次回旋谐波进行互作用。

中科院电子所研制的 8mm 二次谐波回旋速调管放大器所涉及到的关键技术如输入耦合系统、测试技术等都需要通过一些创新手段来解决,尤其是高频场和电子束高次谐波互作用为整管子的设计和制作带来一定的难度。

### 1.1 互作用回路的设计

微波线路的设计包括下面几个方面:输入耦合系统、中间腔、输出腔、漂移管的耦合和损耗、输出窗等。

输入耦合系统包括标准矩形波导、副腔(谐振模式为  $TE_{811}$  模式)和主腔(谐振模式为  $TE_{021}$ ),其中主腔和副腔共轴。输入的高频信号通过标准矩形波导耦合到副腔中激励起在工作频率的  $TE_{811}$  模式,  $TE_{811}$  模再通过耦合槽在主腔里激励起相同频率的  $TE_{021}$  模式。主腔由 4 个耦合槽在角向对称排列。为了真实地模拟输入腔在整管中的结构,在主腔两端加入一定长度的截止漂移段,利用三维电磁软件 HFSS 对其进行了模拟计算,模拟过程中,主腔和副腔的尺寸以及耦合槽的大小,需要不断调整,直到主腔内建立起稳定的  $TE_{021}$  模谐振,并满足一定的要求。

中间腔是由谐振腔和两边连接的截止漂移段构成的,谐振腔为两端开孔的圆柱形群聚腔。

输出腔通过耦合环和切比雪夫(Dolph-Chebyshev)渐变输出微波功率,大大地抑制了收集极主要杂模  $H_{03}$  模。它与输出腔连接在一起构成输出耦合系统(见图2)。为了展宽频带,三腔频率的设计采用参差调谐原理拓展带宽,同时三腔 Q 值的选取也要重点考虑。

漂移管的耦合和损耗是设计中关注的另一个领域。各个腔体之间的漂移段加载了衰减瓷,来抑制不必要的振荡和腔体之间的串音。实验中要设法控制衰减瓷的厚度。

输出窗厚度为二分之一波长,介质采用 95% 的  $Al_2O_3$ 。在频率 34.5 ~ 35.3GHz 范围内驻波比小于

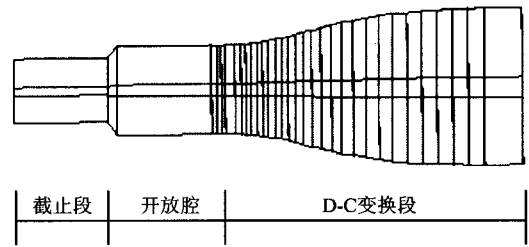


图2 输出耦合系统

Fig. 2 Output coupling system

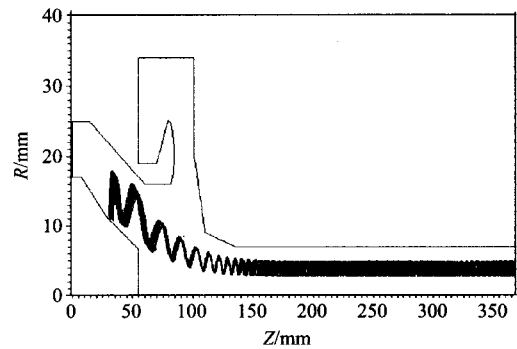


图3 电子注轨迹

Fig. 3 Electron beam trajectory

### 1.2.

### 1.2 电子光学系统的设计

电子束要完成互作用,必须要有合适的高质量的电子束,可采用双阳极磁控注入式电子枪产生空心电子束。电子束的横向能量可以方便地利用第一阳极、第二阳极电压以及阴极区的外部磁场进行调节。提供的电子束具有高的横向速度、较小的轴向速度及较小的速度零散是研制设计中考虑的重要因素。

磁场的位形对电子注的质量有决定性的影响。回旋速调放大器要求在阴极区、过渡区(磁压缩区)和互作用区具有确定的磁场分量。采用线包产生的磁场调试比较方便,可以很方便地通过改变线圈电流来调节磁感应强度。

将电子枪边界的初步设计参数和采用 CTA 软件模拟计算的磁场,带入 EGUN 软件进行优化,不断反复调整,最终得到了考虑空间电荷效应时的双阳极磁控注入式电子枪的形状和电子轨迹。图3给出了电子枪的形状和电子轨迹。

### 1.3 注-波互作用的模拟

利用自主开发的非线性计算软件 GKLSC 和电子科技大学开发的 2.5 维粒子模拟软件 CHIPIC,对二次谐波回旋速调放大器从电子枪阴极电子发射、注-波互作用至电子回收进行全程模拟。通过大量

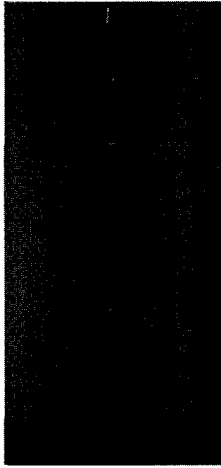


图4 回旋速调放大器样管  
Fig. 4 Prototype of the Ka-band gyrokystron

模拟计算,获得了 250kW 以上的输出功率,28% 的电子效率,110MHz 的带宽<sup>[6,7]</sup>.

## 2 实验测试

在以上模拟分析的基础上,研制出 8mm 二次谐波回旋速调放大器样管(如图 4 所示),并进行了热测实验.

电子束的工作电压和电流由固态电源调制器提供,调制器的额定工作电压为 120kV,脉冲电流为 45A,脉冲宽度为 0~40 $\mu$ s,重复频率为 50~200Hz. 调制器电流一部分通过电阻分压器接到电子枪的第一阳极上.

输入源为行波管放大器,工作频率为 33~36GHz. 行波管的输出通过定向耦合器和隔离器接到回旋速调放大器的输入波导上.

电子枪区的磁场(副磁场)由两组辅助线包产生. 相互作用区的磁场(主磁场)由 11 饼线包产生,采用双层饼形普通线包,通过水冷的方式冷却. 线包外围加一铁磁屏蔽壳,以减少管子周围的杂散磁场.

磁场电源系统为十组高精度恒流电源模块. 电流稳定度为万分之五.

首先对整管进行了老练测试. 主要是测量无高频信号输入时的电子注特性,调整聚焦磁场,使管子有良好的导通率,没有高频振荡输出.

然后开启激励信号,进行热测. 经过反复测试,得到了最大脉冲输出功率 180kW,效率 13%. 图 5 给出了在电子束电压为 58kV,电流为 25A 的情况下,输出功率随频率的变化曲线. 由图中可以看出,3dB 带宽为 110MHz.

## 3 结语

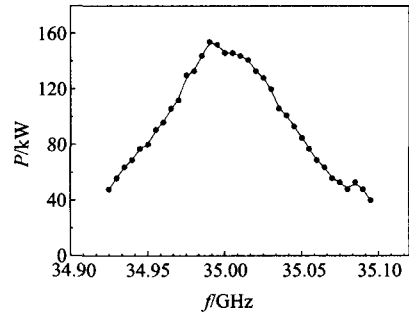


图5 输出功率随输入频率的变化  
Fig. 5 Measured output power as a function of drive frequency

在高频系统、磁控注入电子枪、电子注-波相互作用模拟分析的基础上,研制出了 8mm 二次谐波回旋速调放大器,并进行了热测实验,得到了如下结果:在中心频率为 35GHz 的情况下,最大脉冲输出功率为 180kW,效率为 13%;在电子束电压为 58kV,电子束电流为 25A 的情况下,得到了 150kW 的输出功率,3dB 带宽 110MHz. 进一步的研究和实验继续正在进行. 该实验样管的研制成功填补了国内毫米波器件在谐波回旋速调管放大器方面的空白,大大提高了独立自主研制高功率毫米波源的能力.

## REFERENCES

- [1] Felch K L, Danly B G, Jory H R, *et al.* Characteristics and applications of fast-wave gyrodevices [J]. *Proc. IEEE*, 1999, **87**(5): 752—781.
- [2] Zasyplin E V, Moiseev M A, Gachev I G, *et al.* Study of high-harmonic Ka-band second-harmonic gyrokystron amplifier [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1996, **24**(3): 666—670.
- [3] Choi J J, McCurdy A H, Wood F N, *et al.* Experimental investigation of a high power, two-cavity, 35GHz gyrokystron amplifier [J]. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 1998, **26**(3): 416—425.
- [4] NIU Xin-Jian, GU Ling, YU Sheng, *et al.* Corrugated waveguide mode conversion for 94 GHz second-harmonic gyrotron [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (牛新建, 顾玲, 喻胜, 等. 94GHz 二次谐波回旋管波导模式转换. *红外与毫米波学报*), 2007, **26**(2): 39—42.
- [5] YIN Rui-Jian, LIU Pu-Kun. Primary design of a ka-band three stage distributed loss second-harmonic gyrotron traveling wave amplifier [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (殷瑞剑, 刘濮鲲. Ka 波段三段损耗波导结构二次谐波回旋行波放大器的模拟与设计. *红外与毫米波学报*), 2008, **27**(1): 16—20.
- [6] Liu P K, Zhang S C, Su Y N, *et al.* Development of a Ka-band second harmonic gyrokystron amplifier [C]. *IRMMW THz2005*, USA: Williamsburg, 2005: 659—660.
- [7] Geng Zhi-Hui, Liu Pu-Kun. Design of a Ka-band, second harmonic gyrokystron amplifier by using a self-consistent nonlinear simulation [J]. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2006, **34**(3): 534—540.