

94GHz 连续波 40kW 回旋振荡管高频系统的设计

刘濮鲲^① 曹晓琴^②

^①(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

^②(淮海工学院数理科学系 连云港 222005)

摘要: W 波段的高功率连续波回旋管振荡器在毫米波非致命武器等领域有着重要的应用。该文首先通过起振电流的计算,确定了工作模式,继而利用自行开发的自洽非线性计算程序 GYROSC 对工作在 94GHz 频率的连续波回旋振荡管高频系统进行了模拟计算和优化设计。结果表明,设计的 W 波段连续波回旋管可获得输出功率 40kW,电子效率大于 30%。

关键词: 回旋振荡管; W 波段; 连续波; 高频系统; 非线性计算

中图分类号: TN128

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)06-1504-03

Design of a 94GHz CW 40kW Gyrotron Oscillator Circuit

Liu Pu-kun^① Cao Xiao-qin^②

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China)

^②(Department of Mathematics and Science, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract: The W-band high-power CW gyrotron oscillator has an important application in the field such as millimeter-wave non-lethal weapon etc. In this paper, the operating mode of the gyrotron is chosen by the calculation of starting current, and the 94GHz CW gyrotron oscillator circuit is optimally designed using a self-consistent nonlinear calculating code GYROSC developed by authors. The result shows that the designed W-band CW gyrotron oscillator can obtain output power 40kW, and electron efficiency more than 30%.

Key words: Gyrotron oscillator; W-band; CW; High frequency circuit; Nonlinear calculation

1 引言

回旋管是最主要的高功率毫米波源,近年来国际上的发展非常迅速。长期以来,受控热核聚变的等离子体加热一直是回旋管发展的主要动力之一。目前,等离子体加热应用的回旋振荡管已可在 170GHz 频率产生兆瓦级准连续波功率输出。另一方面,毫米波武器、电子对抗、工业加热、高密度通信以及在 35GHz 和 94GHz 大气窗口的高分辨率雷达等领域也是回旋管重要的应用方向。其中,工作频率 24-94GHz,连续波输出功率几十至百千瓦级的回旋振荡管在先进陶瓷烧结和毫米波拒止武器方面具有非常重要的应用前景。

俄罗斯科学院应用物理所(IAP)研制了一系列频率范围在 24-84GHz,输出功率从 3kW 到 35kW 的连续波回旋管及其工业应用系统^[1]。美国空军研究实验室(AFRL)利用 94GHz 的回旋振荡管作为功率源,研制成功一种被称作“主动拒止技术”(Active Denial Technology, ADT)的毫米波非致命武器系统^[2]。它利用定向发射的毫米波波束照射人群,使人感觉就像被烧伤般疼痛,从而丧失进一步行动的能力。

目前,美国雷声公司正在研制部署在固定位置的 30kW 和 100kW 的 ADT 系统^[3]。这种新型的非致命武器系统既可用于对付危险或暴乱的人群,也可装备在港口和舰船上用于抵御小型快速飞机的袭击。

然而,目前有关 94GHz 连续波回旋管的模拟与设计方面的文献比较少^[4,5],国内也尚未开展这方面的研究工作。本文利用自洽非线性理论对 W 波段的高功率连续波回旋管振荡器进行了初步的研究。通过对回旋管的工作模式选择、起振电流计算和电子注-波相互作用模拟,给出了 94GHz 连续波 40kW 回旋振荡管的优化设计方案。

2 起振电流和模式选择

回旋管设计的基本任务是:选定工作模式,给出电子注半径、电压、电流和纵横速度比,然后确定腔体尺寸及外加静磁场等参量;通过对以上参量的综合优化,使管子效率最大化,输出功率满足设计要求。

工作频率 94GHz 对应自由空间波长 $\lambda = 3.19 \text{ mm}$ 。在一般情况下,电子回旋脉塞不稳定性机理使得 TE 模比 TM 模有效得多,所以一般采用 TE 模式,此时自由空间波长与腔壁半径 R_0 的关系为

$$R_0 = \chi_{mn}\lambda/(2\pi) \quad (1)$$

2006-12-19 收到, 2007-07-27 改回

国家自然科学基金(60571039)和国家杰出青年科学基金(60125104)资助课题

此处 χ_{nm} 是 m 阶 Bessel 函数的导数 $J'_m(x)$ 的第 n 个零点。基波工作的优化电子注半径为

$$R_b = x_{m\pm 1,i} \lambda / (2\pi), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

根据以上两个重要公式就可以算出一些重要的候选模式所对应的腔体半径与电子注半径。

本文选择标准的三段式结构谐振腔，包括输入渐变段、中间均匀段和输出渐变段，如图 1 所示。输入渐变段是一截止段，目的是防止高频功率反向传输进入电子枪中。在模式选择时要考虑到输入渐变段导致的谐振腔入口处半径的减小，也要从尽量减小整管体积的角度考虑，优先选择较低阶的模式。满足以上要求的主要候选模式包括 TE_{02} ， TE_{03} ， TE_{04} ， TE_{21} ， TE_{22} ， TE_{23} ， TE_{24} ， TE_{32} ， TE_{33} 模式等。通过对基波情况下的电子注-波耦合系数的计算，并考虑到模式的稳定性，本文选择 TE_{23} 模作为工作模式。按文献[6]中给出的公式计算 TE_{23} 模的起振电流，如图 2 所示。这里电子注半径对基波 TE_{23} 模优化， $U_0 = 30kV$ ， $\alpha = 1.5$ ， $R_e = 2.133mm$ 。从图中可以看出， TE_{23} 模与相邻模式之间的间隔较大，比较适合作为工作模式。

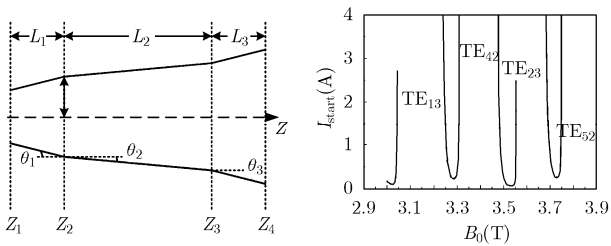


图1 回旋管振荡器高频腔结构示意图

图2 起振电流 I_{start} 随磁场 B_0 的变化曲线

3 电子注-波相互作用计算与谐振腔设计

基于自洽非线性理论，我们自行开发了回旋管的大信号计算程序 GYROSC，利用它对工作频率为 94GHz 的基波回旋振荡管进行了自洽非线性模拟，并在此基础上进行了腔体的优化设计。

我们选取输入和输出渐变段的长度 $L_1 = L_3 = 10mm$ ，其渐变角 $\theta_1 = 1.5^\circ$ ， $\theta_3 = 3.5^\circ$ 。对 TE_{23} 模，腔体半径为 5.062mm。表 1 给出了腔体谐振频率和品质因数随中间段长度 L_2 的变化关系。图 3 和图 4 则分别给出了不同中间段长度下的输出功率和效率随电子注电流的变化曲线。从图 3 和图 4 可以看出，当 $U_0 = 30kV$ ， $\alpha = 1.5$ ， $B_0 = 3.49T$ 时，中间段长度取 27.5mm 是比较合适的，它能获得较高的输出功率和效率。

图 5 给出了不同电子注电压下，当 $B_0 = 3.49T$ ， $\alpha = 1.5$ ， $L_2 = 27.5mm$ 时，电子注-波相互作用效率随电子注

电流的变化关系。在图 6 中给出了当 $U_0 = 30kV$ ， $L_2 = 27.5mm$ ， $\alpha = 1.5$ 时，输出功率和效率随电子注电流的变化关系。从图中可以看出，输出功率随着电子注电流几乎是线性变化，效率虽然也是随着电子注电流的增大而增加，但当电子注电流到了 3A 以后，效率的变化就很慢了。当电子注电流为 4.0~4.5A 时，分别能获得 32.5%~32.6% 的电子注-波相互作用效率和 39~44kW 的输出功率。

表 1 谐振频率和品质因数随中间段长度的变化

$L_2(mm)$	$F(GHz)$	Q_{diff}
20	94.157	1120.2
22.5	94.125	1293.2
25	94.101	1668.9
27.5	94.082	2112.9
30	94.067	2418.7

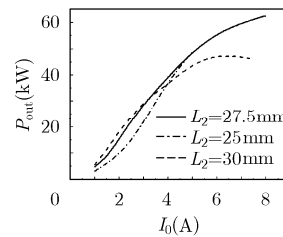


图3 不同中间段长度时，输出功率随电子注电流的变化曲线

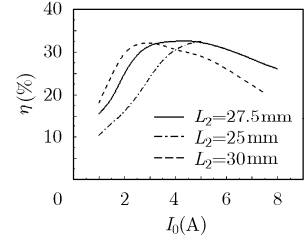


图4 不同中间段长度时，效率随电子注电流的变化曲线

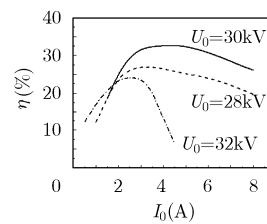


图5 不同电子注电压下，电子注-波相互作用效率随电子注电流的变化关系

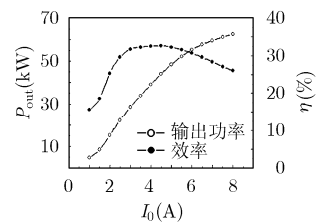


图6 输出功率和效率随电子注电流的变化关系

4 结束语

本文利用自行开发的自洽非线性计算程序 GYROSC 对工作在 94GHz 频率、输出功率 40kW 的连续波回旋振荡管进行了模拟和设计，结果如表 2 所示：

表2 94GHz 连续波回旋振荡管设计参数

工作频率	94GHz
工作模式	TE ₂₃
腔体半径	5.062mm
输入渐变段长度 / 倾角	10mm / 1.5°
中间相互作用段长度	27.5mm
输出渐变段长度 / 倾角	10mm / 3.5°
电子注半径	2.133mm
外磁场	3.49T
电子注电压 U_0	30kV
电子注电流 I	4.5A
电子横纵速度比	1.5
电子效率	30%
输出功率	40kW

其中 3.49T 的外磁场只能用超导磁体实现。考虑到稳定性和未来实际应用的需要,可考虑采用带制冷机的传导冷却的超导磁场系统。它可以避免传统超导磁体采用液氦浸泡冷却的问题,而且其采用的新型收缩热管技术和高压有限氦气冷源技术使高磁场磁体系统运行更为可靠和安全。

本文的工作为 3mm 高功率连续波回旋管的研制提供了有益的参考。

参考文献

- [1] Bykov Yu, Ereemeev A, and Glyavin M, *et al.*. 24-84-GHz gyrotron systems for technological microwave applications. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2004, 32(1): 67-71.
- [2] U.S. Pursues non-lethal high-power microwaves. *Jane's International Defence Review*, 2002, 35(4): 6.
- [3] Michael S, *Jane's Defense Weekly*, 2004, (10): 8.
- [4] Saraph G P, and Antonsen T M, *et al.*. A study of parametric instability in a harmonic gyrotron: Designs of third harmonic gyrotron at 94GHz and 210GHz. *Phys. Plasmas*, 1995, 2(7): 2839-2846.
- [5] Mcdermott D B, Statzman R C, and Balkcum A J, *et al.*. 94-GHz 25-kW CW low voltage harmonic gyrotron. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 1998, 26(3): 402-408.
- [6] 刘濮鲲, Borie E, and Thumm M. ISM 频率中等功率回旋管的选模问题. *红外与毫米波学报*, 2002, 21(4): 289-292.

刘濮鲲: 男, 1965 年生, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向为微波、毫米波器件与技术。

曹晓琴: 女, 1975 年生, 博士, 副教授, 从事教学与科研工作。