

140 GHz/50kW 回旋管的研制与测试

马国武, 胡林林, 卓婷婷, 孙迪敏, 黄麒力, 曾造金, 蒋艺
(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 回旋管在毫米波与太赫兹频段能够输出高峰值功率和高平均功率, 具有重要的应用需求。本文基于回旋管束波相互作用理论设计了一只 140 GHz 回旋管以用于磁约束聚变中电子回旋加热相关元件的测试和老炼, 目标是实现最大输出功率不小于 50 kW, 具备脉冲工作及连续运行能力, 且具有一定的频率和功率调节范围以适应测试的需求。根据设计结果开展了该回旋管的研制与测试, 在阴极电压 -37.2 kV, 控制极电压 -12.19 kV, 阳极电压 +11 kV, 束流 3.4 A, 工作磁场约 5.3 T 下获得最大脉冲输出功率 56 kW, 功率可通过工作电流和磁场进行调节, 同样的调节手段还可以使频率获得约 80 MHz 的调节范围。重点对起振电流、功率曲线和频率曲线等进行了理论计算结果和实验结果的对比, 二者获得了良好的一致。由于初步实验中观察到了大于 50 kW 连续波功率输出时窗片的过温现象, 因此降低功率在 20.3 kW 开展了连续运行实验, 结果表明在该功率下回旋管连续运行状态稳定, 可以用于后续聚变元件测试和老炼工作的开展。

关键词: 回旋管; 束波相互作用; 准光模式转换

中图分类号: O46 **文献标识码:** A

Development and test of 140 GHz / 50 kW Gyrotron

MA Guo-Wu, HU Lin-Lin, ZHUO Ting-Ting, SUN Di-Min, HUANG Qi-Li, ZENG Zao-Jin, JIANG Yi
(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: Gyrotron can achieve high peak power and high average power output in millimeter wave and terahertz band, which has important application requirements. Based on the beam wave interaction theory of gyrotron, a 140GHz gyrotron is designed for test and aging process of the relevant elements of electron gyrotron heating in magnetic confinement fusion. The goal is to achieve a maximum output power of not less than 50KW which can operate in pulse and continuous mode, and a certain range of frequency and power adjustment to meet the needs of the test. According to the design results, the gyrotron is developed and tested. A maximum output power of 56 kW is achieved corresponding to the cathode voltage of -37.2 kV, the modulation anode voltage of -12.19 kV, the second anode voltage of +11 kV, the beam current of 3.4 A and the magnetic field of 5.3 T. The power can be adjusted by changing beam current and magnetic field. In the same way, the frequency can be adjusted within 80 MHz. The theoretical calculation results of starting current, power and frequency are compared with the experimental results, which are in good agreement. In the preliminary experiment, overheating of the window was observed with an output power of 52 kW for 30s' operation, so the continuous operation experiment was carried out with the power reduced to 20.3 kW, under this power level, the continuous operation state of the gyrotron is stable, which can be used for the subsequent work for test and aging of fusion elements.

Key words: gyrotron, beam-wave interaction, quasi-optical mode converting

PACS: 84.40. Ik, 84.40. Fe, 07.57. Hm, 42.70. Qs

引言

回旋管是毫米波与太赫兹频段最重要的辐射

源之一, 近年来回旋管取得了多项里程碑式的进展, 典型的如回旋管在 140 GHz 和 170 GHz 所实现

收稿日期: 2020-05-17, 修回日期: 2020-12-29

Received date: 2020-05-17, Revised date: 2020-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(U1830201)、中物院创新发展基金项目(CX2019038)、中物院创新发展基金培育项目(PY2019130)

Foundation items: Supported by National Natural Science Foundation of China(U1830201), the Innovation and Development Fund of China Academy of Engineering Physics(CX2019038) and the Innovation and Development Fund Cultivation Project(PY2019130)

作者简介(Biography): 马国武(1981-), 男, 四川越西人, 副研究员, 博士, 主要研究领域为毫米波与太赫兹真空电子学

E-mail: maguowu@caep.cn

的单管 1MW 连续波输出^[1-3],以及 1 THz 附近所实现的千瓦级脉冲功率输出^[4-5]。这些重要突破展现出了其在高频段输出高峰值功率和高平均功率的独特优势,正由于此,回旋管在毫米波和太赫兹波段成为频谱资源开发的重要手段,目前已被成功应用于许多方面,如等离子体加热^[6-7]、材料处理^[8-9]、增强核磁共振^[10-11]、毫米波主动拒止^[12-13]等。特别是回旋管在磁约束聚变研究中得到广泛而重要的应用,如用于电子回旋共振加热、电流驱动以及诊断测试等。本文设计并研制了一只 140 GHz 回旋管用于磁约束聚变中电子回旋加热相关元件的测试和老练,设计输出功率为不小于 50 kW,并要求一定的频率和功率调节能力以适应测试的需求。该管的初步实验结果在文献^[14]中进行了报道,本文将进一步详细阐述该回旋管的设计与实验结果,重点对理论计算结果和实验测试数据进行对比,为该回旋管的后续应用和进一步开发奠定基础。

1 回旋管各部分设计

1.1 腔体设计

回旋管的束波相互作用通常在开放腔中完成,本文选择三段式光滑圆柱结构作为相互作用腔体,其中包含了截止区,相互作用区和渐变输出区。腔体结构及计算得到的腔内场分布如图 1 所示,其中工作模选择为 TE_{73} 模,相互作用半径 r_{w0} 为 5.64 mm,腔体均匀段长度为 15 mm,冷腔谐振频率为 140.1 GHz,腔体 Q 值为 1 270.7。为了使微波与电子束在输出波导中快速失谐以避免腔后相互作用,输出半径增大到了 9.6 mm,此时腔体工作模式的微波在向外传输时会面临向更高径向阶数模式转换的危险。为了保持模式纯度,输出段采用了车比雪夫渐变结构(Chebyshev taper),在该渐变曲线下, TE_{73} 模向更高径向阶数模式的转换被抑制在 30 dB 以下。对不同均匀段长度下的谐振频率和 Q 值进行了计算,计算结果如图 2,由图可见 Q 值对均匀段长度比较敏感,随着腔长的增长 Q 值迅速增大,谐振频率随腔长增长有所减小,但是减小比较缓慢,保持在波导的近截止点附近。

计算 TE_{73} 及其邻近模式的耦合系数如图 3,其中脚标上的“-”号表示微波与电子旋进方向相同,“+”号则表示二者相反,可知 TE_{73-} 的最大耦合半径为 2.56 mm,而邻近模式中 TE_{44+} 、 TE_{54+} 和 TE_{25+} 等模式的最大耦合半径与工作模 TE_{73-} 相近。设定电子束注入半径与 TE_{73-} 最大耦合半径相一致,计算各模式

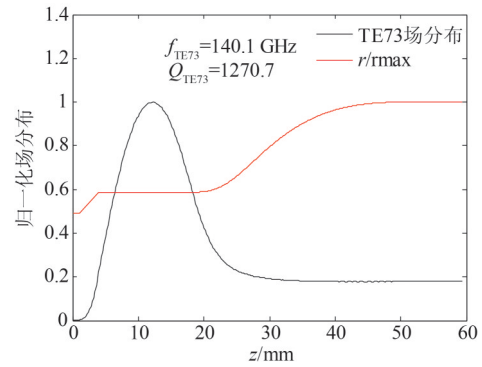


图 1 腔体结构及其内部的场分布

Fig. 1 Cavity structure and its internal field distribution

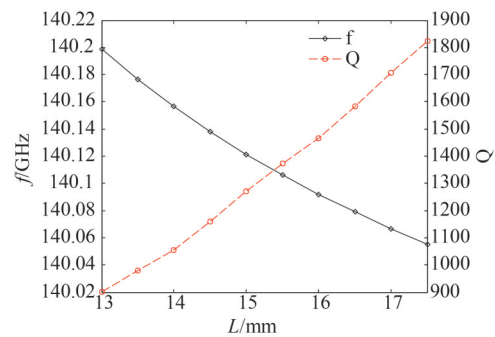


图 2 不同均匀段长度下的谐振频率和 Q 值

Fig. 2 Resonant frequency and Q factor versus length of uniform section

的起振电流如图 4,可见 TE_{73-} 的最小起振电流约为 0.54 A, TE_{25+} 的最小起振电流为 1.236 A, TE_{44+} 和 TE_{54+} 分别为 0.877 A 和 0.58 A,这些模式在工作电流 3.4 A 下均存在起振的可能,需通过多模计算进行详细分析,排除竞争。

下面进行多模时域计算,使用的电子束电压为 48.2 kV,速度比为 1.3,对电子束电流和工作磁场进行了扫描。输出功率的变化情况如图 5(a)所示,

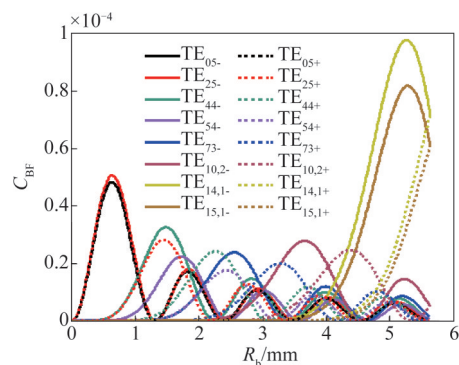


图 3 工作模及其邻近各模式的耦合系数

Fig. 3 Coupling coefficient of working mode and its neighboring modes

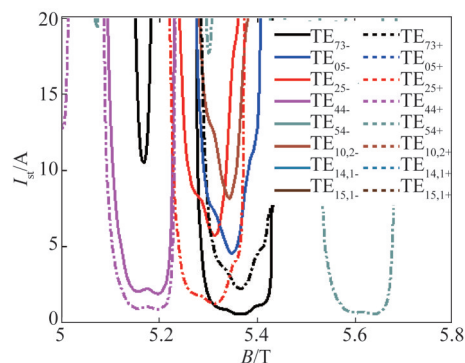


图4 工作模及其邻近各模式的起振电流

Fig. 4 Starting current of working mode and its neighboring modes

在低磁场端微波功率迅速降低至0,原因在于起振电流随磁场下降快速上涨并超过工作电流,使得工作模无法起振。而在高磁场端,输出功率随磁场增加缓慢下降,原因在于微波与电子束之间的失谐量逐渐减小,使得电子束中可以被微波提取的能量减少。在正常起振的区间内,输出功率随电流增大而增大,当电子束电流为3.4 A时输出功率在磁场为5.3 T下获得最大值62.2 kW。观察输出频率的变化情况如图5(b),可见微波频率具有百 MHz量级的调谐范围,随着磁场和电流的增大,微波的频率获得微弱的增长,其增长范围较小主要是因为频率偏离较大时腔体处于失谐状态,腔内储能不足使得对应频率的微波起振困难。

观察磁场为5.3 T时的多模输出功率时域变化情况如图6,其中电压从20 kV线性增长至45 kV,上升沿时间为300 ns(实验的上升沿在百微秒量级,但由于微波起振时间尺度通常在数十纳秒量级,因此300 ns的上升沿已经能够充分反映相互作用情况)。从图可见在 TE_{73-} 起振阶段,附近的模式均未能对其形成影响。在工作模幅度增长到一定大小后, TE_{54+} 和 TE_{15-} 具有极小幅度的扰动,功率约在瓦量级以下,对工作模没有影响。

1.2 电子枪设计

电子枪拟使用双阳极磁控注入电子枪,所使用的磁场位形如下图7。鉴于阴极研制周期较长,阴极拟使用实验室原有95 GHz/30 kW连续波回旋管的阴极,该阴极发射带倾角为 25° ,发射带具有后侧大倾角结构及前端鼻锥结构用以优化电子束品质。阴极发射带的平均半径为14.5 mm,根据电子束注入半径2.56 mm选取压缩比为32倍,此时阴极表面磁场为1656高斯。

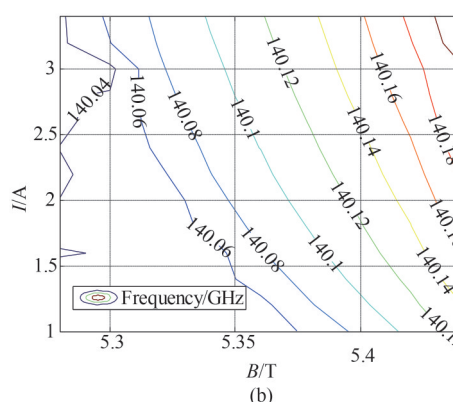
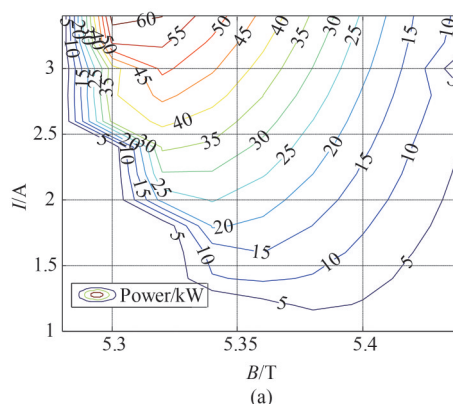


图5 多模时域计算结果(a)输出功率与磁场、电子束电流的关系,(b)输出频率与磁场、电子束电流的关系

Fig. 5 Results of multimode time domain calculation (a) Output power versus magnetic field and beam current, (b) Output frequency versus magnetic field and beam current

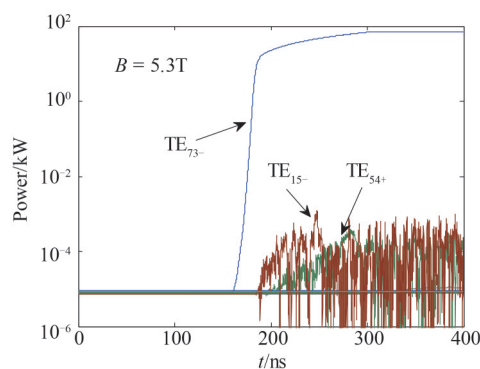


图6 5.3 T下各模式的输出功率随时间的变化

Fig. 6 Output power of each mode versus time at $B=5.3$ T

根据电子枪理论公式对各电极参数进行选择后,使用粒子模拟软件进行进一步的优化设计,优化后的仿真结构、电子束的运动轨迹如图8所示,发射电流波形如图9所示,束流大小为3.5 A,发射带宽度为1 mm,对应的发射电流密度为 3.8 A/cm^2 ,小于 4 A/cm^2 的设计阈值。

在不同的阴控压差下观察电子束的速度比、纵

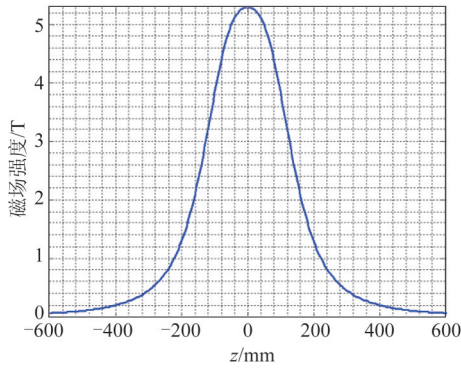


图7 超导磁体的磁场位形

Fig. 7 Magnetic field distribution of the superconducting magnet

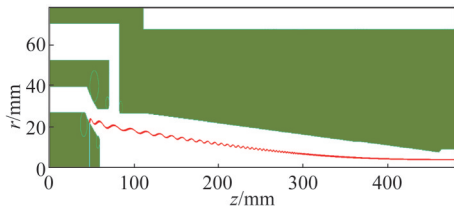


图8 电子枪内的电子运动轨迹

Fig. 8 Trajectory of electron beam in the gun

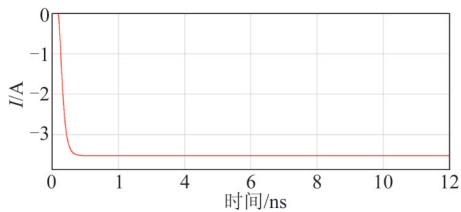


图9 发射电流随时间变化

Fig. 9 Emitted beam current versus time

向速度零散和横向速度零散,结果如图10所示。从图中可以看到在阴控压差较小的时候速度零散随着阴控压差并非单调增长的关系,在压差为19 kV左右时存在极值点。这主要是由于阴控压差较小时空间电荷力对回旋电子束成形造成了一定的破坏,当阴控压差继续增大时,电子枪区远离空间电荷限制流区域,速度比进一步增长,而纵向速度零散反而有所减小,并在阴控压差约22 kV附近获得极小值。此后,随着阴控压差的进一步增大,纵向速度零散迅速增大。

而横向速度零散 $\delta v_r/v_r$ 与纵向速度零散 $\delta v_z/v_z$ 之间满足以下关系^[15]:

$$\delta v_r/v_r = \frac{1}{\alpha^2} \delta v_z/v_z, \quad (1)$$

可见横向速度零散总体趋势与纵向速度零散一致,但是由于其同时与速度比的平方呈反比关系,极小

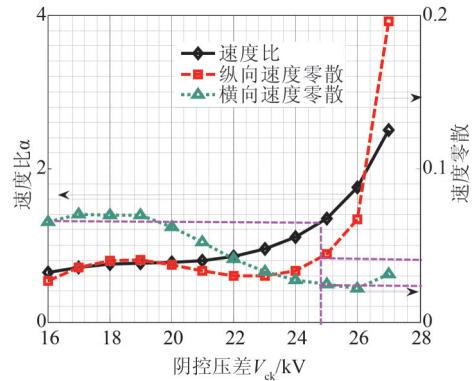


图10 电子枪速度比和速度零散与阴控压差之间的关系

Fig. 10 Velocity ratio and longitude velocity spread versus voltage between A-K gap

值出现在约阴控压差26 kV处,对应的速度比可达1.8,纵向速度零散则达到了6.7%。由于纵向速度直接影响束波同步关系,在电子枪设计中要求纵向速度零散小于5%,由此确定最终工作参数为阴控压差24.8 kV,此时速度比达到1.3,对应的纵向速度零散为4.1%,而横向速度零散仅为2.4%。下面把仿真设计的电子枪的结果汇总如下表,从表1中可以看到,该电子枪能够满足高频腔体束波互作用的要求。

表1 电子枪仿真设计结果

Table 1 Simulation design results of electron gun

束压U0	48.2 kV	工作磁场B0	5.3 T
束流I0	3.4 A	间隙因子df	13.15
纵向速度零散	4.1%	阴极表面场强Ec	3.54 kV/mm
横纵速度比 α	1.3	管压降比例	1.35%
电子束注入半径R0	~2.56 mm	发射带半径Rc	14.5 mm
发射电流密度Jc	3.8 A/cm ²	磁压缩比fm	32

1.3 准光模式转换系统设计

该回旋管使用了准光模式变换系统以将回旋管工作模式 TE_{73} 转变为横向输出的准高斯波束,转换系统包含了预聚束辐射器、抛物面反射镜和两级相位修正镜。端口注入右旋进的 TE_{73} 模,端口模式电场分布如图11,预聚束辐射器将 TE_{73} 通过微扰转换为混合模,这种混合模在传输截面上形成聚束,从而避免了切口辐射的时候在切口边缘上的衍射损失,提升了转换效率。抛物面反射镜将预聚束辐射器辐射的波束调整为适当束腰的准高斯波束,再通过两级相位修正镜对准高斯波束的相位进行调整,提升高斯含量并投射到输出窗输出。

波束在准光模式转换系统中传输的瞬时电场

幅度分布如图 12, 最终在输出窗上形成的束斑如图 13, 输出束斑获得了较好的幅度分布, 束腰半径约为 12 mm。准光模式变换系统的能量转换效率为 91.4%, 效率相对较低, 主要是第一级相位修正镜受到空间限制, 两侧有较多的能量泄露。

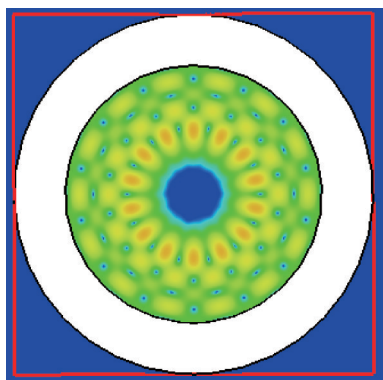


图 11 预聚束辐射器输入端口的 TE73 模电场分布

Fig. 11 Electrical field distribution of TE73 mode at the input port of prebunching launcher

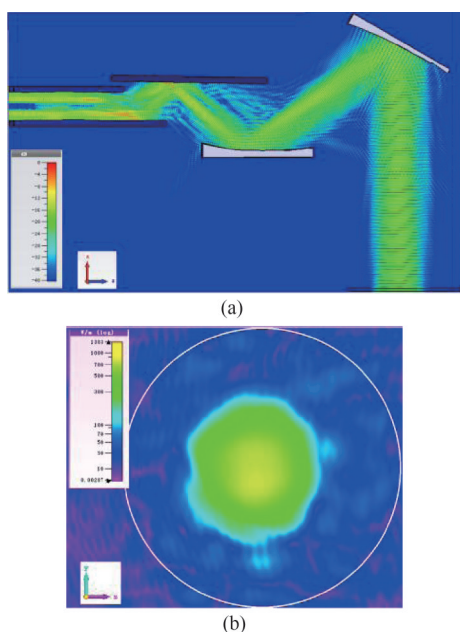


图 12 波束传输仿真结果 (a)管内电场幅度分布侧视图, (b)窗平面电场幅度分布

Fig. 12 Simulation results of beam propagation (a) left view of electric field amplitude distribution in the tube, (b) electric field amplitude distribution in output window plane

1.4 输出窗设计

输出窗使用氮化硼(BN)材料, 其材料参数分别为: 介电常数为 4.7, 损耗角正切为 1.15×10^{-3} , 热导率为 $55 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, 热膨胀系数为 $3 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。对于高斯波束在边缘液冷单窗中传播的情况, 窗片厚度和频

率的关系式是:

$$d = \frac{n\pi}{\sqrt{(2\pi f/c)^2 \epsilon_r}} \quad (2)$$

本文中选取 n 为 5, 则窗片厚度为 2.47 mm, 准高斯波束在输出窗中的传输和反射状况如图 13, 在 140 GHz 下获得最大传输系数为 -0.1 dB, 损失的功率主要是窗体吸收的功率, 在 50 kW 输出功率下窗片吸收功率达到 1.17 kW, 在边缘液冷结构下忽略窗片两侧的对流换热可以计算得到窗片最大温升可达约 1 060 °C, 在分钟级时间尺度下温升接近最大值。此时尽管窗片能够承受相应的热应力, 但是由于温度远超窗片排气温度, 将会在管内形成大量放气, 对长时间稳定工作形成影响, 因此 50 kW 全功率下只能进行短时间工作。

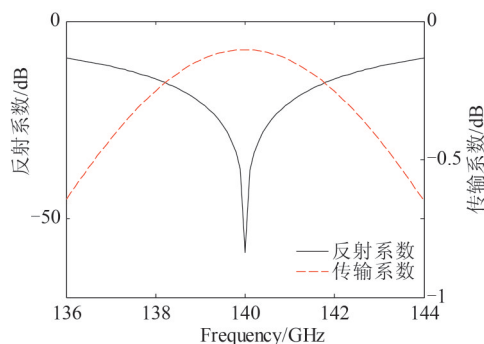


图 13 输出窗的反射系数和传输系数

Fig. 13 Reflection coefficient and transmission coefficient of output window

2 样管研制与实验测试

140 GHz/50 kW 回旋管实验系统包括电源系统、超导磁体及测试系统等部分, 整体框图如图 14 左图所示。其中电源系统总容量为 50 kV/4.5 A, 超导磁体最高可达 6.48 T, 测试系统包含功率测试和频率测试等部分, 功率测试使用了水负载, 频率测试使用谐波混频方法。研制的实验样管照片如图 14 右图, 其中相互作用结构、准光模式转换系统、收集极等均使用无氧铜材料以降低射频损耗及提升散热能力, 管壳等其他位置使用了不锈钢以确保足够的力学性能。整管设计了内置钛泵和外置钛泵, 外置钛泵用于日常真空维持, 内置钛泵用于热测实验中产生气体的抽离。收集极、窗、准光模式转换系统、高频腔和控制极等均使用了水冷却以控制实验中的整管温度。收集极设计为单极降压结构, 降压陶瓷位于超导磁体下端, 在电位分布上使第二阳极

和高温腔体处于正高压上,超导室温孔内的管壳外壁、输出窗和收集极均处于地电位以利于回旋管的安全使用。

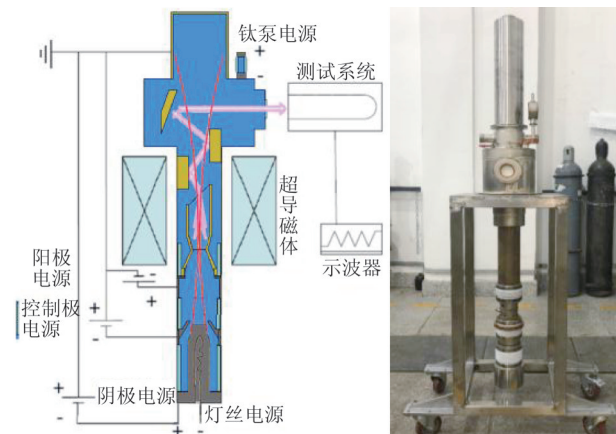


图14 实验系统整体框图(左)及回旋管照片(右)

Fig. 14 Overall diagram of experimental system (left) and picture of gyrotron (right)

2.1 脉冲测试

调节工作参数使管内微波起振,在脉宽20 ms下正对输出窗约25 cm处使用热敏纸得到束斑如图15,束斑中心由于过热烧焦发白,整体分布为一实心波束,束斑中心幅度最大,沿半径方向向外幅度逐渐降低,获得了基本符合预期的准光模式转换效果。



图15 热敏纸获得的输出微波束斑

Fig. 15 Output microwave beam spot obtained by thermal paper

在不同磁场下对起振电流进行测试,测试结果如图16,并与理论曲线进行了对比。图中实验曲线只有左半支,这主要是由于在起振电流曲线的右半支束波相互作用效率已经较低,工作模频率与腔内杂模的频率混在一起,不易分辨具体的振荡情况,因此右半支没有继续对腔体起振电流进行测试。从

获得的曲线与理论曲线对比来看,实验结果相对于理论计算结果其最低起振电流更小。造成这种偏差最直接的原因是加工误差以及后端反射带来的腔体Q值变化。

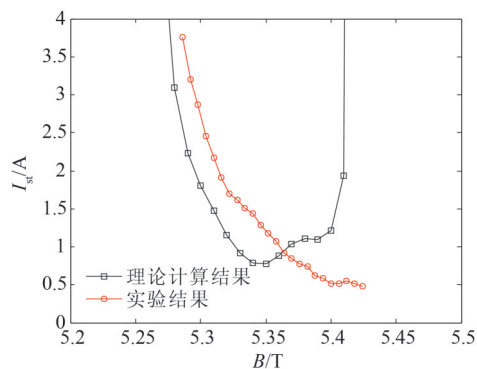


图16 实验测试的起振电流曲线与理论计算结果的对比

Fig. 16 Comparison of starting current curves between experimental test and theoretical calculation

使用示波器对实验系统各个信号监测的结果如图17所示。图中,黄色线为使用比例为2000:1的高压探头探测的阴极高压脉冲波形,绿色线为霍尔探头监测的发射束流波形,蓝色线为在输出窗附近使用检波器检测得到的检波波形,红色线为微波经过频率测试系统后得到的中频信号波形。图17右下角为中频信号的频谱分析波形,从中计算获得微波频谱为139.764 GHz。

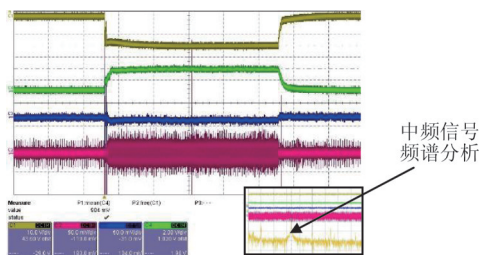


图17 示波器监测的信号波形,其中,黄线为阴极高压,探测比例2000:1;绿线为发射电流,探测比例1:1,蓝色线为检波器检波信号,红色线为谐波混频器的中频信号

Fig. 17 Signal waveform monitored by oscilloscope, in which the yellow line is voltage on cathode with detection ratio of 2000:1, the green line is emission current with detection ratio of 1:1, the blue line is microwave signal on the detector, the red line is IF signal of harmonic mixer

观察不同磁场下的频谱变化,对应的工作参数为:阴极电压-37.2 kV、控制阳极电压-11.8 kV、第二阳极电压+11 kV,发射束流约为1.9 A。测试结

果如图 18(a)所示,实验频谱相比理论计算结果略低,约为 300 MHz,导致这种偏差的原因之一为腔体的加工误差。对于 140 GHz 的 TE73 模腔体,谐振频率与直径尺寸之间的变化关系大致为 12.5 MHz/ μm ,而加工图纸对腔体直径精度要求为 $\pm 0.012\text{ mm}$,由此可带来 150 MHz 以内的频率偏差。除了尺寸大小的变化之外,腔体的平直段在实际加工时可能会存在起伏变化,这些变化对频率和 Q 值影响很大。此外腔体后端不同位置的反射(包括辐射器、反射镜和输出窗等)也会带来腔体频率的进一步变化。当磁场变化时,输出微波频率发生近似线性变化,在 700 高斯的磁场变化范围内频率变化了约 80 MHz,在变化趋势上,理论计算结果和实验结果取得了良好的一致。

进一步观察输出频率随电子束流的变化关系,磁场设定为 5.34 T,结果如图 18(b)所示。除了绝对大小相差约 300 MHz 之外,在总体变化趋势上理论计算结果和实验结果是一致的,在约 1 A~2.65 A 的电子束流变化范围内,输出微波频率变化了约 60 MHz。图 18(b)中还同时给出了理论计算的电子效率随着电子束流的变化情况,在低电流时电子效率下降很快,在电流增大到 1.5 A 以上后,效率随电流增长而增长,效率的增长意味着腔体内电子失去的能量增多,相对论因子下降,电子回旋频率增加,这也是微波频率随着电子束流发生变化的原因。

采用脉冲重频工作方式对回旋管的输出功率曲线进行了测试,工作参数为:阴极电压-37.2 kV,控制阳极电压-12.19 kV,第二阳极电压+11 kV,束流 3.4 A,工作占空比为 5%,重频 1 Hz,单脉冲宽度为 50 ms。测试结果如图 19 所示,获得了 56 kW 的最高输出功率,此时回旋管整管效率(包含单级降压)达到 44.3%,不含降压收集的效率则达到 34%,对应工作磁场为 5.29 T。图 19 中一并给出了多个速度比下的理论计算结果(除了束波互作用外还考虑了准光效率 91.4% 和输出窗效率 97.7%),可以看到输出功率大小介于速度比 1.3 和 1.4 的理论计算结果之间并更接近于速度比 1.4 的结果。尽管实验未对速度比进行测量,但是根据电子枪的设计结果,在该工作参数下横纵速度比应介于 1.3 和 1.4 之间,由此可见实验结果与理论结果获得了较好的一致。

2.2 连续运行测试

初步实验中尝试在 50 kW 以上开展了连续运行

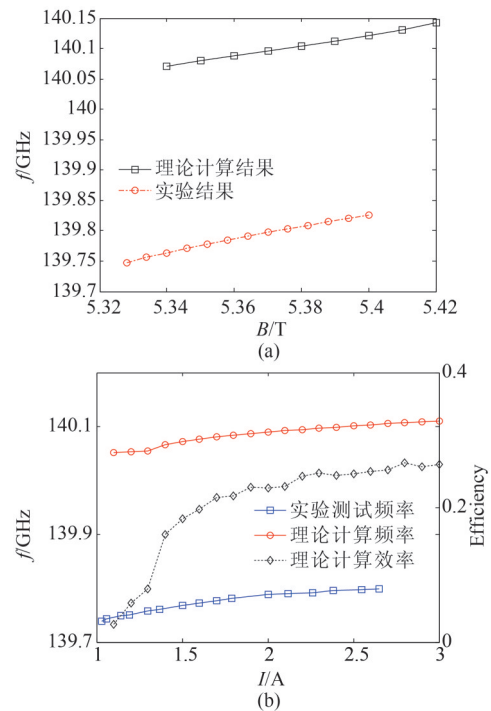


图 18 微波频率的变化情况(a)频率与磁场的关系,(b)频率与束流的关系

Fig. 18 Variation of microwave frequency (a) frequency versus magnetic field, (b) frequency versus beam current

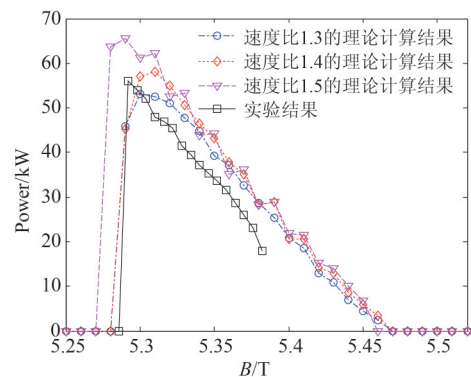


图 19 输出功率与磁场的关系

Fig. 19 Output power versus magnetic field

实验,但是由于输出窗温度迅速升高,管内放气较大。为了保障回旋管稳定性和工作寿命,连续运行时将输出功率进行了降低,并对其工作稳定性、控制阳极截获回流、第二阳极截获回流以及钛泵电流等进行了测试,为后续应用奠定基础。选取的连续运行状态测试参数为:阴极高压-37.2 kV,控制阳极电压为-12.7 kV,第二阳极电压+11 kV,电子束电流平均值(运行过程中束流因为 Nottingham 效应逐渐下降^[16])为 1.93 A,工作磁场为 5.34 T。一分钟连续运行的实验波形如图 20 所示,阴极高压、发射

References

- [1] Thumm M, Alberti S, Arnold A, *et al.* EU megawatt-class 140-GHz CW gyrotron[J]. *IEEE transactions on plasma science*, 2007, **35**(2): 143-153.
- [2] Sakamoto K, Kasugai A, Kajiwara K, *et al.* Progress of high power 170 GHz gyrotron in JAEA[J]. *Nuclear Fusion*, 2009, **49**(9): 181-186.
- [3] Litvak A G, Denisov G G, Myasnikov V E, *et al.* Development in Russia of Megawatt Power Gyrotrons for Fusion [J]. *Journal of Infrared Millimeter & Terahertz Waves*, 2011, **32**(3): 337-342.
- [4] Glyavin M Y, Luchinin A G, Golubiatnikov G Y. Generation of 1.5-kW, 1-THz Coherent Radiation from a Gyrotron with a Pulsed Magnetic Field[J]. *Physical Review Letters*, 2008, **100**(1): 015101.1-015101.3.
- [5] Idehara T, Ogawa I, Saito T, *et al.* Development of THz gyrotrons and application to high power THz technologies[J]. *Terahertz Science and Technology*, 2008, **1**(2): 100-106.
- [6] Thumm M. State-of-the-Art of High-Power Gyro-Devices and Free Electron Masers[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2020: 1-140.
- [7] Nusinovich G S, Thumm M K A, Petelin M I. The gyrotron at 50: Historical overview[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2014, **35**(4): 325-381.
- [8] Idehara T, Saito T, Ogawa I, *et al.* Development of Terahertz FU CW Gyrotron Series for DNP[J]. *Applied Magnetic Resonance*, 2008, **34**(3-4): 265-275.
- [9] Vitzthum V, Caporini M A, Bodenhausen G. Solid-state nitrogen-14 nuclear magnetic resonance enhanced by dynamic nuclear polarization using a gyrotron[J]. *Journal of Magnetic Resonance*, 2010, **205**(1): 177-179.
- [10] Sudiana I N, Ito R, Inagaki S, *et al.* Densification of alumina ceramics sintered by using submillimeter wave gyrotron [J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013, **34**(10): 627-638.
- [11] Lewis Iii D, Imam M A, Fliflet A W, *et al.* Recent Advances in Microwave and Millimeter-Wave Processing of Materials [J]. *Materials Science Forum*, 2007, **539-543**: 3249-3254.
- [12] Shi Shao-Hui, Liu Pu-Kun, Du Chao-Hai, *et al.* A W band second harmonic gyrotron oscillator [J]. *Journal of infrared and millimeter waves* (史少辉, 刘濮鲲, 杜朝海, 等. W 波段二次谐波回旋振荡器. *红外与毫米波学报*), 2013, **32**(5): 408-413.
- [13] Ma G W, Huang Y H, Zhuo T T, *et al.* Experimental study of a 95GHz gyrotron [C]. In Proceedings of 2015 IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), Beijing, China, 2015: 1-2.
- [14] Hu L L, Ma G W, Sun D M, *et al.* Development of a 140 GHz 50kW Gyrotron in IAE [C]. In Proceedings of the 44th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, Paris, France, 2019, 1-2.
- [15] Guss W C, Grimm T L, Kreisler K E, *et al.* Velocity ratio measurements of a gyrotron electron beam [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, **69**(7): 3789-3795.
- [16] Paulini J, Klein T, Simon G. Thermo-field emission and the Nottingham effect [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, **26**(8): 1310-1315.