



·高功率微波技术·

105/140 GHz 双频兆瓦级回旋管的设计与实验进展*

胡林林, 孙迪敏, 黄麒力, 卓婷婷, 龚胜刚, 胡 鹏,
蒋 艺, 马国武, 陈洪斌, 马弘舫

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 介绍了 105/140 GHz 双频兆瓦级回旋管的设计和最新实验进展。该回旋管的谐振腔、准光模式变
换器、BN 输出窗采用了双频共用的设计, 电子枪采用了双频复用的双阳极磁控注入枪, 收集极采用单级降压。
在现有实验室电网功率容量有限的情况下, 进行脉冲调试, 得到的实验结果为: 在重频 1 Hz、ms 连续短脉冲条
件下, 在 105 GHz 点和 140 GHz 点脉冲功率分别达到 710 kW 和 1.057 MW, 脉宽 0.7 ms, 对应总效率分别为 34% 和 49%。
在 105 GHz 点通过脉宽延展和老炼, 进一步得到 300 kW/2 s 和 400 kW/1 s 的秒级脉宽实验结果, BN 窗片的温度在
两种状态下温度分别达到 606 °C 和 503 °C, 波束频率单一, 没有杂模。实验基本上验证了该器件的物理设计。

关键词: 回旋管; 双频; 电子回旋加热; 磁约束聚变

中图分类号: TN129

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.230114

Design and experimental progress of a 105/140 GHz dual-frequency MW-level gyrotron

Hu Linlin, Sun Dimin, Huang Qili, Zhuo Tingting, Gong Shenggang, Hu Peng,
Jiang Yi, Ma Guowu, Chen Hongbin, Ma Hongge

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

Abstract: The design and latest experimental progress of a 105/140 GHz dual-frequency megawatt-level
gyrotron for fusion applications are presented. The resonant cavity, quasi-optical mode converter and BN output
window of the gyrotron adopt the design of dual-frequency sharing, the electron gun adopts the triode magnetron
injection gun with dual-frequency multiplexing, and the collecting pole adopts the single-stage depressed collector.
The experimental results are as follows: under the ms short-pulse condition with repetitive rate of 1 Hz, pulse powers
of 710 kW at 105 GHz and 1.057 MW at 140 GHz have been achieved. The pulse width is 0.7 ms, and the total
efficiency is 34% at 105 GHz and 49% at 140 GHz, respectively. Through pulse width extension and aging, the
experimental results of 105 GHz/300 kW/2 s, 105 GHz/400 kW/1 s and 140 GHz/400 kW/1 s are obtained. The
temperature of BN window reaches 606 °C, 503 °C and 633 °C, respectively, in the three states. The frequencies during
long-pulse operations are stable, indicating that there are no parasitic modes. The experiment basically verifies the
physical design of the device.

Key words: gyrotron, dual frequency, electron cyclotron resonant heating, magnetic confinement fusion

兆瓦(MW)级回旋管目前公认是磁约束聚变装置中实现电子回旋加热(ECRH)、电流驱动(CD)以及电子
Bernstein 波加热的唯一微波源。迄今为止, 全世界仅有俄罗斯 GYCOM/IAP、美国 CPI、日本 CETD、欧洲 Thales/
EGYC 四家公司或联合机构研制出了频率 100 GHz 以上、输出功率近 MW 级、连续运行几百秒至千秒以上的回旋
管, 它们已应用于 ITER、W7-X、EAST 等多个在运行或在建的磁约束聚变装置。双频、多频以及阶跃调频 MW 级
回旋管能增强 ECH/CD 系统的灵活性和性能, 成为一些现有聚变装置的升级计划或在建磁约束聚变装置对

* 收稿日期: 2023-05-05; 修订日期: 2023-07-10

基金项目: 国家自然科学基金面上基金项目(12175217); 技术基础科研项目(JSJL2021212B003)

联系方式: 胡林林, hulinlin2016@163.com。

通信作者: 马国武, huter_ma@126.com;

黄麒力, huangqilicaep@163.com。

ECRH 系统的构建需求,也是回旋管研究的一个重要方向^[1-4]。例如,俄罗斯 GYCOM 研制的 105/140 GHz MW 双频回旋管,已应用于 ASDEX Upgrade、KSTAR 和 HL-2A 装置;日本 QST 为 DEMO 装置进行了 203/170/137/104 GHz 四频回旋管研制,为 JT-60SA 装置研制了 110/138/82 GHz 双频回旋管^[2]。中国工程物理研究院应用电子学研究所针对大功率回旋管进行了多年研究^[5-8],近年来,基于聚变应用和双频技术路线,开展了对 105/140 GHz MW 级双频回旋管的研究。目前,已完成了该 MW 级双频回旋管已的设计、制造,并进行了多轮的实验调试和改进^[5,9]。本文将介绍该 MW 级双频回旋管的设计和最近的实验结果。

1 105/140 GHz 双频回旋管的设计

105/140 GHz 双频回旋管的设计参数如表 1 所示,设计目标是在 105 GHz 和 140 GHz 两个频点均能产生 1 MW 输出功率。因此,器件的关键部件,如谐振腔、电子枪、准光模式变换器和输出窗采用了双频复用技术,设计和计算结果可见文献 [5]。105/140 GHz 双频回旋管的设计模型及组成如图 1 所示。

表 1 105/140 GHz MW 回旋管设计参数

Table 1 Design parameters of the 105/140 GHz MW gyrotron

No.	parameter	value
1	output power	1.0 MW
2	pulse width	continuous wave
3	total beam voltage	-81 kV
4	beam current	40 A
5	MIG	triode type
6	cavity mode	TE _{18,7} @105 GHz; TE _{24,9} @139.3 GHz
7	working magnetic field	4.1 T@105 GHz; 5.5 T@140 GHz
8	output mode	quasi-Gaussian beam
9	window	BN disk for short-pulse operation; CVD diamond for MW-level CW operation
10	collector	single-stage depressed collector (SDC)
11	efficiency	>30% (45% with SDC)

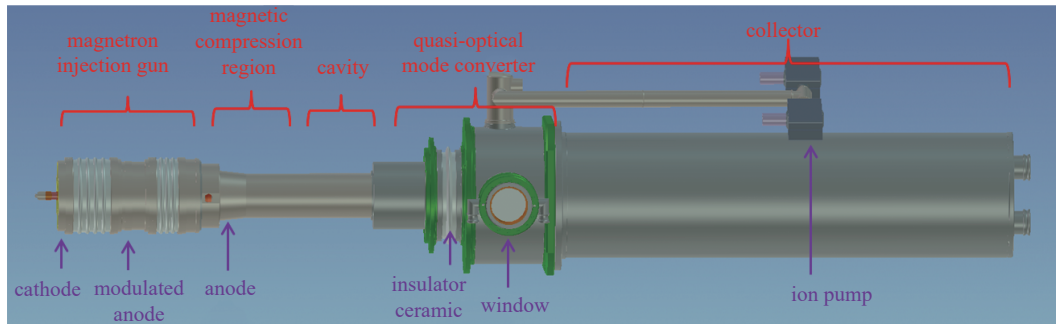


Fig. 1 Design model and components of the 105/140 GHz MW gyrotron

图 1 105/140 GHz 设计模型及组成图

回旋管的谐振腔为三段结构的开放式圆谐振腔,在 105 GHz 和 140 GHz 点的工作模式经过选模分析,确定为 TE_{18,7} 和 TE_{24,9}。这两个模式具有相同或相近的焦散圆半径、束波耦合半径,并且对于准光模式变换器,它们也具有相同或相近的辐射器螺旋切口长度和布里渊角。谐振腔的结构优化和束波相互作用分析采用自编的非线性自洽程序 SMSCC 和多模时域计算程序 MTC 迭代计算完成。

磁控注入电子枪采用双阳极电子枪,通过控制阴控电压差和总阴阳极电压实现对两个工作频率下电子束参数,如纵横速度比、速度离散、总束能的控制。考虑到腔内的束压降,电子束的总束压为-81 kV;电子束的束流设计值为 40 A。电子束速度比控制在 1.1~1.3,速度离散小于 5%。

该回旋管为横向管,采用了内置的准光模式变换器实现微波波束模式从波导模式转换为横向传输的准高斯波束。准光模式变换器由辐射器和 3 个相位校准镜组成。辐射器为预聚束型,准光计算采用基于标量衍射积分方程和 KS 优化迭代算法的自编程序 QOPC 进行计算设计。仿真计算得到总转换效率和标量高斯波束的成分分别为 97.3%/98%/105 GHz 和 99.1%/99.7%/140 GHz^[10]。

输出窗在现阶段采用氮化硼(BN)单层窗,窗片直径90 mm、厚度1.93 mm,窗的谐振频率位于两个工作频点。为提高总效率,该管采用单级降压收集极,最大降压幅度达到30 kV。采用纵向扫描线圈降低收集极内壁的沉积功率密度值在 0.5 kW/cm^2 以下。设计的回旋管长度2.53 m,重量约300 kg。采用超导磁体提供工作磁场,中心磁场最大可到7.0 T。

2 脉冲实验研究

经工艺试验,课题组完成了105/140 GHz双频回旋管的实验样管的研制,开展了调试和验证性实验研究。样管和实验测试照片如图2所示。实验在现有的高压电源系统条件下开展,高压电源系统包括阴极负高压电源、阳极正高压电源和灯丝电源。控制极通过阳极电源分压得到正高压或接地。

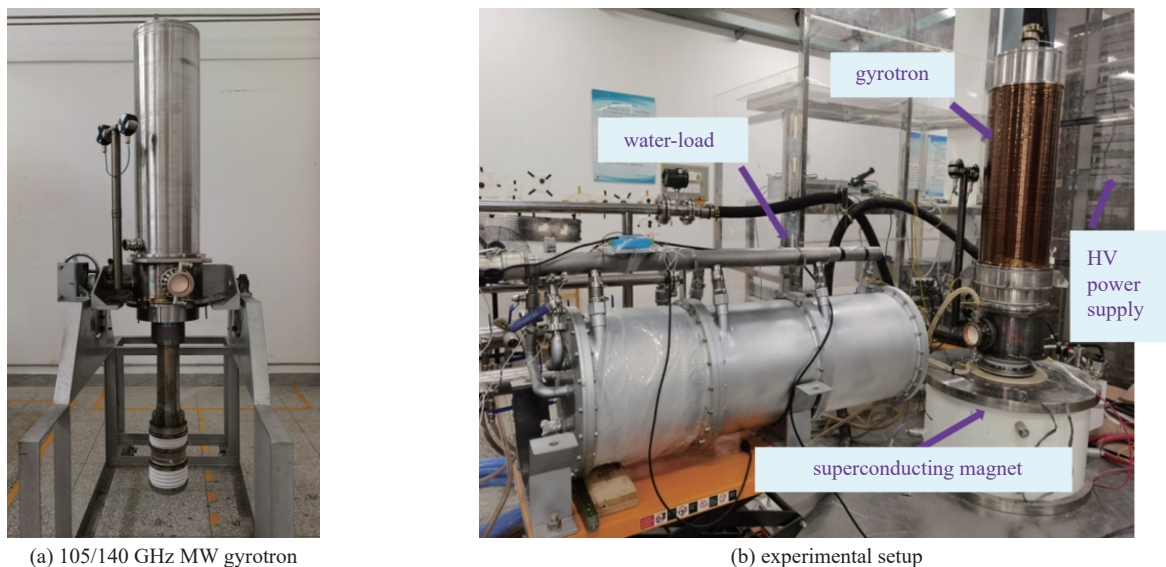


Fig. 2 Photographs of the 105/140 GHz MW gyrotron and experimental setup

图2 105/140 GHz MW 回旋管照片和实验装置

2.1 工作状态调试

实验首先在短脉冲状态下调试回旋管的工作状态,确定两个频率下的回旋管电极电压、电流和磁场的工作范围。调试时,通过微波检波器观测回旋管的输出微波信号,结合束斑测试确定模式状态,再通过混频法测量出信号的频率,进一步确定工作状态是否为工作模式。图3为确定工作点后,通过单个5 ms脉冲运行,在输出窗口表面的热敏纸上烧蚀出的束斑图案。从束斑图案可以看出束斑基本呈圆形,边缘没有杂散的烧蚀现象,说明波束能量集中,输出为单一模式,可判断输出波束为准高斯分布。在1~2 ms短脉冲状态下,通过混频法测得两个工作频点输出微波的频率分别为105.0 GHz和139.42 GHz,频率测试值和计算设计值基本一致。由此,基本确定了105 GHz

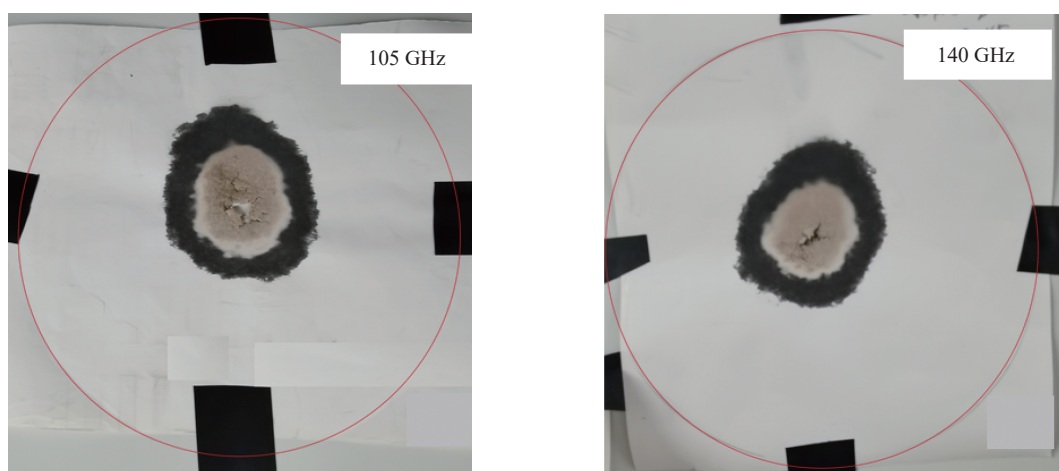


Fig. 3 Thermal paper's burned patterns of RF beams at the window aperture at 105 GHz and at 140 GHz obtained by a 5 ms short pulse

图3 5 ms 单次短脉冲作用下在窗表面热敏纸上形成的束斑图

点和 140 GHz 点运行的工作参数范围。

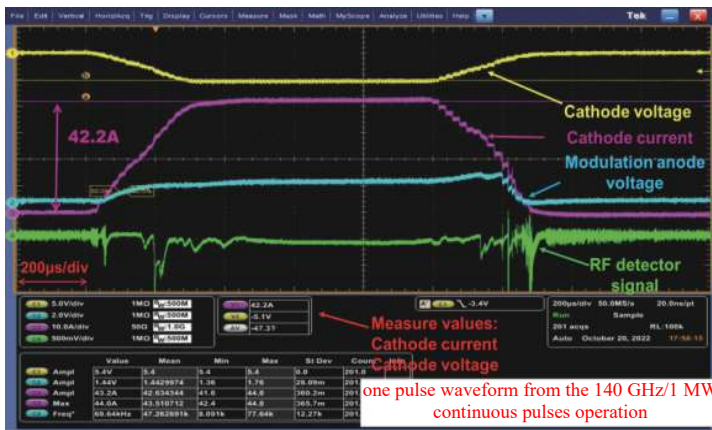
2.2 高功率脉冲实验

高功率脉冲实验是在器件设计的工作电压和电流值下进行参数调试,实现输出功率达到 MW 量级,以验证设计。此时阴极电压达 -50 kV 以上,阴极电流约 40 A,阴极电源的功率高达 2 MW,由于受实验室电网容量的限制,阴极电压的单次工作时长不能超过 1 ms。因此,回旋管的输出功率在低重频、连续短脉冲运行条件下,采用大功率水负载进行测量。功率计算式为

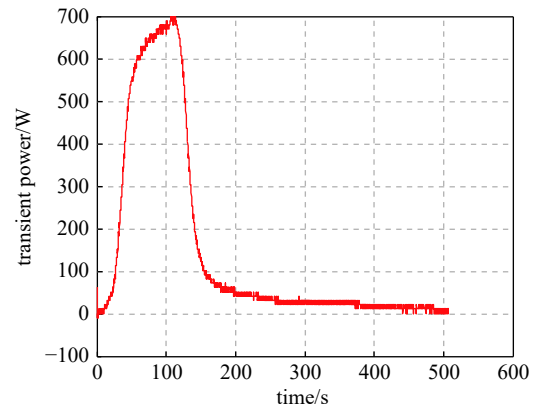
$$P = E_t/n\tau \quad (1)$$

式中: E_t 为回旋管总辐射能量,通过水负载测到的瞬时功率积分得到^[1]; τ 为微波的同步有效脉宽; n 为脉冲个数。最终通过工作参数的寻优,在重频 1 Hz、同步有效脉宽 0.7 ms、脉冲个数 100 个运行下,测试得到回旋管的最高功率结果为:(1)140 GHz 点,脉冲功率为 1.05 MW,总效率为 49%;(2)105 GHz 点,脉冲功率为 710 kW,总效率 34%。

图 4 为 140 GHz 点的测试结果。图 4(a)为在 140 GHz 工作点、1 Hz 重频脉冲运行时获取的单个脉冲测试波形,波形记录了阴极电压、阴极电流、阳极电压和微波检波脉冲信号。通过该图实测得到阴极电压 -51 kV、阳极电压 $+31$ kV、阴极电流 42.2 A。图中显示了微波检波信号的变化情况,微波检波信号在波形前端和后端出现不规则现象,这是由于检波器放置在输出窗和降压陶瓷之间侧前方外部空间,受到阴极电源电压前后沿产生的空间电磁干扰,以及降压陶瓷处泄漏的杂散微波造成的。由图中阴极电压和阴极电流波形可知微波有效同步脉宽 τ_{eff} 为 0.7 ms。图 4(b)为大功率水负载的瞬态功率曲线,由该曲线进行功率积分得到回旋管总辐射能量 E_t 为 73.5 kJ,由此计算得到回旋管的脉冲功率为 1.05 MW,对应总效率为 49%。同理,在 105 GHz 工作点,阴极电压 -53 kV、阳极电压 $+30$ kV、阴极电流 40 A 时,在相同重频条件下,通过水负载瞬时功率积分再计算得到脉冲功率为 710 kW,对应效率 34%。



(a) oscillography of pulse test at 140 GHz



(b) transient power profile tested by the water load

Fig. 4 Pulse test waveforms of output with the 140 GHz/1 MW continuous short-pulse operation

图 4 140 GHz/1 MW 连续脉冲测试时的波形

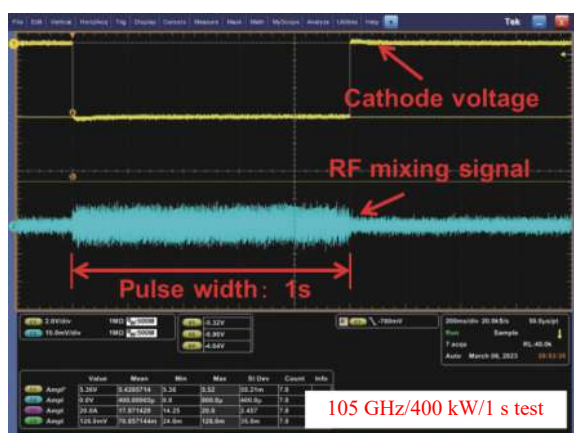
高功率实验结果分析表明:(1)140 GHz 点的实验结果与设计参数一致,设计基本得到了验证;(2)105 GHz 点的功率和效率实验值比设计值偏低,分析原因可能在于电子束的品质在该频点不太理想,以及管内部实际损耗偏大有关,其具体原因有待做进一步的验证实验。

2.3 长脉冲实验

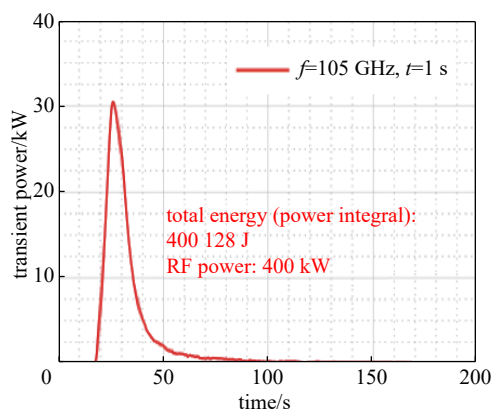
为实现回旋管能在磁约束聚变装置 ECRH 系统中应用,回旋管的工作时间至少需达到几秒,甚至连续波长时间运行,为此通过脉宽延展和长时间老炼实现该器件的长脉冲运行。受实验室电网容量的限制,脉宽延展实验时阴极电流控制在约 20 A 进行,输出功率降低至 300~500 kW。同时,由于该器件采用的是 BN 窗,其功率容量不能支撑几百千瓦功率长时间运行,实验目标为在两工作频点实现功率 300~500 kW、脉宽 1~2 s 的参数输出。脉宽延展实验时,采用红外热像仪监测 BN 输出窗表面的温度情况,控制工作脉宽使窗片温度不会热崩溃。

目前在 105 GHz 点通过工作参数的调节和老炼,该回旋管脉宽扩展时管内运行状态稳定。最终在工作稳定的前提下,脉宽延展后实现 400 kW/1 s、300 kW/2 s 的稳定输出。为避免窗片的损坏和保证稳定工作,没有进一步进行脉宽的时间扩展。长脉冲实验波形行如图 5、图 6 所示,两图分别显示了两种长脉冲实验结果时的阴极电压波形和混频信号的示波器波形,以及水负载的瞬时功率波形。由图 5(a)和图 6(a)可知,秒级脉宽运行时,电压波形

和频率均表现稳定;通过图 5(b)和图 6(b)大功率水负载的瞬态功率的能量积分计算,可得到准确的输出功率分别为 400 kW/1 s 和 307 kW/2 s。图 7 为在长脉冲运行时,通过红外热像仪拍摄的视频截取出的窗片温度最高时的图像,显示了在 105 GHz/300 kW/2 s 和 105 GHz/400 kW/1 s 运行时窗片最高温度分别达到 606 °C 和 503 °C。因此,窗片



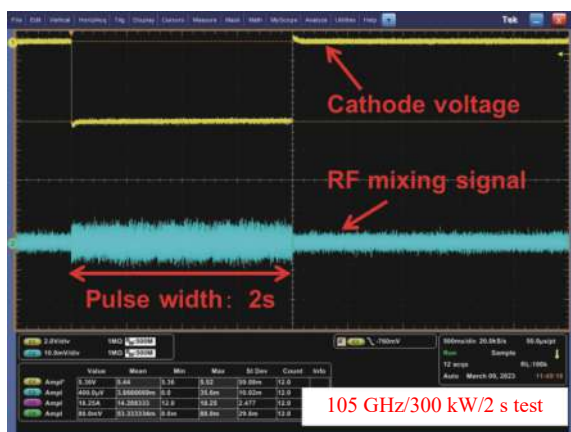
(a) 105 GHz/400 kW/1 s test waveform



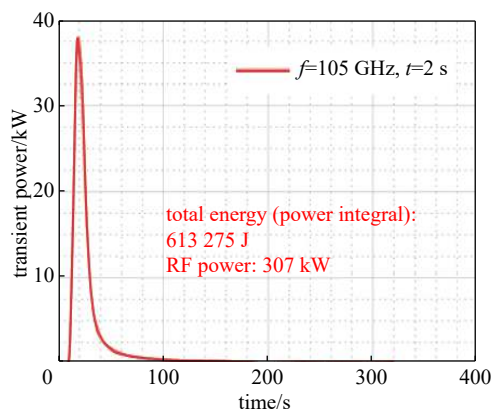
(b) transient power profile tested by the water load

Fig. 5 Results of pulse extension test of output with 105 GHz /400 kW/1 s

图 5 105 GHz 点脉宽扩展测试波形 (105 GHz /400 kW/1 s)



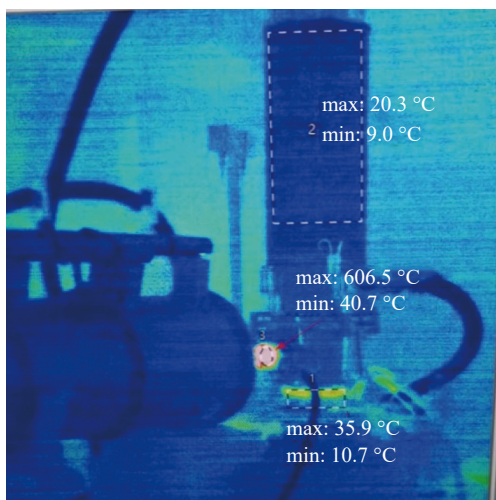
(a) 105 GHz/300 kW/2 s test waveform



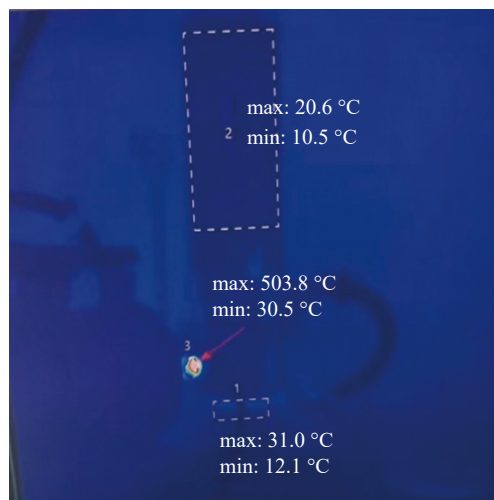
(b) transient power profile tested by the water load

Fig. 6 Results of pulse extension test of output with 105 GHz /300 kW/2 s

图 6 105 GHz 点脉宽扩展测试波形 (105 GHz /300 kW/2 s)



(a) 105 GHz/300 kW/2 s/606 °C



(b) 105 GHz/400 kW/1 s/503 °C

Fig. 7 Infrared images at the highest temperature of windows during pulse extension tests

图 7 脉宽扩展测试时得到的窗片最高温度时的红外成像图

升温的实验结果验证了BN窗的对于几百千瓦~兆瓦量级功率运行时间的有限性,如果再进一步扩展脉宽,窗片温度将很快升高至约1000℃,会导致窗片烧坏。为此,下阶段高功率长脉冲回旋管将必须采用金刚石窗。

在脉宽扩展的长脉冲实验中,为测试输出模式的稳定性,对秒级输出波束的频率进行了测试。采用混频法对波束的频率进行测量,混频产生的中频信号通过频谱仪进行实时测量,通过视频拍摄频谱仪上中频信号的变化,观测输出信号的稳定性。如图8为105 GHz/300 kW/2 s运行时中频信号频谱的截图。图中频谱仪的频率带宽为3 GHz,可以看出中频信号的频谱是单一的,说明回旋管的输出波束是主模输出,没有其他的杂模。同时,通过视频也观测到在105 GHz/300 kW/2 s运行时,回旋管RF信号的频率漂移变化范围在24 MHz内。这可能是运行时腔体内部等离子体放气对RF的影响,以及腔体壁上的热损耗导致尺寸变化造成的频率变化。

3 结论

本文介绍了105/140GHz双频兆瓦级回旋管的设计和最新的实验结果。该管采用了双频共用的谐振腔、准光模式变换器、BN输出窗,以及双阳极电子枪和单极降压收集极。受实验室电源功率容量和BN窗的功率容量的限制,在ms短脉冲条件进行了高功率的脉冲实验,在降低电流的条件下进行了展脉宽至秒级的长脉冲实验。实验结果为:(1)在重频1 Hz短脉冲条件下,在140 GHz点和105 GHz点,测试得到脉冲功率分别为1.057 MW和710 kW,对应总效率分别为34%和49%。(2)在105 GHz点通过脉宽的延展和老炼,长脉冲的实验结果为:300 kW/2 s、400 kW/1 s, BN窗片在两种状态下温度分别达到606℃、503℃和633℃,通过对混频信号的测量表明RF波束的频率单一,没有杂模。通过现阶段实验调试,基本上完成了对该双频回旋管设计的原理性验证,在国内首次实现了回旋管MW级脉冲功率输出,同时也首次实现了在105 GHz功率300 kW和400 kW水平秒级长脉冲运行。下一步课题组将进行该回旋管在140 GHz点的长脉冲调试,实现400~500 kW秒级输出;同时对该回旋管作进一步的结构和热设计方面的改进,采用金刚石窗实现更长工作时间的连续波输出。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Thumm M K A, Denisov G G, Sakamoto K, et al. High-power gyrotrons for electron cyclotron heating and current drive[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 073001.
- [3] Kariya T, Imai T, Minami R, et al. Development of over-MW gyrotrons for fusion at 14 GHz to sub-THz frequencies[J]. *Nuclear Fusion*, 2017, 57: 066001.
- [4] Ikeda R, Kajiwara K, Nakai T, et al. Progress on performance tests of ITER gyrotrons and design of dual-frequency gyrotrons for ITER staged operation plan[J]. *Nuclear Fusion*, 2021, 61: 106031.
- [5] Hu Linlin, Sun Dimin, Huang Qili, et al. Design and preliminary test of a 105/140 GHz dual-frequency MW-level gyrotron[J]. *Plasma Science and Technology*, 2022, 24: 035601.
- [6] Hu Linlin, Ma Guowu, Sun Dimin, et al. Development of a 28-GHz/50-kW/30-s gyrotron system for fusion application[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(4): 1468-1474.
- [7] 胡林林, 马国武, 孙迪敏, 等. 28 GHz/50 kW准光输出连续波回旋管[J]. *强激光与粒子束*, 2019, 31: 060101. (Hu Linlin, Ma Guowu, Sun Dimin, et al. A 28 GHz/50 kW continuous wave gyrotron with quasi-optical output[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 31: 060101)
- [8] Sun Dimin, Ma Guowu, Huang Qili, et al. Recent results of 28 GHz 400 kW long pulse gyrotrons at IAE-CAEP[C]//2021 46th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz). 2021: 1-2.
- [9] 胡林林, 孙迪敏, 黄麒力, 等. 105/140GHz双频兆瓦回旋管实现1.0MW脉冲输出[J]. *强激光与粒子束*, 2023, 35: 023001. (Hu Linlin, Sun Dimin, Huang Qili, et al. 1.0 MW pulse power achieved in 105/140 GHz dual-frequency MW-level gyrotron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2023, 35: 023001)
- [10] 黄麒力, 孙迪敏, 马国武, 等. 双频回旋管内置准光模式变换器设计[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32: 053001. (Huang Qili, Sun Dimin, Ma Guowu, et al. Design of quasi-optical mode converter for dual-frequency gyrotron[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32: 053001)
- [11] 黄麒力, 胡林林, 马国武, 等. 基于量热法的大功率毫米波功率测量及校准系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2022, 34: 043005. (Huang Qili, Hu Linlin, Ma Guowu, et al. Design of high power millimeter wave power measurement and calibration system based on calorimetry[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2022, 34: 043005)

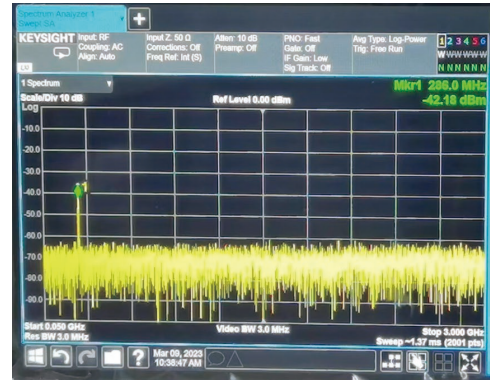


Fig. 8 Spectrum of mixing signal of RF beam during a 105 GHz/300 kW/2 s long-pulse operation

图8 105 GHz/300 kW/2 s长脉冲运行时波束混频信号频谱截图