



·高功率微波技术·研究快报·

105/140 GHz 双频兆瓦回旋管实现 1.0 MW 脉冲输出

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: 报道了聚变应用的 MW 级双频 (105/140 GHz) 回旋管的最新实验进展。该回旋管的谐振腔、准光模式变换器、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, 收集极采用单极降压。最新的实验表明: 在重频 1 Hz 短脉冲条件下, 在 105 GHz 点和 140 GHz 点, 测试得到脉冲功率分别为 710 kW 和 1.057 MW, 对应总效率分别为 34% 和 49%。这是国内首次在回旋管实验中实现 1.0 MW 功率输出。

关键词: 回旋管; 双频; 兆瓦; 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/HPLPB202335.220388

1.0 MW pulse power achieved in 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 progress of the 105/140 GHz MW gyrotron experiment aiming for fusion application is presented. The gyrotron employs dual-frequency design in triode magnetron injection gun, cavity, quasi-optical mode converter and window. In the experiment, pulse power of 710 kW at 105 GHz and 1.057 MW at 140 GHz were achieved at 1 Hz repetitive rate. The total efficiency is 34% and 49%, respectively. The experiment has firstly demonstrated the MW-level power output in the domestic quasi-optical gyrotron tests.

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

MW 级回旋管目前公认是唯一能用于磁约束聚变装置中电子回旋加热 (ECH)、电流驱动 (CD) 以及电子 Bernstein 波加热系统的微波源。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 s 至千 s 以上的回旋管, 它们已应用于 ITER, W7-X, EAST, JT-60SA, ASDEX-U 等多个磁约束聚变装置。双频、多频以及阶跃调频 MW 回旋管能增强 ECH/CD 系统的适应性和性能, 提高新经典撕裂模 (NTM) 稳定性的电流驱动 CD 效率, 是升级现有磁约束聚变装置或下一代磁约束聚变装置对回旋管的技术要求, 国际上主要回旋管研制机构都已开展了相关的研究^[1-4]。

基于聚变应用, 中国工程物理研究院应用电子学研究所在大功率回旋管方面展开了大量的研究工作^[5-8]。近年来, 为突破聚变用 MW 级多频高功率回旋管技术, 课题组选用了双频技术路线, 研制出了一套 105/140 GHz 双频 MW 回旋管, 2021 年开展了初步的实验研究。该回旋管和实验装置如图 1 所示, 其详细的设计、计算和初步实验结果见文献 [5]。该回旋管的谐振腔、准光模式变换器、输出窗采用了双频复用技术。谐振腔双频模式和频率分别为 105 GHz (TE_{18,7}) 和 139.3 GHz (TE_{24,9})。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。磁控注入电子枪采用双阳极电子枪, 通过控制阴控电压差以及总束电压实现在两个工作磁场 (频率) 下, 电子束速

* 收稿日期: 2022-11-15; 修订日期: 2022-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (12175217); 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金项目 (U1830201)

联系方式: 胡林林, hulinlin2016@163.com。

通信作者: 马国武, hunter_ma@126.com。

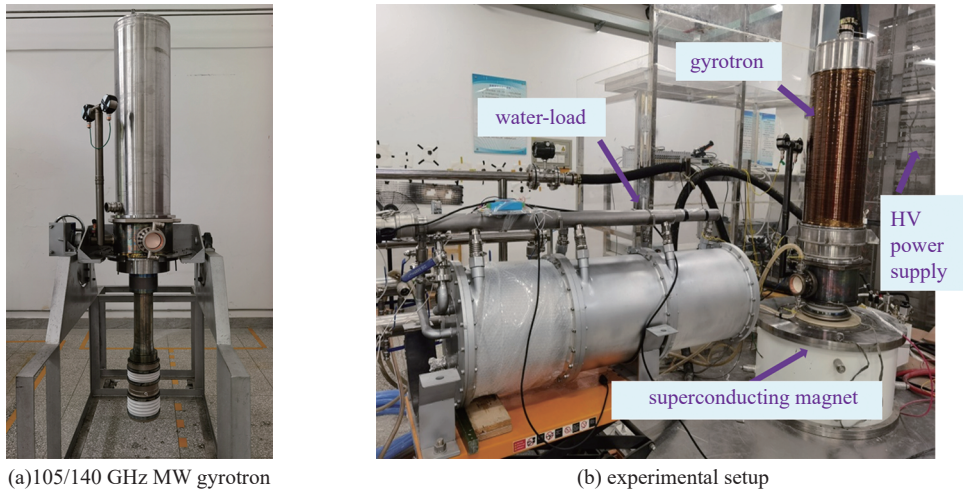


Fig. 1 Photographs of the 105/140 GHz MW gyrotron and experimental setup

图 1 105/140 GHz MW 回旋管照片和实验装置

度比控制在约 1.2, 速度离散小于 5%。内置准光模式变换器由辐射器和 3 个相位校准镜组成, 仿真计算得到在 105 GHz 和 140 GHz 两个频点下, 总转换效率分别为 97.3% 和 99.1%, 标量高斯波束成份分别为 98% 和 99.7%^[9]。输出窗在现阶段采用氮化硼单层窗, 窗片直径 90 mm、厚度 1.93 mm, 窗的谐振频率位于工作频率处。为提高总效率, 该管采用单级降压收集极, 降压幅度达到 30 kV。采用扫描线圈降低收集极内壁的沉积功率密度值在 0.5 kW/cm² 以下。设计的管长度 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。

在 2021 年初步实验中, 受阴极电源最大电流只能达到 30 A 的限制, 在 105 GHz 和 140 GHz 两工作点的脉冲功率分别达到 300 kW 和 540 kW^[5]。本轮实验课题组在前期实验的基础上进行了谐振腔结构优化、阴极工艺的改进; 同时, 对阴极电源功率容量进行了升级, 阴极输出电压最大达到 -58 kV, 输出电流最大可达到 50 A, 但受实验室电网容量的限制, 阴极电源的单次工作时长不超过 1 ms。因此, 本轮实验课题组主要是在短脉冲和大电流 40 A 状态下, 通过辐射功率和频率的测量, 以及工作磁场的调节, 进行回旋管的工作状态的寻优, 实现 MW 级功率输出。回旋管的辐射功率在重频脉冲工作条件下, 采用量热法测量, 课题组专门研制了一套毫米波功率测量及校准系统^[10]; 辐射微波频率在单脉冲状态下, 采用混频法进行测量。

图 2 为该回旋管在 140 GHz 工作点, 1 Hz 重频脉冲运行下的单个测试波形, 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。通过图 2 可以测量得到实际阴极电压 -51 kV、阳极电压 +31 kV、阴极电流 42.2 A。图 2 也显示了微波信号的变化情况。由于实验时检波器放置在输出窗侧方外部空间, 受到阴极电源电压前后沿产生的空间电磁干扰和此时的竞争模式干扰, 微波检波信号在前端和后端出现不规则现象, 由阴极电压和阴极电流波形可知微波有效脉宽 τ_{eff} 为 0.7 ms。图 3 为在 140 GHz 点, 在 1.0 Hz 重频, 脉冲个数 n 为 100 时, 大功率水负载测试得到的瞬态功率曲线, 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, 由此得到回旋管脉冲辐射功

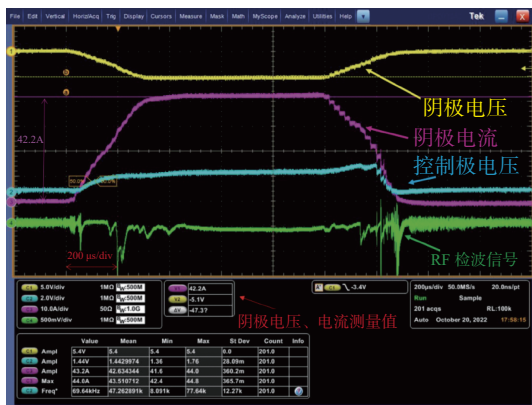


Fig. 2 Oscillograph of pulse operation

图 2 单次脉冲测试波形

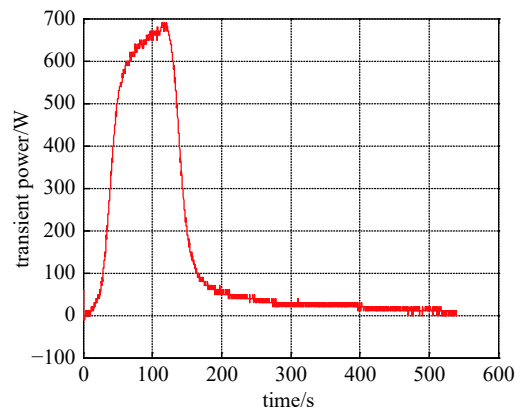


Fig. 3 Transient power profile tested by the water load

图 3 水负载的瞬态功率波形

率 $P = E_t/n\tau_{\text{eff}}$ 为 1.057 MW, 对应总效率为 49%。另外, 105 GHz 点的现实实验结果为, 在阴极电压 -53 kV、阳极电压 +30 kV、阴极电流 40 A 和相同的重频条件下, 测量得到脉冲功率为 710 kW, 总效率 34%。

目前为止, 这是国内首次实现大功率准光回旋管脉冲输出功率达到 MW 水平。下一步课题组将进一步对整管进行老炼, 期望在氮化硼输出窗下实现功率 500 kW、脉宽 1 s 的目标; 同时将进行下一阶段的结构优化, 电源及控制系统的改进, 采用金刚石窗实现 MW 回旋管的连续波运行。

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.
- [9] 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)
- [10] 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)