

文章编号: 2095-4980(2015)03-0458-04

S 波段 15 kW 连续波磁控管注入锁频实验研究

刘征宇, 霍飞向, 银振宇, 刘长军

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 注入锁频是磁控管相干功率合成的基础, 本文开展了 15 kW 磁控管的注入锁频实验, 研究了注入微波功率与可牵引带宽之间的关系。实现了 15 kW 磁控管注入锁频, 分析了不同注入功率下磁控管可牵引带宽。实验结果表明, 磁控管注入锁频牵引带宽随注入功率增大而增加, 在 165 W 注入功率下牵引带宽达到 5 MHz。该 15 kW 磁控管可用于大功率微波相干功率合成, 为多支大功率磁控管进行功率合成研究奠定了基础。

关键词: 磁控管; 注入锁频; 牵引带宽; 功率合成

中图分类号: TN761

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201503.0458

Experimental study on the phase-locking of an S band 15 kW continuous wave magnetron

LIU Zhengyu, HUO Feixiang, YIN Zhenyu, LIU Changjun

(School of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Injection phase-locking is the basis of microwave coherent power combining between magnetrons. The experiments of injection locking on a 15 kW large power S-band magnetron and the relation between the injection power and locking bandwidth are presented. The experimental results show that the 15 kW S-band magnetron achieves the phase-locking successfully. The locking bandwidths under various injection powers are studied. The experimental results show that the locking bandwidth becomes wider with the increase of injection power. The locking bandwidth reaches 5 MHz while the injection power is 165 W. It shows that the 15 kW magnetron is a powerful candidate for large power coherent power combining. The study lays the foundation of power combining between multiple large power continuous wave magnetrons.

Key words: magnetron; injection locking; locking bandwidth; power combining

由于磁控管输出功率大, 效率高, 具有体积小、成本低、重量轻、可靠性好的优点。磁控管的应用范围已从雷达、导弹、导航、电子干扰系统等军用领域扩展至高能粒子加速器、气象雷达、工业加热、超材料研究、医疗、食品工业乃至家庭炉灶等民用领域。然而在金刚石沉积、等离子体激发等领域^[1-2], 单支磁控管已经不能满足其大功率要求。而且单支大功率磁控管生产成本低, 需要发展多磁控管功率合成技术解决大功率微波源的成本问题。为保证微波功率合成的效率^[3], 通过功率合成器进行相干功率合成成为最佳方案^[4]。由于磁控管是振荡器, 其自由振荡的频率和相位不稳定, 故针对磁控管的注入锁频技术^[5-6]及移相控制技术^[7]是进行两路(多路)微波功率合成的重要技术。目前, 微波源锁频技术研究已有相关报道, 而 15 kW 功率级别的连续波磁控管注入锁频还未见报道。本文以国内一款 15 kW 连续波磁控管为研究对象, 成功实现了注入锁频, 并且探究了注入微波功率与牵引带宽之间的关系。

1 注入锁频基本理论

注入锁频是指一个大幅度简谐振荡 A 被另一个频率相近的稳定小幅度简谐振荡 B 所影响的效应。当简谐振荡 B

收稿日期: 2014-11-19; 修回日期: 2015-01-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助项目(2013CB328902); 国家自然科学基金 NSFC 0971051 和新世纪人才 NCET-12-0383 资助项目

的频率与A接近并且耦合合适时，A与B的相位差保持恒定，其频率相同，即大信号A被注入的小信号B锁定。A信号功率一定时，注入信号B越大，对A的可锁定带宽越宽。具体关系由Adler公式^[8]给出：

$$|\omega_i - \omega_0| \leq \frac{\omega_0 \rho}{Q} \tag{1}$$

式中： ω_i 为外部注入信号频率； ω_0 为谐振腔固有频率； Q 为谐振腔的品质因数； $\rho = \sqrt{\frac{p_i}{p_0}}$ 为注入和输出的振幅之比，即注入比， p_i 为注入功率， p_0 为被锁振荡器输出功率。

本文用固态功率放大器将信号源信号放大后，通过环形器注入磁控管，从而对磁控管输出的大功率微波进行锁频。由Adler公式可知，通过增大注入功率，可对磁控管输出大功率微波频率在一定范围内进行牵引。实验中使用频谱仪检测注入微波对磁控管的锁定和频率牵引。

2 实验方案

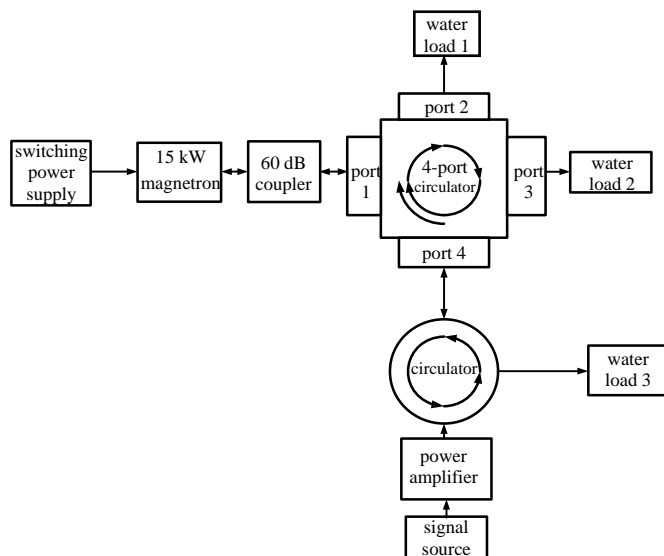
本实验磁控管高压源为一款开关电源，与传统模拟电源相比，开关电源工作稳定性好，纹波系数低，有利于磁控管输出功率和频率的稳定。该开关电源提供的阴极负高压波纹系数小于2%，并为磁控管提供灯丝电流和磁场电流。实验所用磁控管为南京三乐电子集团公司研制的2450MHz连续波15kW磁控管(CK-2091)，如图1所示。该磁控管工作所需的磁场由电磁铁提供。其正常工作时阴极电压为-11.5kV，灯丝电流为29A，阳极电流为1.8A，磁场电磁铁电流为3A(磁场强度约为0.125T)，输出微波功率大于等于13kW。



Fig.1 15 kW-magnetron(CK-2091)
图1 15 kW磁控管(CK-2091)

实验原理图及实物图分别如图2(a)和图2(b)所示。在图2(a)中，信号源输出的微波经过放大后，通过环形器注入磁控管。磁控管输出微波经60dB耦合器进行功率监测和频谱测量。磁控管输出的功率主要由负载1吸收。四端环形器和注入环形器分别用于保护磁控管和微波注入源。反射的微波会被水负载2和水负载3吸收。

降低磁控管灯丝电流是提高磁控管工作稳定性的一个有效方法。降低灯丝电流前、后磁控管输出频谱图，如图3(a)和图3(b)所示。磁控管自由振荡时输出频谱宽度由降低灯丝前的1.4MHz降至0.8MHz，磁控管工作更为稳定。其原因在于磁控管自由振荡过程中部分电子回轰阴极产生次级电子，此时阴极电子发射量超过仅由灯丝电流加热导致的热发射，过多的电子发射又会引起更多的电子回轰，最终导致腔体中电子过量，阴阳极间电压降低，使磁控管工作不稳^[9]。



(a) schematic for the experimental system



(b) configuration for the experimental system

Fig.2 Schematic and configuration for the experimental system

图2 实验系统原理图和实物图

降低灯丝后开启信号源和功放，将信号源频率调至磁控管自由振荡频率附近，逐渐加大注入功率直至相位锁定。注入信号可以促进磁控管内的电子群聚、抑制模式竞争，使磁控管内电子由原来的自由振荡变为受迫振动^[10]，输出与注入信号相位相差恒定的大功率微波。此时微波的相位频率稳定，改变注入微波功率，调节注入微波源的频率，可得到磁控管的牵引带宽。

3 实验结果

本文使用频谱仪为Rohde&Schwarz公司的FSP 9 kHz~7 GHz；功率计为中电41所的AV2433双通道功率计；注入微波源为Hittite公司的HMC-T2220。在磁控管稳定工作后，其频谱范围为2 440.4 MHz~2 441.2 MHz。由于磁控管为振荡器件，在自由振荡频带内噪声较大，频带范围也有漂移。

将信号源频率调至2 440 MHz进行注入锁频，当注入功率达到35 W时磁控管频率可稳定锁定，如图4所示，在2 439.9 MHz~2 441.9 MHz的频率范围内实现频率牵引。改变注入微波功率研究牵引带宽与注入微波功率之间的关系。实验测量数据如表1所示，随着注入微波功率增加，牵引带宽从2 MHz不断增加到5 MHz。根据测量数据由Alder公式得出，磁控管的品质因数 Q 值为 115 ± 5 。实验表明，对于大功率连续波磁控管，在注入比低于1%的条件下，Alder公式依然适用。通过提高磁控管 Q 值达到降低注入锁频需要的微波功率是一个有效的手段。

表 1 不同注入功率下的频率牵引范围

Table 1 Locking bandwidths for different power input

input power/W	locking bandwidth/MHz	output power/kW	Q
35	2 439.9~2 441.9	13.00	126.7
45	2 439.7~2 442.0	13.00	124.9
55	2 439.6~2 442.1	13.01	127.0
65	2 439.4~2 442.3	13.00	119.0
75	2 439.2~2 442.5	13.03	112.2
85	2 439.1~2 442.6	13.02	112.7
95	2 439.0~2 442.6	13.02	115.8
105	2 438.8~2 442.8	13.00	109.7
115	2 438.7~2 442.9	13.05	109.1
125	2 438.6~2 442.9	13.04	111.1
135	2 438.5~2 443.0	13.04	110.4
145	2 438.4~2 443.1	13.03	110.0
155	2 438.3~2 443.2	13.00	108.9
165	2 438.2~2 443.2	13.02	109.9

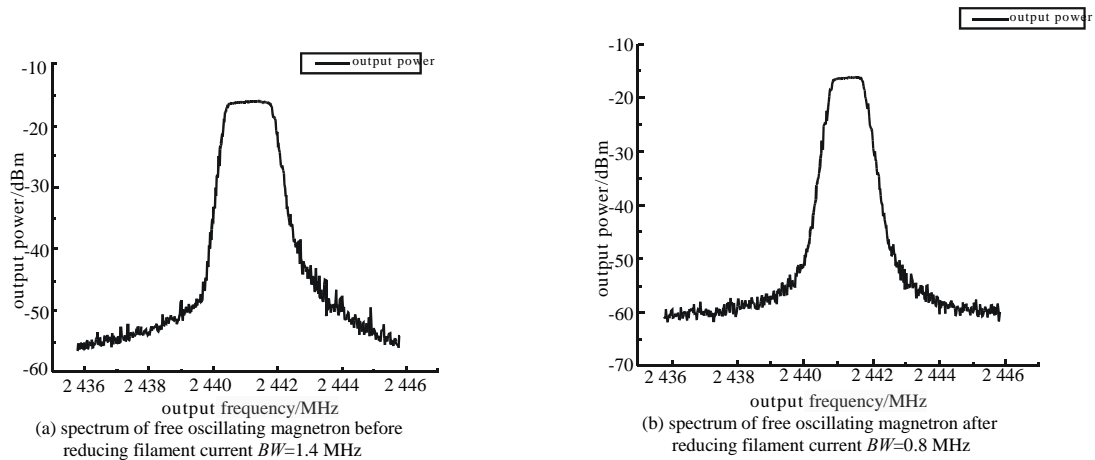


Fig.3 Spectra comparison before and after reducing filament current

图 3 降低灯丝电流前后频谱比较

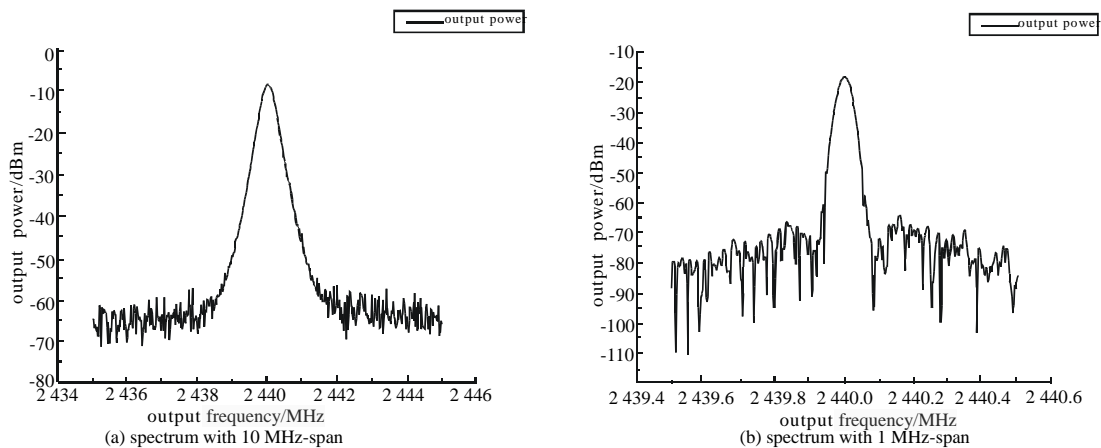


Fig.4 Spectra when the phase is locked with 10 MHz/1 MHz-span

图4 相位锁定后频谱仪展宽10 MHz/1 MHz频谱图

4 结论

大功率连续波磁控管相干功率合成是微波能应用的一个重要课题。磁控管注入锁频技术是连续波磁控管相干功率合成的基础。目前S波段大功率连续波磁控管注入锁频研究未见报道,本文研究为该波段大功率微波功率合成提供了重要基础。

实验结果显示在小功率注入的条件下,对于大功率连续波磁控管Alder公式依然适用。提高磁控管 Q 值是降低注入锁频所需功率的一个重要手段,降低灯丝电流有利于提高磁控管工作的稳定性。本文实验研究了S波段大功率连续波磁控管牵引带宽与注入功率之间的关系,为通过功率合成实现S波段30 kW连续波磁控管微波源提供理论和实验的参考依据。

致谢:

论文得到国家973计划2013CB328902、国家自然科学基金NSFC 0971051和新世纪人才NCET-12-0383资助。

参考文献:

- [1] 吴群. 磁控管的研究现状与发展趋势[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000,32(5):9-12. (WU Qun. Newly developed technique in the research of magnetrons[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2000,32(5):9-12.)
- [2] 刘强,杨阳,黄卡玛. 大功率微波下超材料的设计和应用[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013,11(2):245-249. (LIU Qiang, YANG Yang, HUANG Kama. Design and applications of metamaterials with high power microwave[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013,11(2):245-249.)
- [3] 刘长军,吴昕. 微波能工业应用研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(4):451-455. (LIU Changjun, WU Xin. Research progress on microwave energy industrial applications[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(4):451-455.)
- [4] 刘成帅,罗勇. 一种Ka波段6路功率分配/合成模块的设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(3):420-424. (LIU Chengshuai, LUO Yong. A design of 6-way Ka band power dividing/combining module[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(3):420-424.)
- [5] Chen S C, Bekafi G, Temkin R J. Injection Locking of a Long-Pulse Relativistic Magnetron[J]. Conference Record of the 1991 IEEE, 1991(2):751-753.
- [6] 杨宋寒,刘友春,王荣川,等. 大功率长寿命连续波磁控管注入锁频技术[J]. 真空电子技术, 2013,22:96-98. (YANG Songhan, LIU Youchun, WANG Rongchuan, et al. The injection locked technology for high-power long-life CW-magnetron[J]. Vacuum Electronics, 2013,22(5):96-98.)
- [7] 刘玲,黄何平,刘长军. 微波磁控管功率合成中基于LabWindows/CVI实现移相控制[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2014,12(6):842-845. (LIU Ling, HUANG Heping, LIU Changjun. Phase shifting control based on LabWindows/CVI for microwave magnetrons power combining[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2014,12(6):842-845.)
- [8] Adler R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. Proceedings of the IRE, 1946,34(6):351-357.
- [9] 吉尔默. 速调管、行波管、磁控管、正交场放大器和回旋管[M]. 北京:国防工业出版社, 2012. (Gilmotr A S. Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers and Gyrotrons[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.)
- [10] 尹志超,郭庆功. C波段磁控管注入锁相的实验研究[J]. 真空电子技术, 2012(1):64-66. (YIN Zhichao, GUO Qinggong. The experimental research of phase-locking on C band magnetron[J]. Vacuum Electronics, 2012(1):64-66.)

作者简介:



刘征宇(1989-), 男, 四川省绵阳市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为磁控管注入锁频技术. email: cjliu.cn@gmail.com.

霍飞向(1990-), 男, 陕西省渭南市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为磁控管锁频调相技术.

银振宇(1990-), 男, 四川省乐山市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为磁控管功率合成技术.

刘长军(1973-), 男, 河北省邢台市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电磁场与微波技术.