

文章编号: 2095-4980(2018)04-0688-04

基于注入锁频理论的扫频磁控管的理论与仿真

李济海, 高中杰, 朱铎丞, 黄卡玛, 杨 阳*

(四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 为了给需要大功率扫频微波源的变频微波加热、通信干扰等领域提供一种高效低成本解决途径, 在磁控管注入锁频理论的基础上, 提出了一种基于磁控管的扫频大功率微波源。首先通过磁控管的等效电路模型对该设想进行了可行性分析, 然后在微波仿真软件 CST STUDIO SUITE 中对磁控管建模并进行 particle-in-cell 仿真实验验证。分析了注入比对磁控管高频电压输出以及频谱的影响。磁控管的最高扫频带宽可达 21 MHz。

关键词: 磁控管; 注入锁频; 注入比; 扫频; 带宽; 大功率

中图分类号: TN123

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201804.0688

Theoretical and simulation study on sweep frequency magnetron based on injection-locking theory

LI Jihai, GAO Zhongjie, ZHU Huacheng, HUANG Kama, YANG Yang*

(College of Electronic and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: A high-power sweep frequency microwave source of magnetron based on injection-locking theory is proposed to meet the requirements of variable frequency microwave heating, communication jamming and other fields. The theoretical analysis of the equivalent circuit model of magnetron is conducted in the first place. Then, the model of Continuous-Wave(CW) magnetron is established in CST STUDIO SUITE to work on the simulation verification of particle-in-cell. The effects of injection ratio on magnetron RF voltage and spectrum are analyzed at last. And the maximum sweep bandwidth of magnetron output turns out to be 21 MHz.

Keywords: magnetron; injection-locking; injection ratio; sweep frequency; bandwidth; high-power

磁控管是正交振荡器的一种, 具有输出功率大, 效率高, 体积小, 相对于其他微波源来说工作电压低并且成本低等优点^[1]。磁控管在今天被广泛用于微波加热、微波干燥、污水处理、微波等离子体等^[2-4]许多领域, 但是由于自由振荡的磁控管在工作时会受到灯丝电压、灯丝电流、谐振腔温度等因素的影响, 其频率稳定性以及相位噪声性能都相对较差^[5]。许多专家学者在磁控管注入锁频方面对磁控管输出信号稳定性的改善做了许多研究^[6-8], 因此可以考虑通过进一步的研究把磁控管应用于对频谱要求相对较高的领域当中。在微波加热领域中为了加热的均匀性或防止局部过热, 会用到变频加热^[9]。在电子对抗领域中, 有时会使用扫频信号对扩频通信系统进行干扰^[10]。磁控管由于成本低, 输出功率大, 可以为这些应用提供新的解决思路。

本文以磁控管的等效电路模型为基础, 对存在外部扫频信号状态下的磁控管注入锁频进行了理论分析。在对磁控管等效电路模型理论分析的基础上, 在微波仿真软件 CST STUDIO SUITE 中对磁控管建模并进行扫频信号的注入锁频 particle-in-cell 仿真实验验证。分析了注入比对磁控管输出功率稳定性以及扫频带宽的影响。最终磁控管模型的输出扫频带宽可以达到 21 MHz。

收稿日期: 2017-11-10; 修回日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(61501311); 四川大学德阳校市科技合作专项资金资助项目(HZYF201519)

*通信作者: 杨 阳 email:yyang@scu.edu.cn

1 理论推导与分析

磁控管被外部信号注入锁定的等效电路模型^[11-16]，如图 1 所示，由基尔霍夫电压定律可以得出：

$$-(g + jb)\tilde{U}_{RF} = \frac{\tilde{U}_{RF}}{R} + \frac{\tilde{U}_{RF}}{j\omega L} + j\omega C\tilde{U}_{RF} + C\omega_0 \frac{G + jB + \rho e^{-j\theta}}{Q_{ext}} \tilde{U}_{RF} \quad (1)$$

式中： $\rho = i/U_{RF} = \sqrt{P_i/P_{RF}}$ ， ρ 是注入信号的电压与磁控管自由振荡时的高频电压之比，即通常所说的注入比； θ 是外部注入信号的相位与磁控管高频输出相位的差值。

通过对式(1)进行解耦以及实部虚部分离，可以得到磁控管的高频输出电压以及注入比与磁控管外部品质因数的关系：

$$U_{RF} = \frac{U_{dc}}{1 + C\omega_0 R / Q_L} \frac{1}{\beta} + e^{-\frac{1}{\beta}\gamma t} \quad (2)$$

$$\frac{d\theta}{dt} + 1 - \omega' = -\frac{\rho}{2Q_{ext}} \sin\theta \quad (3)$$

式(2)中： U_{dc} 是磁控管的阳极电压； ω_0 是磁控管谐振腔的本振频率； $\beta = 1 + \rho\omega_0 \cos\theta / (\gamma Q_{ext})$ ， ω' 是外部信号的归一化中心频率，即外部信号中心频率与磁控管谐振腔本振频率的比值；另外

$$Q_L = 1 / \left(\frac{1}{Q_0} + \frac{G}{Q_{ext}} \right) \quad (4)$$

式中： Q_0 是谐振回路的固有品质因数； Q_{ext} 是谐振电路的外部品质因数。

当磁控管被外部信号锁定时^[13-14]，外部注入信号的相位与磁控管高频输出相位的差 θ 将会是一个常数，即此时 $d\theta/dt=0$ ，式(3)就会变为：

$$1 - \omega' = \frac{\rho}{2Q_{ext}} \sin\theta \quad (5)$$

因此当外部信号为一个扫频信号并且在一定范围内扫频时，在外部信号中心频率 ω' 扫频至自由振荡的磁控管中心频率附近时，磁控管可以被外部信号完全锁定，此时磁控管的高频输出将是一个完全的大功率扫频信号；在外部信号中心频率 ω' 扫频到距磁控管中心频率稍远处时，或者说 $2Q_{ext}|1-\omega'|$ 略大于 ρ 时，磁控管的输出会在自由振荡磁控管的频率和外部信号频率的差值 $\Delta\omega$ 的整数倍处产生边带信号，这就意味着在该情况下磁控管将处于准锁定的状态。也就是说在外部信号是一个扫频信号时，磁控管的锁定范围将会比 Adler 条件的范围略大^[13]。

另外，从式(2)中还可获得更多信息：对于高品质因数的谐振回路(磁控管)来说，当注入比增加时，磁控管的高频输出将会有有一定降低；并且由于 $e^{-\frac{1}{\beta}\gamma t}$ 的存在，在外部扫频信号的功率相对较高时，扫频信号的频率会频繁发生变化，磁控管的高频输出无法在短时间内达到稳定状态，即 $e^{-\frac{1}{\beta}\gamma t}$ 不能忽略，因此会对磁控管的高频输出幅值的稳定性有较大影响。

2 仿真验证及结果分析

为了验证上述理论，在仿真软件 CST 的粒子工作室中建立了一个简单的 10 腔磁控管模型并对其进行 particle-in-cell 仿真。图 2 为在 CST 中建立的模型剖面结构图。

阳极电势设置为 0 V，阴极电势设置为 -4 200 V，同时在平行于磁控管模型轴线方向上添加大小为 0.19 T 的恒定磁场。阴极粒子 PIC 溢出模型设置为 DC。图 3 为磁控管模型工作在 π 模时的高频输出电压以及高频电压的傅里叶变换。可以看到，该磁控管模型工作在 π 模下的高频电压幅值大约是 100 V，其中心频率为 2.343 GHz。

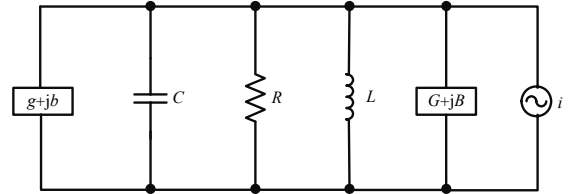


Fig.1 Equivalent circuit model of magnetron locked by an external signal
图 1 注入锁定磁控管的等效电路模型

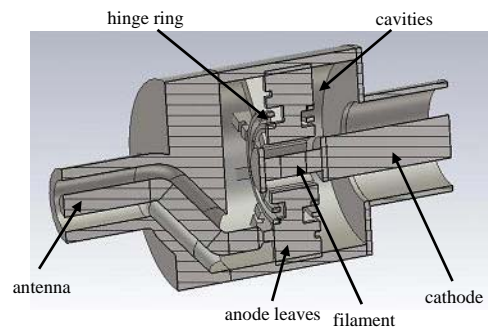


Fig.2 Model of magnetron in CST particle studio
图 2 CST 粒子工作室中的磁控管模型结构图

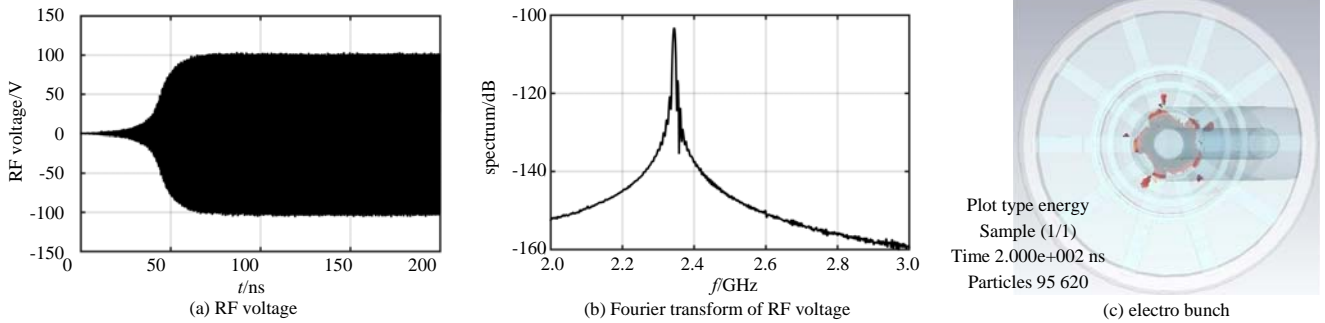


Fig.3 Resonant state of the free running magnetron
图 3 自由振荡磁控管状态

自由振荡磁控管模型的状态如图 3 所示。由于模型输出的中心频率为 2.434 GHz，因此将外部扫频信号的扫频范围设置为 2.3~2.4 GHz 来对其进一步仿真研究。外部扫频信号的扫频周期为 1 000 ns，扫频间隔为 40 ns。图 4 为外部注入扫频信号的频率变化示意图。仿真中保持磁控管的参数不变，通过改变注入信号的功率来调整注入比。如图 2 所示，外部信号通过模型中的微波输出端口注入磁控管谐振腔。本次仿真中平均设置了从 5%到 50%的 10 组不同注入比来进一步对磁控管输出进行详细研究。图 5 展示了注入比分别在 5%,25%,45%时的磁控管输出示意图。

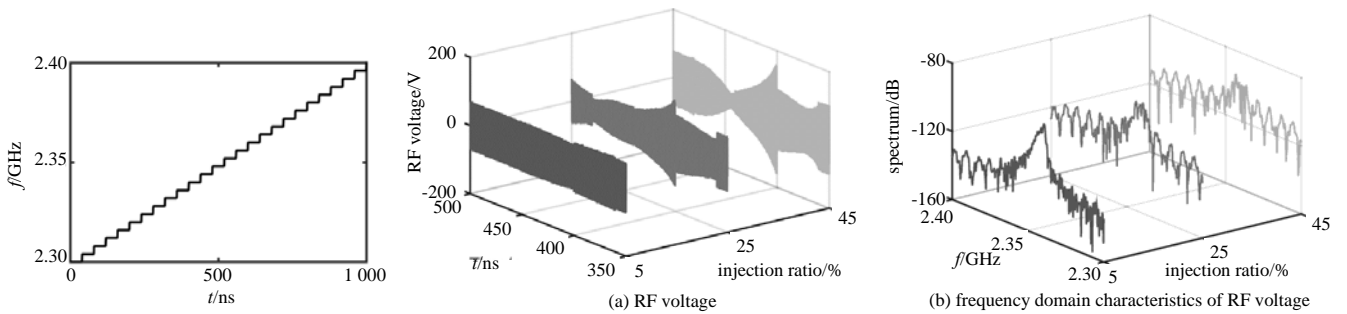


Fig.4 Frequency of the driving signal
图 4 外部信号的频率变化示意图

Fig.5 Comparison of the magnetron output with different injection ratios
图 5 不同注入比下磁控管输出对比

该仿真磁控管模型的微波输出功率为 5 kW，因此注入扫频信号的功率分布在 12.5 W 至 1 250 W。从图 5(a)中可以看出，随着外部信号功率的增加，被锁定的磁控管的高频电压输出幅值的波动逐渐加大。另外，虽然注入功率与磁控管本身功率的和随着注入功率的增加而增加，但是锁定状态下的磁控管输出功率增加并不明显。图 5(b)是对应的高频电压的傅里叶变换，可以看到，随着注入比的增加，磁控管的锁定带宽也在增加，磁控管扫频范围越来越大。图 6 显示了被外部信号锁定的磁控管随注入比变化的详细参数。磁控管实际输出的功率要略小于注入信号功率加磁控管自由状态功率的总功率。另外，随着注入比的增加，这一差值也会略有增加。在注入比为 50%的时候，磁控管的锁定带宽达到了最大值 21 MHz。这一结果与第 2 部分中所讨论的完全一致。

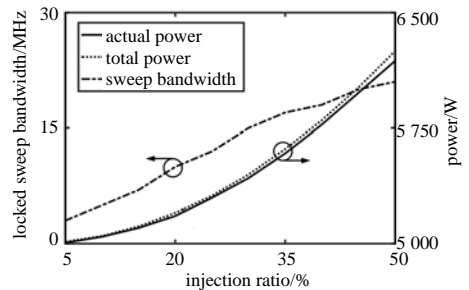


Fig.6 Magnetron output parameters with different injection ratios

图 6 磁控管输出参数在不同注入比下的对比

3 结论

基于磁控管的等效电路模型，分析了磁控管在有外部扫频信号注入时的输出，并分析了注入比对磁控管高频电压输出和扫频带宽的影响。随着注入比的增加，高品质因数振荡器磁控管的扫频带宽增加的同时，输出高频电压的稳定性也有所降低。在理论分析的基础上，又在 CST STUDIO SUITE 仿真软件的粒子工作室中进行建模仿真验证。对仿真结果分析得出，被锁定后的磁控管输出功率略小于自由状态下的输出功率与注入功率之和。也就是说随着注入比的增加，磁控管输出效率有小幅降低，但是在注入比为 50%的时候，磁控管的扫频带宽可以达到 21 MHz。本文中的注入比虽然相对较高，但是使用该大注入比锁定的磁控管作为主磁控管，对多个从磁控管进行注入锁频，进而功率合成，对实现更大功率扫频微波源具有实际意义。根据对松下 2M244-M1 磁控管的锁频带宽实验数据反推出 Q 值对比来看，在实际应用中的磁控管一般比仿真模型中的 Q 值要低，这也就

意味着在实际应用当中，磁控管扫频输出的带宽可以更宽。这为需要大功率扫频微波源的实际应用降低成本提供了一种新颖的方法。

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] VEGA-MERCADO H,GÓNGORA-NIETO M M,BARBOSA-CÁNOVAS G V. Advances in dehydration of foods[J]. Journal of Food Engineering, 2001,49(4):271-289.
- [3] TIAN Y,ZUO W,REN Z,et al. Estimation of a novel method to produce bio-oil from sewage sludge by microwave pyrolysis with the consideration of efficiency and safety[J]. Bioresource Technology, 2011,102(2):2053-2061.
- [4] BOOSKE J H. Plasma physics and related challenges of millimeter-wave-to-terahertz and high power microwave generation[J]. Physics of Plasmas, 2008,15(5):55502.
- [5] MITANI T,SHINOHARA N,MATSUMOTO H,et al. Noise-reduction effects of oven magnetron with cathode shield on high-voltage input side[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2006,53(8):1929-1936.
- [6] CRUZ E J,HOFF B W,PENGVANICH P,et al. Experiments on peer-to-peer locking of magnetrons[J]. Applied Physics Letters, 2009,95(19):191503.
- [7] CHANG H. Phase noise in self-injection-locked oscillators — theory and experiment[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2003,51(9):1994-1999.
- [8] 霍飞向,刘征宇,黄何平等. S 波段 1 kW 连续波磁控管拓展注入锁频带宽[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015, 13(2):251-254. (HUO Feixiang,LIU Zhengyu,HUANG Heping,et al. Inject-locking bandwidth expansion of a 1 kW continuous wave magnetron at S-band[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(2):251-254.)
- [9] ANTONIO C,DEAM R T. Comparison of linear and non-linear sweep rate regimes in variable frequency microwave technique for uniform heating in materials processing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005,169(2):234-241.
- [10] POISEL Richard A. 现代通信干扰原理与技术[M]. 通信对抗技术国防科技重点实验室,译. 北京:电子工业出版社, 2005. (POISEL Richard A. Modern communication jamming principles and techniques[M]. Translated by National Defense Science and Technology Key Laboratory of Communication Countermeasure Technology. Beijing:Publishing House of Electronics Industry, 2005.)
- [11] CHEN S. Growth and frequency pushing effects in relativistic magnetron phase-locking[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1990,18(3):570-576.
- [12] SLATER J C. The phasing of magnetrons[D]. Boston:Massachusetts Institute of Technology, 1947.
- [13] PENGVANICH P,NECULAES V B,LAU Y Y,et al. Modeling and experimental studies of magnetron injection locking[J]. Journal of Applied Physics, 2005,98(11):114903.
- [14] ADLER R. A study of locking phenomena in oscillators[J]. Proceedings of the IEEE, 1973,61(10):1380-1385.
- [15] CHEN C,CHAN H,DAVIDSON R C. Parametric simulation studies and injection phase locking of relativistic magnetrons[J]. Intense Microwave and Particle Beams II, 1991(1407):105-112.
- [16] CHEN S,BEKEFI G,TEMKIN R. Injection locking of a long-pulse relativistic magnetron[J]. Intense Microwave and Particle Beams II, 1991(1407):67-73.

作者简介：



李济海(1990-),男,河南省安阳市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波携能通信.email:perfectjhh123@gmail.com.

高中杰(1991-),男,山东省潍坊市人,在读硕士研究生,主要研究方向为微波携能通信.

朱铎丞(1986-),男,江苏省徐州市人,Cornell University 联合培养博士生,讲师,主要研究领域为微波测量、多物理场耦合计算和微波工业应用.

杨阳(1983-),男,重庆市人,美国 Clemson University 联合培养博士生,副教授,硕士生导师,主要研究领域为微波测量、微波化学以及微波功率合成.

黄卡玛(1964-),男,重庆市人,博士,教授,博士生导师,973 计划首席科学家,主要研究方向为微波能基础理论与创新应用.