·研究与设计·

一种S波段基于注入锁定技术高效的MOSFET大功率微波源

杨梦琳，刘臻龙，刘长军

（四川大学电子信息学院，四川　成都　610064）

An S-Band High Power Microwave Source Based on High Efficiency Injection-Locked MOSFET

YANG Meng-lin，LIU Zhen-long，LIU Chang-jun

（*School of Electronics and Information Engineering*，*Sichuan University of China*，*Chengdu* 610064，*China*）

Abstract：A high efficiency injection-locked MOSFET oscillator using imbalanced coupling resonator in feedback circuit is presented in this paper. An output power of 203 W and a drainefficiency of 54.18% are obtained at 2.45 GHz，where the injection signal is 1/1000 of the output signal，and the locked bandwidth is 2.0 MHz. Compared with traditional high power microwave sources，the injection-locked MOSFET oscillator has advantages of low operating voltage，well phasecontrol and well frequency control，and is conducive to realize uniform heating and accurate temperature control in microwave chemical experiment.

Key words：Class-AB amplifier，Injection-lockedoscillator，Feedback circuit，Phase control

摘要：本文提出了一种利用不平衡耦合谐振器的反馈电路，实现高效率的S波段基于注入锁定技术高效的MOSFET振荡器，在2.45 GHz可以获得203 W的输出功率和54.18%的漏极效率，其注入信号为输出信号的1/1000，锁定带宽为2.0 MHz。相对于传统的大功率微波源，基于注入锁定技术高效的MOSFET振荡器，工作电压低，相位和频率可控性有明显优势，更有利于实现微波化学实验中的均匀加热以及精确的温度控制。

关键词：AB类放大器；注入锁定振荡器；反馈电路；相位控制

中图分类号：TN752　　**文献标识码**：A　　doi：10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2018.01.08

近年来随着对清洁能源的需求越来越高，连续波磁控管作为一种大功率、高效率、低成本的微波功率源，在工业微波能等领域中被广泛使用[1]。然而连续波磁控管频率和相位的不可控行，造成了热点和加热不均等问题，尤其是通常采用高压直流电源驱动微波磁控管，电源打火等现象在某些特定的工业化学反应中极易造成工业生产事故，利用LDMOS、GaN-HFET、MOSFET等固态器件来替代微波炉中的磁控管，成为目前的一种解决方案和研究的热点[2]。利用LDMOS、GaN-HFET、MOSFET等固态器件有许多好处，如：固态器件的寿命更长，其频率和相位均可控制，可以做到智能加热。频率的可控性更是可以利用在微波化学中，做到精确的温度控制，使得化学加热更均匀[3-4]。

近年来，随着微波能技术的发展，加大了对降低微波发生器的成本，振荡器小型化以及大功率微波源频相控制技术的研究[5-7]。磁控管的注入锁定技术可以获得磁控管的幅度和相位控制，但高注入比的磁控管存在带宽窄、相位和频率可控性有限等问题[8]。传统的固态微波发生器通常由PLL锁相振荡器和移相器产生小信号，经过高功率放大器放大成为大功率微波信号，加入了增益控制组件，维持微波大信号的输出稳定性[9]，所以传统的微波源应用成本一直居高不下，难于适应微波能在工业中的应用。

为了解决这些问题，本文提出了一种在反馈电路中利用非平衡耦合谐振器，构成的高效率注入锁定振荡器。通过注入对应输出功率1/1000的小信

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

号，实现高效率及高功率。搭建的高效率振荡器在2.45 GHz可以实现203 W的输出功率和54.18%的效率。相对于传统的大功率微波源，基于注入锁定技术高效的MOSFET振荡器，成本低、工作电压低、相位和频率可控性有明显优势，更有利于实现微波化学实验中的均匀加热以及精确的温度控制。

1 电路设计

由放大器和频率选择网络所构成的注入锁定振荡器，必须要满足如图1所示的振荡条件（巴克豪森振荡条件）。本文提出的S波段基于注入锁定技术高效的MOSFET大功率微波源如图2所示，它由三部分组成，分别是功率放大器、反馈电路和注入电路。其工作原理是在不影响功率输出和改变输出端负载特性的前提下，通过耦合功率放大器的很小部分功率，并通过反馈电路叠加到输入电路的注入功率，值得强调的是反馈支路的设计必须满足巴克豪森振荡条件。

1.1 AB类功率放大电路

本次电路设计选用的是Freescale的MHT1003N功放芯片，该芯片为N沟道加强型MOSFET，其工作频率范围为2400～2500 MHz，小信号增益为16 dB，直流工作点100 mA@30 V。功率放大电路由输入匹配电路、功放芯片、输出匹配电路和直流偏置电路。

1.2 反馈电路

振荡器的频率由反馈电路的频率所决定。而反馈电路由谐振器、耦合电容（C_1和C_2）以及微带传输线（T_1和T_2）组成。假设功率放大器的小信号增益$A(s)$为18 dB，为了在P3dB条件下工作，则反馈回路的反馈电平$\beta(s)$需为－15 dB。传输线T_1和T_2特性阻抗为50 Ω，用于调节振荡器的相位，使其满足图1所示的振荡条件。

1.3 注入电路

注入电路由提供频率的串联电容和带有参考相位的输入信号组成。为减小串联电容耦合到主电路（功率放大电路和反馈电路）的影响，降低整体性能。

2 电路仿真

振荡器电路结构如图2所示，利用ADS 2011（Advanced Design System）电磁软件仿真。选用介电常数为2.65，厚度为1 mm的F4B－2作为介质基板，其介电损耗角正切$\tan\sigma$为0.001。

为了能在2.4 5 GHz获得更好的效率，功率放大电路中直流偏置条件选用$V_{ds}=30$ V，$V_{gs}=2$ V。在此工作条件下，功率放大电路的增益为15.45 dB，输出功率为53.45 dBm，功率附加效率（PAE）为56.56%，如图3所示，此时的输入功率为39 dBm。

选用Q为500的谐振器，Q越大，谐振器的谐振曲线越尖锐，选频特性越好。在反馈回路中，耦合电容C_1和C_2主要用于调节反馈电平$\beta(s)$。对于固定电容C_1和可变电容C_2，其反馈量的仿真结果如图4所示。对固定电容C_2和可变电容C_1，其反馈量的仿真结果如图5所示。其中端口1表示反馈电路的输出，端口2表示功率放大器的输出。

通过图4和图5所示，可以发现固定电容$C_1=1.1$ pF时，随着可变电容C_2值的增加，会导致反馈量$\beta(s)$的降低；同样固定电容$C_2=3.0$ pF时，改变可变电容C_1的值，随着C_1的增大，反馈电平$\beta(s)$也随着减小。这导致振荡电路的整体效率降低。故选用$C_1=1.1$ pF和$C_2=3.0$ pF的电容作为反馈回路的耦合电容。

注入电路部分要确保串联电容对主电路的影响尽量小，提高整体振荡电路的效率。因此，本文最终选择了0.1 pF的电容。

对振荡电路仿真，其锁定带宽约为2.0 MHz。展示了输出功率P_{out}、功率附加效率PAE及漏极效率η_d随直流电压V_{ds}变化的曲线。此时，在不同直流电压下振荡器的工作效率均能保持一个高的效率。振荡器实现了V_{ds}在20～30 V范围，漏极效率及PAE均保持在50%以上，对应142～212 W的功率输出。

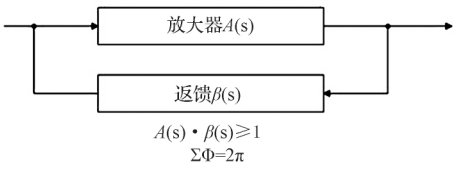

图1 巴克豪森振荡条件

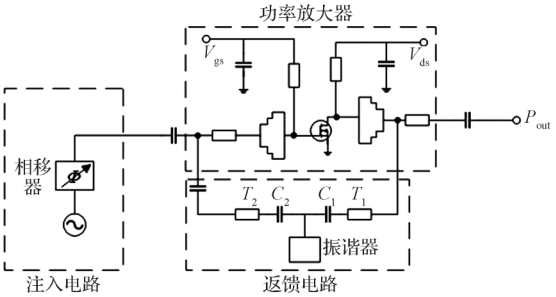

图2 注入锁定振荡器原理图

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

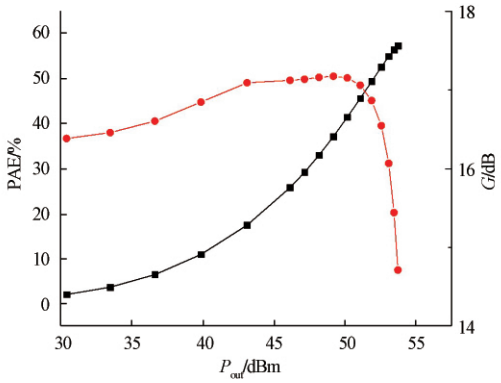

图 3　功放特性

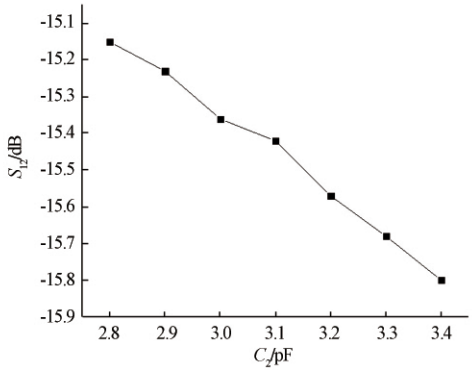

图 4　固定 C_1，改变 C_2，返馈量的仿真结果

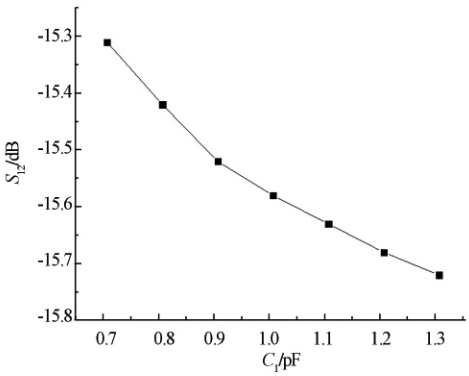

图 5　固定 C_2，改变 C_1，返馈量的仿真结果

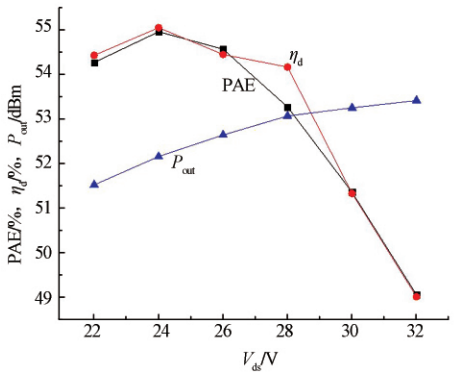

图 6　振荡器特性

同时在 $V_{ds}=28$ V，$V_{gs}=2$ V 条件下，所设计的振荡器在 2.45 GHz 有 203 W 的输出，PAE 达到了 53.28%，漏极效率 η_d 为 54.176%；在 $V_{ds}=30$ V 时，可以获得 212 W 的输出功率，PAE 为 51.368%，漏极效率为 51.34%，实现了高效率的要求。

3　结束语

本文所提出的一种在反馈电路中利用非平衡耦合谐振器，构成的高效率注入锁定振荡器。通过注入对应输出功率 1/1000 的小信号，锁定带宽为 2.0 MHz，实现高效率及高功率。搭建的高效率振荡器在 2.45 GHz 可以实现 203 W 的输出功率和 54.18% 的效率。相对于传统的大功率微波源，基于注入锁定技术高效的 MOSFET 振荡器，成本低、工作电压低、相位和频率可控性有明显优势，更有利于实现微波化学实验中的均匀加热以及精确的温度控制。

参　考　文　献

[1] 朱程，杨金生，李会成，等. 30 kW 连续波磁控管的研制[J]. 真空电子技术，2013(05)：115－116.

[2] Werner K. RF Energy Systems：Realizing New Applications[J]. Microwave J，2015，58(12)：22－34.

[3] Yakovlev V V. Computer Modeling in the Development of Mechanisms of Control over Microwave Heating in Solid-State Energy Systems[C]. AMPERE Newsletter，2016：18－21.

[4] Yakovlev V V. Frequency Control over the Heating Patterns in a Solid-State Dual-Source Microwave Oven[C]. 2015 IEEE MTT-S Int. Mcrow Symp Dig，2015：978－1－4799－8275－2/15.

[5] Shi T，Li K. High Power Solid-State Oscillator for Microwave Oven Applications[C]. 2012 IEEE MTT-S Int Microw Symp Dig，2012：978－1－4673－1088－8/12.

[6] Shi T，Li K. High Power Solid-State DRO with Power Booster[C]. 2012 European Microwave Integrated Circuits Conference，2012.

[7] Kim S H，Kim H J，Choi J J. Combined Power Oscillator using GaN HEMT[C]. 2011 IEEE MTT-S Int Microw Symp Dig.，2011：978－1－61284－757－3/11.

[8] 霍飞向，刘征宇，黄何平，等. S 波段 1kW 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(02)：77－80＋87.

[9] Ikeda H. 1.2 kW Power Combiner Unit using Phase Control for 2.4 GHz Band[C]. 2015 IEEE IMFEDK，2015.

收稿日期：2017－12－21

（下转第 51 页）

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3 结论

本文研究了微波频率和微波功率对等离子体相关参数的影响。通过多物理场计算，得出了在相同微波功率下，2450 MHz 微波等离子体比 915 MHz 微波等离子体具有更大的电子密度，更高的电子温度和气体温度，其中微波频率对电子温度的影响最小。同时，三种参数都会随着微波功率的增大而有所提升，其中电子密度受微波功率的影响最大。最后对不同微波功率下等离子体的火焰长度进行了测量，发现微波功率对其几乎没有影响。

参 考 文 献

[1] 赵青，刘述章，童洪辉，等. 离子体技术及应用[M]. 北京：国防工业出版社，2008：103.

[2] 刘南，刘淼，刘小雪，等. 用微波等离子体处理污染物[J]. 吉林大学学报(理学版)，2009，(6)：1339－1342.

[3] 张起凯，张文秀，李佳慧，等. 微波等离子体炬原子发射光谱法测定原油中钒[J]. 化学研究与应用，2015，(7)：1078－1081.

[4] 涂昕，满卫东，游志，等. 微波等离子体化学气相沉积法制备石墨烯的研究进展[J]. 真空与低温，2014，(2)：63－70.

[5] 菅井秀郎. 等离子体电子工程[M]. 北京：科学出版社，2002：34.

[6] Wei Xiao，Kama Huang，Wencong Zhang，*et al*. Modeling of Argon Plasma Excited by Microwave at Atmospheric Pressure in Ridged Waveguide[J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2016，44(7)：1075－1082.

收稿日期：2017－12－21

作者简介：

肖玮(1994－)，男，博士研究生，从事微波等离子体源及其相关应用方面的研究；Email：wei_xiao_scu@163.com。

周宇(1990－)，男，2016 年于四川大学获工学博士学位，现在广东美的厨房电器制造有限公司任研究工程师，主要从事材料领域研究；Email：yu6.zhou@midea.com.cn；Tel：0757－23274555。

(上接第 44 页)

作者简介：

杨梦琳(1993－)，女，硕士研究生，主要研究领域微波电路，Email：v1ck7@vip.qq.com。

刘长军(1973－)，男，博士生导师，主要研究领域电磁场与微波技术，Email：cjliu@scu.edu.cn。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net