

射频电源研究综述

马梅彦

(北京市电子科技情报研究所 北京 100009)

摘要: 射频电源是可以产生固定频率的正弦波、具有一定频率的高频电源,主要由射频信号源、射频功率放大器及阻抗匹配器组成,射频电源作为等离子体配套电源,广泛应用于半导体工艺设备、LED与太阳能光伏行业、科学实验中的等离子体发生、射频感应加热、医疗美容及常压等离子体消毒清洗等领域。本文梳理了国内外射频电源发展现状,重点分析电子管射频电源及晶体管射频电源的发展历程及主要技术区别,并详述国内外射频信号源、射频功率放大器及阻抗匹配器技术发展。在此基础上,对我国射频电源的发展提出合理性的建议。

关键词: 射频电源;射频信号源;功率放大器;阻抗匹配器

中图分类号: TN86 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Overview of research on RF power supply

Ma Meiyuan

(Beijing Institute of Electronic Information, Beijing 100009)

Abstract: RF power can generate a fixed frequency sine wave, high frequency power supply with a certain frequency, consisted of RF signal source, RF power amplifier and impedance matching device. The RF power as the plasma power supply, widely used in semiconductor processing equipment, LED and solar photovoltaic industry, plasma in scientific experiments, RF induction heating, plasma cleaning and disinfection of medical beauty and other fields. The RF power amplifier is the core of the RF power. This paper reviews the development status of domestic and foreign RF power, focus on analysis of the development of the RF power supply and RF power transistors and main technical differences, and on the domestic and foreign RF signal source, RF power amplifier and impedance matching development technology. On this basis, put forward suggestions on the rationality of the development of China's radio frequency power supply.

Keywords: RF power; RF signal source; power amplifier; impedance matching device

1 引言

射频电源是可以产生固定频率的正弦波、具有一定频率的高频电源,主要由射频信号源、射频功率放大器及阻抗匹配器组成,是等离子体配套电源。射频功率放大器被认为是射频电源的核心,因此射频功率放大器是制约射频电源发展的关键因素。射频电源由20世纪80年代的电子管射频电源发展到现在的晶体管射频电源,经历了漫长的发展过程。功率由瓦、百瓦、千瓦、到兆瓦,频率有2、13.56、27.12、40.68 MHz等。目前射频电源被广泛应用于半导体工艺设备、LED与太阳能光伏行业、科学实验中的等离子体发生、射频感应加热、医疗美容及常压等离子体消毒清洗等领域。

2 国内外射频电源的发展现状

射频电源根据采用的功率放大器类型不同,可分为电子管射频电源与晶体管射频电源(又称为全固态射频电源)。

射频功率放大器的发展较为缓慢,直到1904年电子管的出现,才开始被正式应用于各领域^[1],这是因为电子管从根本上解决了射频功率放大器的器件问题。但是电子管本身存在很多问题:首先它的体积非常大,在某些精密领域限制了电子管射频电源的应用;其次电子管射频电源的寿命还不到晶体管射频电源的一半,最重要的是它的制造工艺非常复杂,因此随着晶体管的发展,电子管逐渐被淘汰。同电子管相比,晶体管射频电源的体积要小很多,同时它的损耗低,寿命长,产生很少的热量。电子管射频电源和晶体管射频电源在性能上的区别如表1所示^[2]。

表 1 电子管射频电源与晶体管射频电源的性能区别

序号	指标	电子管射频电源	晶体管射频电源
1	稳定性	强	差
2	输出功率	大	小
3	寿命	寿命低:1 000~ 2 000 h	寿命高> 5 000 h
4	转换效率	低	>80%
5	反射功率	能承受较大反 射功率	对反射功率比 较敏感
6	体积	体积比较大不 利于小型化	体积小利于小 型化
7	热量	多	少

目前国外的射频电源功率放大器大多为晶体管,代表公司有美国 Comdel 公司及 AE 公司。Comdel 公司生产的射频电源,频率范围由 20 kHz~2 MHz,主要应用于半导体、平板显示器及工业加热等。而 AE 公司的射频电源产品,主要由可变频率发生器构成,采用半桥、D 类型放大器理念,设计为空冷式紧凑型,主要应用于溅射、等离子蚀刻、化学气象沉积、聚合以及表面处理。目前进口射频电源的价格昂贵,是国产射频电源的好几倍,同时与国产系统整合存在一定难度,难以实现生产的自动控制,并且进口射频电源维修和售后存在一定难度。

我国射频电源技术与国外相比还很落后,核心技术还没有掌握。目前我国使用的射频电源功率放大器大多为电子管,只有少数厂家生产的使用晶体管功率放大器,并且生产厂家数量也不多。

2.1 射频信号源

射频信号源主要用于射频与微波系统的测量、校准、试验及维护,尤其在无线电测量和通信领域。目前在空间通信、卫星导航,雷达测量等先进的电子系统中,对射频信号源的要求也越来越高。

目前,射频信号源的合成技术主要有 4 种即:直接频率合成(DS)技术、锁相频率合成(PLL)技术和直接数字频率合成(DDS)技术,PLL/DDS 混合频率合成技术。这 4 种技术的主要特点^[3]如表 2 所示。

表 2 不同频率合成技术主要特点

类型	相位 噪声	杂散 抑制	频率 步进	工作 频率	捷变 速度	调谐 能力	体积 重量	成本
DS	很好	较难	较大	高	快	有限	大	高
PLL	好	较易	较小	高	慢	有限	较小	较高
DDS	好	很难	很小	低	快	方便	小	较低
混合	好	较易	很小	高	快	方便	小	较低

DS 技术以晶体振荡器作为基准信号源,经过倍频、分

频、混频等途径直接产生离散频率的输出信号,因此也被称为第一代的频率合成技术。DS 技术具有相位噪声低、频率切换速度快等优点,但其缺点也非常明显,如体积大、电路结构复杂、成本高,易受混频/倍频电路的影响,且杂波干扰难以抑制。

PLL 技术是以参考频率源作为信号源,通过谐波发生器进行混频、分频并产生谐波或组合频率,然后利用锁相环,把压控振荡器的频率锁定在某一谐波或组合频率上,由压控振荡器间接产生所需输出频率。PLL 技术又被称为第二代的频率合成技术,PLL 技术具有相位噪声低、杂散性能好等优点,但频率转变速度较慢^[4]。

DDS 技术是采用数字采样存储技术从相位的概念出发进行频率合成,也被称为第三代的频率合成技术。DDS 技术具有可编程及全数字化结构,便于集成,此外其较宽的相对带宽及较高的频率分辨率,同时它的频率转换时间较短、可以连续输出相位及宽带正交信号。目前 DDS 技术已经广泛应用于通信领域、雷达领域、电子对抗领域及仪器仪表领域等^[5]。但是 DDS 的全数字结构,存在两个明显的缺点,即输出杂散较大和输出带宽受限,这限制了 DDS 的发展及应用,目前国内外学者已把这两个因素作为研究的重点。

目前,射频信号源已经被许多国内外仪器厂商当作一种产品进行销售,如美国 National Semiconductor 及 ADI 公司的频率合成器^[6]。与我国的射频信号源相比,国外的射频信号源的通用性好,且各项指标也很高,但是其价格过于昂贵,限制了射频信号源在我国的应用。

在我国,射频信号源的商用化进程还比较慢。目前还停留在研究阶段,研究重点多是在频率合成上,频率合成技术主要为 DDS、PLL 与混合频率合成技术^[7-8]。

关于射频信号源的合成技术,我国主要进行了以下几个方面的研究:1)低杂散频率合成技术,如电子科技大学针对 DDS 的输出杂散的问题,进行了阵列 DDS 的技术无和相位截断 DDS 技术的研究^[9-10];2)宽带频率合成技术:在实际应用中,DDS 直接输出的最高频率仅到参考频率的 40%,远远低于标准值采样频率的 1/2,因此通常需要将 DDS 的输出与锁相环输出进行混频以得到高频信号。目前,也有一些对于新结构的研究,主要是直接利用 DDS 输出高频信号的方法,如利用在第一奈奎斯特区以外的输出、采用并行输出等^[11-12]。3)微波频率合成,目前国内许多高校都在进行微波频率合成技术的研究,例如东南大学主要进行 PLL 合成技术的研究,而中国电子科技大学及西安电子科技大学则在进行 DDS 和 PLL 混合频率合成技术的研究^[13-15]。

2.2 射频功率放大器

到 20 世纪第二次世界大战期间首次提出功率放大器的概念,当时以为雷达的出现对射频信号提出更高的需求^[16]。射频放大器生产之初主要采用真空电子管。发展

至今,电子管由于其性能上的限制已逐渐被淘汰,而晶体管由于其优异的性能已被广泛研究及应用,目前已成为射频功率放大器的核心器件。

射频功率放大器主要实现信号的传输,并实现一定程度的信号的放大,其本质是将直流功率转化为交流功率。射频功率放大器是制约通信技术和电子技术发展的关键因素,随着人们对通信及电子技术需求的不断提高,射频功率放大器必将飞速发展,尤其是高频率的功率放大器已经成为当前研究的热点,主要是功率放大器的频率越高,输出功率越高,并且效率和可靠性也越高。

射频功率放大器的分类方式繁多,有以下几种^[17]:

1)根据制作工艺的不同,晶体管功率放大器的可以分为基于硅双极型工艺的晶体管(BJT)和场效应管(FET)。

2)按照晶体管的制作材料的不同,射频功率放大器可以分为第一代晶体管功率放大器、第二代晶体管功率放大器及第三代晶体管功率放大器:

以 Si 为主要材料的第一代晶体管功率放大器,其主要优点是价格低廉,且容易获得,缺点是功率密度低,易被电击,耐压低等,因此限制了其在某些方面的应用。

以 GaAs、InP 为主要材料的第二代晶体管功率放大器,与第一代功率放大器材料相比,具有更高的迁移率及更宽的禁带。

以 GaN、SiC 材料为主要材料的第三代晶体管功率放大器。与第二代功率放大器材料相比,具有更高的功率密度,更高的电子迁移率及更好的开关特性,目前已被广泛的应用于开关管功率放大器的设计。

表 3 不同材料晶体管功率放大器的主要特点

名称	材料	特点
第一代	Si	价格低、功率密度低、耐压低
第二代	GaAs、InP	迁移率高、禁带宽
第三代	GaN、SiC	功率密度高、电子迁移率高、开关特性好

3)根据元件集成度不同,射频功率放大器可分为单片集成放大器和晶体管分离元件放大器。单片集成放大器是在一块很小的 GaAs 为衬底的芯片上面集成输入输出匹配网络、直流偏置电路以及放大管管芯等,因此它具有体积小、重量轻、可靠性高、成木低等优点。晶体管分离元件放大器主要作用是把匹配网络、管芯、偏置电路分开,而单独的晶体管只是管芯加了一个封装,不包含其他电路。与单片集成放大器相比,晶体管分离元件放大器可以输出更大的功率,但是它的体积较大,使用时必须自行设计匹配网络和设置静态工作点。因此一般多用于地面基站的大功率发射机的末级。

4)从放大器的工作状态可以分为 6 类:即 A 类、AB 类、B 类、C 类、E 类和 F 类,E 类和 F 类主要应用于开关状

态的工作。其中线性度最好的是 A 类功率放大器的,其次是 AB 类,而其他 4 类的则具有更高的效率。因此对线性化程度要求高时,一般采用 A 类或 AB 类工作状态,对效率要求高时,可采用 B 类、C 类、E 类或 F 类。对不同的应用场景选择不同的设计方式,具体要根据放大器的各项指标综合考虑,如效率、线性度、输出功率、工作频率范围等要求,选择合适的器件类型及电路形式。

目前射频技术和射频器件是制约射频功率放大器发展的主要因素。尤其是近几年,射频功率放大器随着射频技术的发展在不断进步,同时射频器件的不断完善也推动了射频功率放大器的发展。

1)射频技术方面:非线性一直以来都被认为是高功率放大器设计中难以攻克的技术难题。随着 DSP 技术和微处理控制技术的出现和发展,该技术难题基本已被解决,从而使得各种功率放大器线性化技术被广泛使用。

2)射频器件方面^[18]:射频器件的发展起源于 20 世纪 40 年代,1948 年 Shockley、Bardeen 等人发明双极晶体管(BJT),1952 年结型场效应管(JFET)被提出,自此硅双极晶体管开始正式应用于射频微波领域。70 年代以后,以 GaAs 为主材料的晶体管研制成功,这种射频功率放大器具有高频率、低噪声、大功率等一系列优点,主要是由于 GaAs 材料具有载流子迁移率高、禁带宽度大等优点。自 20 世纪 80 年代开始,以 AlGaAs/GaAs 或 InP/InGaAs 为材料构成的异质结双极晶体管(HBT)相续研制成功,从而使得功率放大器的工作频率达到毫米波频段。到 20 世纪 90 年代,多种新材料如 InP、SiC 及 CaN 相继被发现,并开始被广泛使用在射频功率放大器上,这些材料具有化学性质稳定、击穿电压高、电子运动速度快等特点,从而被认为是制作宽带、大功率放大器的理想材料。

3)电路设计方面:随着半导体技术及电子技术的不断发展,不少公司开始利用计算机技术进行射频电路的设计,从而导致国内外的很多公司进行射频微波电路仿真软件的研究,其在进行射频电路的仿真与设计主要采用的是 CAD 技术。目前,很多公司已开发出射频微波电路仿真软件。

我国的射频功率放大器的研究起步较晚,与国外相比,在理论研究上还处在初级阶段,而器件工艺和系统整体方面也都相对落后。当前,很多高频率、高功率、高效率的射频功率放大器禁止出口中国,这是因为军工产品禁运限制等因素的影响。而功率放大器在卫星导航、航天科技、通信领域等方面都有着巨大的作用,因此,我国正在致力于射频功率放大器的研究,而突破国外厂商技术封锁的唯一途径必须要掌握射频电路设计核心技术,提高半导体设计工艺及生产。当下我国对于高精密设备的设计和生产越来越重视,在政策方面,2006 年国务院颁布了《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》,明确提出“核高基”重大专项发展计划,并排在了 16 个重大专项中的第一位,被业内称为“01 专项”。2016 年“十三五”国家科技创新规

划》中“核高基”被定为国家科技重大专项。

2.3 阻抗匹配器

阻抗匹配反映了输入电路与输出电路之间的功率传输关系,是无线电技术中常见的一种工作状态。阻抗匹配主要用于信号或能量的传输,使所有微波信号皆能传送到负载点,不会有信号或能量反射回来,从而提升传输效益。可以说,阻抗匹配的目的就是为了保证信号或能量有效地从“信号源”传送到“负载”。

目前阻抗匹配常用的方式有两种:一种是传输线匹配,即射频源内阻、负载和传输线的特征阻抗三者相等;一种是共扼匹配,即负载阻抗等于信源内阻抗的共扼值,且它们的模相等而辐角之和为 $0^{[1]}$ 。

阻抗自动匹配器的主要功能是实时跟踪负载阻抗变化,保障射频功率源和负载之间一直处于阻抗匹配状态,使得射频功率源输出的功率能被负载全部吸收,从而提高系统的效率及稳定性能。

阻抗自动匹配器的理论早在 20 世纪 70 年代就被提出^[19]。利用阻抗自动匹配器可以加工高精度的半导体产品,但是由于当时软硬件技术水平有限,自动阻抗匹配器并没有在工业应用中得以实现。直到近年来,随着自动化技术、通信技术和计算机技术的不断发展,以及智能仪器和设备的进步,自动阻抗匹配器才逐渐在射频电源中得到应用。

我国阻抗匹配器的发展较为落后,目前只能生产手动调节的阻抗匹配器。与自动阻抗匹配器相比,阻抗手动匹配器只能依靠使用者凭经验进行调节,匹配精度低,匹配时间长,这主要是因为手动阻抗匹配器易受周围环境温度等因素的影响,从而导致负载特性会发生很大的变化,使得等离子体的特性发生波动,当等离子体应用于高精度半导体加工工艺中时,这种波动往往是非常致命的,因此手动调节的阻抗匹配器制约了等离子体的应用^[20]。

随着等射频电源逐步完善的发展,阻抗匹配器也在不断的发展。阻抗自动匹配器可以实现自动匹配控制,有助于工业自动化的发展,未来必将取代落后的阻抗手动匹配器。

3 结 论

目前我国先进的等离子体设备使用的射频电源,与国外同类电源相比还存在一定差距,要赶超上国际水平,还需要做很多工作:

1) 目前我国的射频电源采用大多是电子管或电子管、晶体管混合电路,体积较大,限制了它的应用。并且使用的晶体管大多为国外进口,因此,需要研制我国自主核心的晶体管,研制新技术、新元器件,使射频电源小型化。

2) 目前我国使用的还是阻抗手动匹配器,容易受环境因素的影响,而国外已开始使用阻抗自动匹配器,在工业自动化领域发挥着重要的作用,因此,高精度、高速度的阻抗自动匹配器是未来发展的必然趋势。

3) 与国外射频电源相比,我国射频电源种类较为单一,今后还应该进行宽频带电源、微波电源、高功率射频电源等不同类型射频电源的研制。

参考文献

- [1] 王亮. 射频电源与阻抗自动匹配技术研究[D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2010.
- [2] 秦威. 全固态射频电源系统的分析与研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2010.
- [3] STEVE W. JOE C. Newnes radio and RF engineering pocket book [M]. 3rd Ed. Oxford: Elsevier Science Linacre House,2002.
- [4] 邹尔宁,谢忠屏. 直接数字频率合成低频信号源的设计与实现[J]. 自动化仪表,2011,32(3): 61-63.
- [5] 石雄. 直接数字频率合成技术的研究与应用[D]. 武汉:华中科技大学,2007.
- [6] 王兵. 频率合成技术发展浅析[J]. 电子信息对抗技术,2009(24):74-77.
- [7] 周晗. 多制式射频信号源关键技术研究[D]. 长沙:国防科技大学,2012.
- [8] 李胜寅. 宽带低相噪频率合成技术研究[D]. 太原:中北大学,2013.
- [9] 徐锐敏,姚鸿飞,蔡竞业. 低相噪全相参毫米波频率合成源研究[J]. 红外与毫米波学报,2007(7): 222-231.
- [10] 黄仙兵. 基于 FPGA 的低杂散 DDS 技术的研究[D]. 成都:电子科技大学,2010.
- [11] 吴永洪. 低杂散、捷变频频率合成技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
- [12] 吴秀山. 无线通信用频率合成器的研究与设计[D]. 南京:东南大学,2009.
- [13] 席安安. 低相噪多模式毫米波频率合成技术研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [14] 陈墨. D 波段与 F 波段锁相频率合成技术研究[D]. 南京:东南大学,2009.
- [15] 吴永洪. 低杂散、捷变频频率合成技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2008.
- [16] 栾冰. 射频功率放大器的研究与设计[D]. 北京邮电大学,2014.
- [17] 李文广. 射频功率放大器的研究与设计[D]. 华中科技大学,2006.
- [18] STEVE C. RF power amplifiers for wireless communications [M]. Boston: Artech House Inc,1999.
- [19] 刘东宇. 自动阻抗匹配器检测电路设计及匹配算法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2010.
- [20] 钱玉良. 自动阻抗匹配器驱动程序设计及匹配算法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2009.

作者简介

马梅彦,1984 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电子信息领域。

E-mail:mameiyan.love@163.com