

# 射频等离子工艺设备中的自动阻抗匹配技术

赵英伟, 张文雅, 郝晓亮

(中国电子科技集团公司第十三研究所, 河北 石家庄 050051)

**摘要:** 介绍了射频阻抗匹配的基本原理和常见的匹配网络类型, 以串并联电容组成的  $\Gamma$  型匹配网络为例, 利用史密斯圆图, 阐述了阻抗匹配的工作原理。介绍射频等离子技术在微电子工艺设备中的应用。给出了自动匹配网络的检测电路、电机驱动电路和控制电路, 提出了优化自动阻抗匹配能力的方法。

**关键词:** 等离子; 自动阻抗匹配; 射频; 相位; 幅度

中图分类号: TN405

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.200439

中文引用格式: 赵英伟, 张文雅, 郝晓亮. 射频等离子工艺设备中的自动阻抗匹配技术 [J]. 电子技术应用, 2020, 46(10): 61-63, 78.

英文引用格式: Zhao Yingwei, Zhang Wenya, Hao Xiaoliang. The impedance automatch method in radiofrequency plasma processing equipment[J]. Application of Electronic Technique, 2020, 46(10): 61-63, 78.

## The impedance automatch method in radiofrequency plasma processing equipment

Zhao Yingwei, Zhang Wenya, Hao Xiaoliang

(The 13th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** The basic principle of RF impedance matching and some matching network types are introduced. A  $\Gamma$  type matching network composed of series and parallel capacitors is taken as an example to explain the principle of impedance matching by using Smith chart. The application of RF plasma technology in microelectronic process equipment is introduced. The detection circuit, motor drive circuit and control circuit are introduced. A method to optimize automatic matching ability is proposed.

**Key words:** plasma; automatch; RF; phase; magenitude

### 0 引言

等离子体被称为物质的第四态。等离子体加工技术在薄膜制备、清洗等微电子工艺设备中有广泛的应用。射频经过匹配网络后, 加到真空室里面反应气体电离产生等离子体。由于腔室压力、气体流量等工艺参数的变化, 其等效负载阻抗会发生波动, 造成阻抗失配, 反射功率增大。反射功率会返回到射频源内部, 变成热量损耗, 也会在传输线上产生驻波高压, 容易损坏射频源内部器件, 严重时造成辉光不稳定, 影响加工产品的性能。随着技术进步和产品升级, 在工艺上对等离子体的稳定性和阻抗匹配的快速性等要求越来越高, 因此良好的自动阻抗匹配网络显得尤其重要。

### 1 阻抗匹配与最大功率传输

在射频电路中, 为了使传输线路中没有反射信号, 负载得到最大功率, 要求负载阻抗与传输线阻抗相匹配; 为实现射频源最大功率输出, 则要求射频源阻抗与传输线阻抗匹配。利用自动匹配网络可以实现从射频源到负载的阻抗匹配。

假设射频源等效阻抗  $Z_s=R_s+jX_s$ , 负载阻抗  $Z_L=R_L+jX_L$ , 经过数学计算可知, 实现最大功率传输的条件为: 负载阻抗和射频源阻抗共轭匹配,  $Z_L=Z_s^*$ , 即:  $R_s=R_L, X_L=-X_s$ 。

射频源的频率通常为 13.56 MHz, 输出阻抗为  $50\ \Omega$ 。因此需要通过匹配网络, 将负载端等效阻抗的实部调整为  $50\ \Omega$ , 虚部调整为 0。

### 2 阻抗匹配网络常见类型

实现阻抗匹配的方式有多种, 应用最多的是利用电感与电容元件的串并联组合来实现。根据连接方式不同, 常见的类型主要有  $\Gamma$  型网络、 $\pi$  型网络、T 型网络。其中  $\Gamma$  型网络为双元件匹配网络, T 型网络和  $\pi$  型网络为三元件匹配网络。

网络类型不同, 特点不同, 其适用的阻抗匹配范围也不同<sup>[1]</sup>, 而且元件的阻抗调节范围有最小值和最大值, 因此一个匹配网络不可能实现全范围内的阻抗变换, 要根据负载阻抗的特点合理选用匹配网络类型。

由于可调电容比可调电感更容易实现, 设备中最常见的阻抗匹配网络是采用双可调电容的  $\Gamma$  型网络或倒  $\Gamma$  型网络, 如图 1 所示。

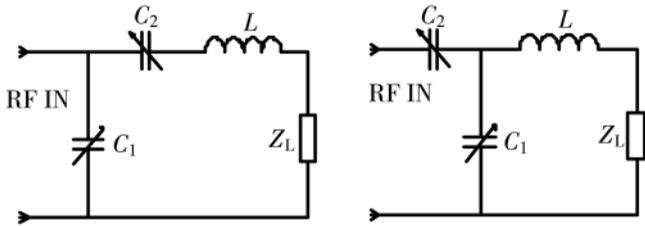


图1 双可调电容构成的两种阻抗匹配网络

### 3 史密斯圆图

史密斯圆图是一个有用的图解工具,利用它的变化规律可以帮助理解匹配网络的工作原理。

$\Gamma = -Z_L$  为负载阻抗,用传输线特性阻抗  $Z_0 = 50 \Omega$  进行归一化,得到归一化负载阻抗  $z = Z_L/Z_0$  后,反射系数  $\Gamma$ ,也就是 S 参数里的  $S_{11}$  可以由式(1)表达。

$$\Gamma = \frac{V_{ref}}{V_{inc}} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{z - 1}{z + 1} \quad (1)$$

史密斯圆图中的每一个点代表一个归一化阻抗值,阻抗的实部可以由所在的等电阻圆读出,虚部由所在的等电抗圆读出。同时这个点对应了该阻抗下的反射系数。

阻抗匹配的目的在于将负载阻抗  $Z_L$  变化到归一化信号源阻抗  $Z_S$  的共轭值  $Z_S^*$  处。当  $Z_S = 50 \Omega$  时,  $Z_S^*$  的位置,就是  $z = 1$  位置,即史密斯圆图的中心点处,此处反射系数  $\Gamma = 0$ 。

负载通过串并联方式连接电感或者电容后,阻抗在史密斯圆图上位置会发生移动,如图 2 所示。

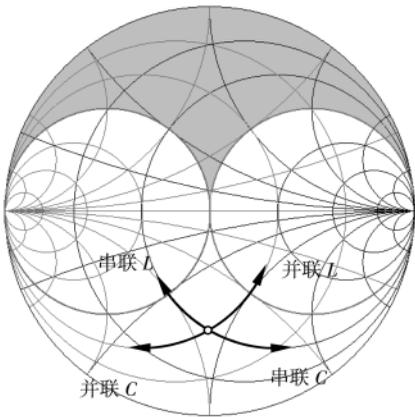


图2 串并联电容电感对负载阻抗变化的影响

串联  $L$  后,  $z$  沿着等电阻圆顺时针方向移动;串联  $C$  后,沿着等电阻圆逆时针方向移动;并联  $C$  后,沿着等电导圆顺时针方向移动;并联  $L$  后,沿着等电导圆逆时针方向移动。

因此,采用不同的元件和不同的匹配网络结构,在史密斯圆图上的阻抗调节范围会不同。串联电容和并联电容构成的  $\Gamma$  型网络,调节范围只能在图 2 所示上半部分的阴影区域。如果负载阻抗超出这

个区域,则不能采用该类型匹配网络进行阻抗匹配。

半导体设备中负载类型主要有两种:容性负载(平板上下电极)和感性负载(螺旋线圈)。

有时,对于平板电极的容性阻抗,由于设备老化等原因,其负载阻抗变化范围会超出可匹配区域。如图 3 所示,假设变化后的负载阻抗在图中的 A 点所在阴影区域,这种情况下可以串联一个固定电感线圈  $L$  作为补偿元件,将负载阻抗变化范围沿着虚线所在的等电阻圆顺时针旋转到上半部分 B 点所在区域,进入阻抗匹配可调节的范围。补偿电感  $L$  的值可以计算得出<sup>[2]</sup>。

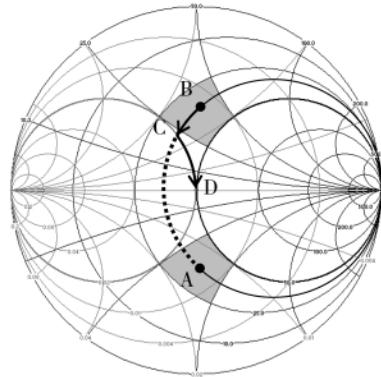


图3 阻抗匹配范围调整示意图

当负载阻抗  $Z_L$  进入可匹配范围后,即可正常进行阻抗匹配。假设  $Z_L$  在史密斯圆图上 B 点,先沿等电阻圆逆时针将  $Z_L$  移动到等电导圆  $g=1$  处(C 点),然后沿该等电导圆顺时针旋转到史密斯圆图的中心点  $z=1$  处(D 点),此处反射功率为零。从电路硬件上分析,就是先调节串联电容  $C_2$ ,改变阻抗的虚部,再调节并联电容  $C_1$ ,调整阻抗实部,直到完成阻抗匹配。在实际应用中,为了提高匹配速度,  $C_1$  和  $C_2$  也可以独立地同时向目标方向调整。

### 4 自动匹配网络的构成

阻抗自动匹配的算法主要有两类:一类是利用反射系数的幅度比和相位差信号进行自动调节;另一类是利用神经网络和遗传算法等人工智能算法来实现。实践中多采用前者,其组成结构图如图 4 所示。

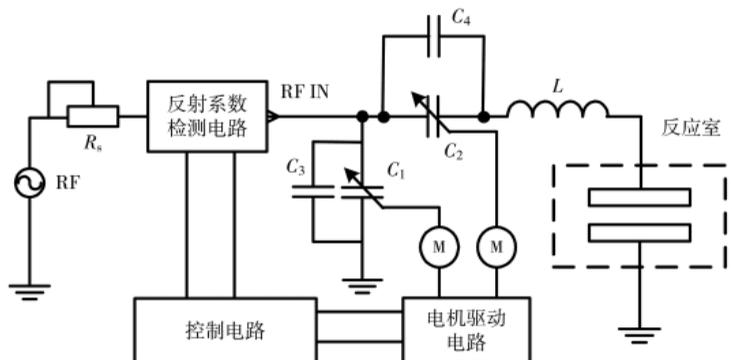


图4 常用的阻抗匹配组成结构示意图

# 微电子技术

Microelectronic Technology

## 4.1 相位和幅度信号检测电路

检测电路将实时监测任意时刻,在同轴电缆上从射频源到匹配网络的射频电流和电压信号,生成相位差信号和幅度比信号。

由相位差和幅度比能够计算得出反射系数,所以这两个检测信号可以用来调节电容,实现阻抗匹配。

在一些文章中,常基于 AD8302 幅相测量模块,采用定向耦合器检测传输线上的信号,提取入射电压和反射电压送至 AD8302 的输入端,得到反射系数的幅度和相位信息<sup>[3]</sup>。由于 AD8302 本身是一个有源器件,需要外接电源,电路比较复杂。

本文给出一种简单的检测电路,如图 5 所示,通过定向耦合器,用罗氏线圈(Rogowski Coil)检测电流信号,电容分压器检测并变换电压信号,经过分立元件检波、滤波生成幅度比和相位差信号,以直流电压形式输出。电路简单,并且可以通过可调电位器进行零点校准。

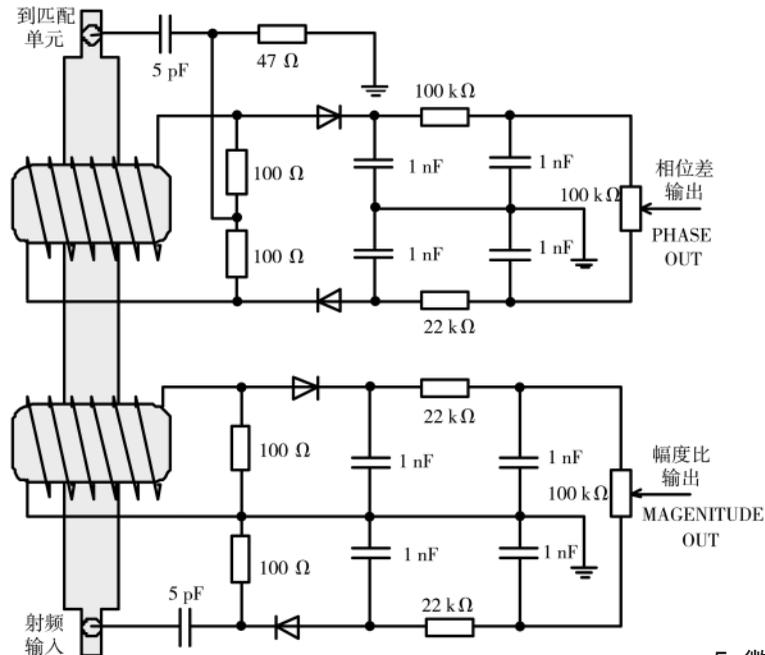


图 5 入射和反射功率检测电路

## 4.2 匹配的电容控制和驱动

电容可采用真空电容或者空气电容。低功率时可以采用风冷,高功率采用水冷方式。驱动电机常采用分立电路、驱动集成块等方式。使用可调电位器或者编码器作为电容位置反馈元件。同时增加限位保护,经过比较电路,输出上下限报警信号,防止超极限转动,损坏电容。

图 6 是一个串联调节电容的控制原理框图,并联调节电容的控制框图与此相似。图中 ADG211、ZTX450 用来切断对应的控制信号。

自动调节功能:打开射频后,利用检测电路输出的相位差和幅度比信号,自动调节电容位置,实现自动阻抗匹配。采用相位差信号控制串联电容  $C_2$ ,改变负载阻

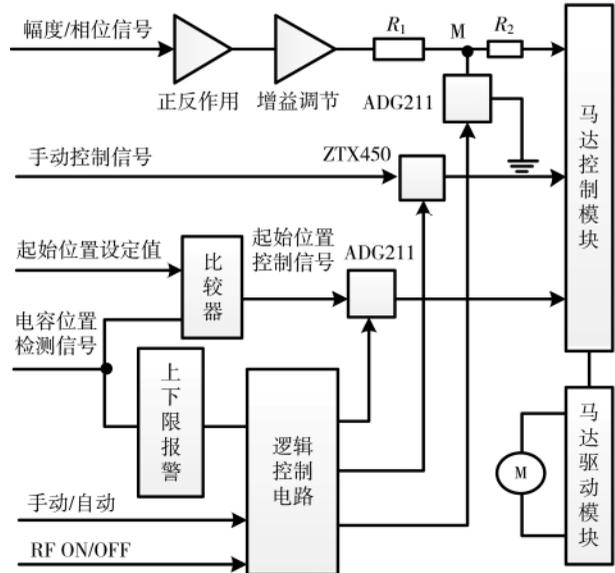


图 6 匹配网络控制电路功能框图

抗的虚部;采用幅度比信号控制并联电容  $C_1$ ,改变负载阻抗的实部。图中的 M 点电压可以用来校准自动匹配的精度。

手动调节功能:根据反射功率大小,手动控制电容正转或反转,根据经验进行阻抗匹配。可以在故障检修,或者在特殊工艺条件下使用。

电容位置预置功能:在打开射频之前,电容提前移动到预置位置,即上次匹配良好时所对应的位置,这样在下次匹配时,快速完成调节,迅速降低反射功率。如果采用计算机控制,可以针对每个不同工艺,储存多个不同预置位置,以实现快速精确的匹配,提高产品性能。

目前越来越多地采用 PLC、CAN 网络通信技术进行自动匹配控制,电路更简单,控制算法更灵活,功能更强大。不足之处是实时控制,需要占用设备 CPU 的运算资源。

## 5 微电子设备中常见的射频结构

在反应离子刻蚀机(RIE)中射频直接加到平板下电极。在气体增强型化学气相沉积台(PECVD)中为避免气体离子向下的轰击作用,而将射频加到上电极。

有的 PECVD 配有高频和低频两个射频源:低频源频率为几十千赫兹,一般采用脉冲方式加载射频功率,用来调整等离子体密度,改善生成的薄膜的张力。低频源的匹配常常比较简单,采用手动调节电感来完成。在感应耦合等离子刻蚀机(ICP)中为了增强等离子体的能量,加大物理轰击效果,除下电极加入射频功率外,一般在腔体上部安装电感线圈,加入另外一路射频,在腔体内感应耦合产生螺旋运动的等离子。两路射频源独立进行阻抗匹配。

(下转第 78 页)

# 通信与网络 Communication and Network

specifications[S].2012.

[2] ECMA International. Standard ECMA-398, close proximity electric induction wireless communications[S].2011.

[3] 吴湛击. 无线通信新协议与新算法[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

[4] 陈磊, 谈振辉. 基于优先级和休眠机制的无线体域网 MAC 协议的能效优化[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.

[5] SARANG S, DRIEBERG M, AWANG A. Muti-priority based QoS MAC protocol for wireless sensor network[C]. 2017 IEEE International Conference on System Engineering and Technology, Shah Alam, Malaysia, 2017.

[6] IEEE Standards Association. IEEE 802.15.6. wireless body area network[S]. 2012.

[7] KIM B S, Fang Yuguang, WONG T F. Rate-adaptive MAC protocol in high-rate personal area networks[C]. 2004 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Atlanta,

GA, USA. 2004.

[8] MathWorks. State flow user's guide[Z]. MATLAB & Simulink. R2013a, 2013.

[9] 夏宇闻, 韩彬. Verilog 数字系统设计教程[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2017.

[10] 丁彬勇, 黄鲁, 白雪飞. 脉冲超宽带通信系统基带单元设计与芯片实现[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.

[11] 米联电子科技有限公司. XILINX ZYNQ 以太网通信篇——基于 MZ7X 系列开发板[Z]. 2018.

(收稿日期: 2020-03-03)

### 作者简介:

汪健(1995-), 男, 硕士, 主要研究方向: 无线通信 MAC 层的设计与实现。

林敏(1974-), 通信作者, 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 无线通信芯片设计、微电子与固体电子学等, E-mail: mlin99@shu.edu.cn。

(上接第 60 页)

### 参考文献

[1] 何嘉辉, 周鹏, 余晖俊, 等. 电磁驱动大尺寸 MEMS 扫描镜的研究[J]. 光子学报, 2017, 46(1): 21-28.

[2] 胡宗恺, 饶志宏. 高精度数字鉴相技术的 FPGA 实现[J]. 通信技术, 2010, 43(12): 177-179.

[3] 许文浩, 屈乐乐, 殷文浩. 基于 FPGA 和 DDS 的频率步进信号源的设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2017(1): 147.

[4] Gu Dawei, Yao Yao, Zhang Dengming, et al. Matlab/Simulink based modeling and simulation of fuzzy PI control for PMSM[J].

Procedia Computer Science, 2020: 166.

[5] 陈媛媛, 刘有耀. FIR 滤波器的 FPGA 设计与实现[J]. 电子设计工程, 2017, 25(24): 65-69, 73.

[6] 安书董, 李明, 王宛人, 等. 基于 FPGA 的低抖动时钟锁相环设计方法[J]. 航空计算技术, 2017, 47(6): 109-111.

(收稿日期: 2020-05-11)

### 作者简介:

董淑豪(1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: MEMS 驱动电路。

吴东岷(1973-), 通信作者, 男, 博士, 研究员, 主要研究方向: MEMS 光学成像系统等, E-mail: dmwu2008@sinano.ac.cn。

(上接第 63 页)

工艺设备可以选择以反射功率或者直流偏压值作为控制目标, 进行射频功率匹配调节。虽然负载形式和结构不同, 但自动匹配原理相似。

## 6 结论

通过研究和试验, 采用本文介绍的射频匹配分析方法, 对相关电路的设计改进, 可以为射频功率匹配设计提供指导, 对设备工艺参数的确定提供较大帮助。

在设备老化, 工作状态发生变化, 或者工艺条件比较极端的情况下, 通过增减旁路电容、补偿电感方法扩大设备匹配能力, 可以提高设备工艺适用性。

通过给不同工艺预置匹配电容位置, 可以提高阻抗匹配速度、精度和稳定性, 降低反射功率, 提高生产效率, 有利于提高产品的工艺性能和质量。

(上接第 72 页)

实现[J]. 航空计算技术, 2013, 43(4): 113-121.

(收稿日期: 2020-02-02)

### 参考文献

[1] 张志. 射频电源自动阻抗匹配器的开发和实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.

[2] 卢慧. 射频阻抗自动匹配方法的研究与实现[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.

[3] 郑珍, 王海, 周渭, 等. AD8302 型相位差测量系统的设计[J]. 电子科技, 2005(11): 48-52.

(收稿日期: 2020-05-31)

### 作者简介:

赵英伟(1971-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

张文雅(1982-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

郝晓亮(1979-), 男, 本科, 高级工程师, 主要研究方向: 半导体工艺设备。

### 作者简介:

马力科(1982-), 通信作者, 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 信号处理平台及嵌入式系统开发, E-mail: mcdona\_cn@163.com。

## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所