

1 半导体射频电源：刻蚀+CVD 工艺的核心，技术壁垒高

1.1

射频电源：半导体工艺控制的核心，半导体零部件国产化最难关卡

什么是射频电源？是用来产生射频电功率的电源。核心作用——通过产生高频电磁

场，将在低压或常压下的气体进行电离、从而形成等离子体。

由于不同气体产生的等离

子体具有不同的化学性能，从而在腔体内部实现不同的工艺需

求。下游应用：射频电源被广泛应用于半导体工艺设备、LED

与太阳能光伏产业、科学

研究、射频感应加热、医疗美容、常压等离子体消毒清洗等领域。工作频率一般处于 2MHz 至 60MHz 之间。

射频电源由五部分组成：输入电路、功率放大电路、阻抗匹配网络、信号检测电路

和控制电路。其中，功率放大和阻抗匹配是技术突破的重难点

。①

输入电路：包括直流供电电源模块+振荡电路模块，作用分别为供电和发出信

号源。核心作用：决定电源最终输出的频率和波形，进而影响系统稳定性。②

功率放大电路：射频电源的核心，是制约射频电源发展的关键因素。由几个

固态晶体管组成。核心作用：振荡电路产生的信号源功率难以达到设备用电

要求，故须进行功率放大，从而使功率达到输出要求，其性能决定了电源系统整体性能。③

阻抗匹配网络：射频传输的效率关键在于阻抗匹配，其目的是保证信号或能

量能有效从“信号源”传送到“负载”。其主要功能是实时跟踪负载阻抗变

化，保障射频电源和负载之间一种处于抗阻匹配状态。核心作用：使得射频

功率源输出的功率能被负载全部吸收，从而提高系统的频率和稳定性能。④

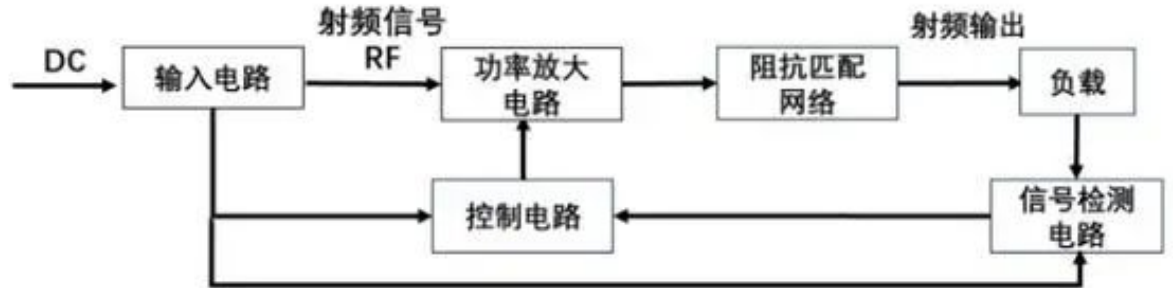
信号检测电路：用于检测射频电源负载的电压电流信号，并传输给控制电路。⑤

控制电路：由脉冲信号发生器和调制驱动电路组成。主要作用：是调制电源

的信号输出，使机器持续稳定工作，实现对射频电源输出功率

的控制。在电路中，功率变化过程为：低频交流电（50Hz/60Hz）—直流电—高频交流电（2MHz 或以上）。

图3: 射频电源结构图: 功率放大、阻抗匹配为核心难点



公众号: 未来智库

核心技术壁垒: 主要在于电源波形、频率和功率性, 以及在腔体中激发的等离子体

浓度、均匀度的精准控制。国内外技术差距主要体现在以下 3 个方面: ①

阻抗的高速匹配。现代工艺中各步骤之间的转换可能导致功率、气体流量和压力

迅速改变, 使等离子体阻抗的急剧变化, 对频率调谐的灵活性和速度提出了更高要

求。一方面需要更快的数据处理能力; 另一方面需要完善数据的收集、处理和传输

系统，为机器学习等算法构建数据库进行分析和预测、客户个性化定制。以 AE 为例，其电源发生器和匹配网络（PowerInsight）可用于收集信息，分析速度和精度的，且无需外部传感器。目前我国仍以手动调节阻抗匹配器为主，易受环境影响，需研制高精度、高速度高精度、高速度的阻抗自动匹配器。②

多频率电源的提供。海外供应的电源系统通常使用 source RF 和 bias RF 两个甚至多个电源，可相对独立控制等离子体密度和离子能量，实现更高的蚀刻速率、更大的工艺自由度，提高良率水平。我国射频电源种类较为单一，宽频带电源、微波电源、高功率射频电源的研发成果尚未普及于生产领域。③

与芯片制造同步革新功能。以刻蚀工艺为例，其对射频电源的要求不仅包括控制精度、功率范围、效率、响应速度等，还需要电源系统配和新功能，如调频、扫频、相位调整、脉冲和电弧管理等。射频电源厂需要与下游设备厂同步革新、研发适配功能。

1.2 应用领域：产生等离子体的核心，作用于半导体 CVD、刻蚀等多道工艺

射频电源是半导体中薄膜沉积、刻蚀、离子注入、清洗等前道工艺机台的关键零部

件之一。射频电源是等离子体发生器配套电源，主要用于在低压或常压气氛中产生等离

子体，其直接关系到腔体中的等离子体浓度、均匀度和稳定性。

1.2.1 薄膜沉积 CVD

中的应用：薄膜沉积质量、沉积速率的关键

CVD

薄膜沉积：是在低气压下辉光放电使反应气体电离，再通入工艺气体，经一

系列化学反应和等离子体反应在基片上表面形成固态薄膜。

射频电源的作用：解离气体产生等离子体。薄膜沉积一般在真空腔中进行，腔内放

置平行且间距若干英寸的托盘。硅片置于托盘上，上电极施加 RF 功率。当原气体流过

气体主机和沉积中部时会产生等离子体，多余的气体通过下面电极的周围排出。射频功

率越大离子轰击能量越大，有利于沉积膜质量的改善。功率增加可增强气体中自由基浓

度，提高沉积速率，当功率增加到一定程度，反应气体完全电离，自由基达到饱和，沉积速率则趋于稳定。

目前 PECVD 主要应用双频电源，由 400kHz 和 13.56MHz 构成，两个电源最大功率均为

3000W。相比于单一电源，高频和低频相结合的双频驱动可以显著地降低启辉电压，

更有利于获得稳定的等离子体源，减弱带电粒子对沉积衬底的轰击及红外芯片的

损伤，提高了工艺自由度。双频电源系统可选工作模式：①

高低频同时作用于反应室，高频为主，低频调制为辅；②

高低频交替作用于反应室，可以快速切换；③

高低频单独作用于反应室，独立控制工作。

1.2.2 刻蚀机中的应用：针对 CCP、ICP

刻蚀，控制等离子体密度和离子能量

等离子体刻蚀：指在低压情况下，反应气体在射频功率的激发下辉光放电形成等离

子。等离子是由带电的电子和离子组成，反应腔体中的气体在电子的撞击下，除了转变

成离子外，还能吸收能力并形成大量的活性基团。活性反应基团和被刻蚀物质表面形成

化学反应并形成挥发性的反应生成物，反应生成物脱离被刻蚀物质表面，并被真空系统

抽出腔体。其中，经常采用的刻蚀气体有氟（F）、氯（Cl）、溴（Br）等卤族元素化合物。

刻蚀按类型分：主要分为干法刻蚀和湿法刻蚀，干法刻蚀覆盖近

90%的市场；干法刻蚀进一步按产生等离子体方法不同：分为电容性等离子体刻蚀（CCP）电感

性等离子体刻蚀（ICP）。其中，射频电源可改变电子密度，轰击离子流量密度，增强各向异性刻蚀。

射频电源在 CCP、ICP 刻蚀中的作用：CCP

工艺中：相互平行放置的电极在射频功率下产生的高频电磁场激发等离子

体。早期配套单一射频电源，高密度离子束流往往伴随高能量，使得在以化学刻蚀为主

的反应中会出现高能离子轰击的负面影响。为了产生高密度且低能量的等离子体，发展出了多频率的 CCP

刻蚀系统，高频电源控制等离子体密度、低频电源控制离子的能量。目前，双频 CCP

主要应用于 SiO_2 等绝缘体介质的刻蚀。ICP

工艺中：射频电流流经线圈，在腔室内产生电磁场激发气体产生等离子体。放电系统通常使用通过 source RF 和 bias RF 两个电源，可相对独立控制等离子体密度和离

子能量，实现更高的蚀刻速率、更大的工艺自由度，提高良率水平。被广泛地应用于集

成电路制造中硅、铝等栅极材料和导电材料的精细刻蚀工艺。

1.2.3

半导体离子注入机中的应用：射频为离子源设计方案的选择之一

半导体离子注入机：在半导体晶圆制造过程中，器件的电学性能取决于半导体掺杂

的杂质浓度，要使导电性能较差的纯净硅变为半导体，需要加入少量杂质改变其结构和

电导率，这个过程就被称为掺杂。离子注入凭借对注入剂量、注入角度、注入深度、横向扩散等方面的精确控制，在半导体制造中占据主导地位。离子注入机由以下部分组成：离子源、质量分离器、束流扫描单元、离子注入室。其中，离子源是离子注入机的源头，用于产生和引出某种元素的离子束。其内部结构可选用磁分析器离子源、射频离子源、冷阴极源和微波离子源作为电源，射频电源可通过真空弧放电能在较低的等离子温度下产生更高的离子束电流，延长离子源的寿命。

1.2.4 半导体清洗中的应用：射频技术应用在等离子清洗当中
等离子清洗：又叫干法清洗，是一种成熟、有效、经济且环保安全的关键表面处理
方法。不采用化学液体的清洗技术，如气相干洗、束流清洗、干冰清洗、紫外-臭氧清洗、等离子清洗等。与传统的湿式清洗方法相比，使用氧等离子体的等离子体清洗能在纳米尺度上消除等离子清洗可产生纯净的表面，为粘接或进一步加工做好准备，且不会产生任何有害废料。湿法清洗在现阶段的微电子清洗工艺中还占据主导地位，但综合考

虑环境污染、原材料消耗及未来发展，干法清洗将逐步取代化学湿法清洗。

射频电源：配合真空系统多次置换气体实现清洗。等离子清洗机主要由真空腔体、RF 等离子电源、真空产生及测量系统、工艺气体系统、控制系统等组成。在实际工艺中，首先进行 N 次置换，将腔体内的空气置换为干净的氦气；然后在真空状态下通入工

艺气体，再打开射频功率源，开始工艺；工艺完成后，再次置换，将腔内残余的有害尾

气置换排出，防止污染净化间，对人体造成伤害。

射频电源激发高频交变电场将气体进行电离，根据气体等离子体不同性质，清洁方

式包括利用紫外线打破表面污染物的大部分有机键；高能氧气等离子体与有机污染物发

生反应，生成水和二氧化碳并在加工过程中不断从腔体中排出（泵走）；使用氦气或氩

气惰性气体清洁易氧化材料，如铜，银等。

2 行业趋势：全球/国内 270/70 亿市场，国产替代开始提速

2.1 市场空间：国内 70

亿元市场，受益新增+存量替换需求驱动

射频电源作为半导体设备的核心零部件之一，伴随半导体

CVD、刻蚀机等核心设

备的市场空间同步成长。新增扩产+存量替换市场需求大。1)

新增需求：射频发生器是射频电源的重要组成部分，据芯谋研究统计，2020 年 射频发生器在晶圆厂零部件采购中占比达

10%，仅次于石英（11%），受益新增扩产需求。2）存量替换需求：射频电源使用寿命约为 5~6 年，短于半导体腔体的使用寿命、需求定期进行维保或更换，部分晶圆厂有直接备存射频电源的需求。

我们通过成本占比法对全球/中国半导体射频电源市场空间进行测算，核心假设：①

半导体设备市场规模：由于全球半导体市场疲软及行业周期性波动，SEMI 预计 2023 年半导体设备全球销售额将从 2022 年的 1074 亿美元减少 18.6%，至 874 亿美元。2024 年将复苏至 1,000 亿美元，同比增长 14.4%，主要因高性能计算和无处不在的连接驱动的长期强劲增长；②

半导体设备中射频电源价值量占比：根据中国刻蚀设备行业现状深度研究与投资趋势预测报告（2022-2029 年），膜沉积设备、刻蚀设备、离子注入机和去胶机占比分别为 27%/22%/3%/1%；③

射频电源占设备成本：假设射频电源成本约占等离子体加工设备 12%，假设毛利率为 45%，则半导体射频电源占设备价值量比为 7%；④

假设人民币兑美元汇率为 7（USD/CNY=7）；测算结论：预计 2025 年全球半导体射频电源市场空间有望达 270 亿元，国内市场空间达 70

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。
如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/308003123041006051>