

面向高精密电子元件电镀的新型脉冲电源设备 研发与性能优化

侯进

邯郸市大舜电镀设备有限公司, 河北 邯郸 056106

摘要: 随着微电子制造技术的持续发展, 电子元件的结构尺寸不断缩小, 对电镀精度和膜层质量的要求日益提高。传统电镀电源由于输出波形稳定性差、响应速度慢, 难以满足高精密元件的电镀需求。新型脉冲电源技术因其优良的时间控制能力、可编程性和波形调节灵活性, 成为实现高质量电镀的重要技术方向。本文围绕高精密电子元件电镀应用需求, 分析传统电源存在的技术瓶颈, 提出一种基于高速数字控制技术的新型脉冲电源设计方案, 并从波形精度、电流响应、系统稳定性等方面进行优化研究。研究表明, 该设备具备高稳定性、高分辨率和多模式输出能力, 显著提升了镀层均匀性和结合力, 适用于微电子制造、芯片封装等多个精密加工场景。

关键词: 脉冲电源; 电镀设备; 高频控制; 薄膜均匀性; 微电子元件

引言

高精密电子元件广泛应用于 5G 通信、航空航天、医疗器械等领域, 对其表面性能、导电能力及可靠性有着极高要求。电镀作为改善元件性能、增强附着力和形成功能性涂层的关键工艺, 正在向更高精度、更均匀性的方向演进。然而, 传统直流或简单可调电源在控制能力、响应速度以及波形设计方面存在诸多局限, 已难以支撑高质量镀层的形成。为应对这一挑战, 新型脉冲电源技术应运而生, 其在控制波形、优化沉积速率与微观结构调控方面表现出显著优势。通过精确调节电流上升时间、脉宽、占空比及频率, 脉冲电源能够更好地控制电镀反应动力学过程, 为提升微结构均匀性提供了可行路径。

1 电镀工艺对电源性能的关键技术需求

1.1 高精密电子元件电镀的技术挑战

在高精度制造过程中, 电镀膜层的质量直接影响电子元件的导电性、耐腐蚀性及尺寸稳

定性。以芯片引脚镀金、BGA 封装层镀锡为例, 对膜层厚度均匀性和表面粗糙度的要求通常控制在微米甚至纳米级别。这种高要求下, 电流波动、波形畸变以及瞬时响应不佳都可能引发沉积颗粒粗大、镀层不均等问题。

此外, 高精密元件通常具备复杂的几何形状或细密排布结构, 如细间距布线、三维凹凸结构等。这类结构对电场分布极为敏感, 电镀过程中极易出现边缘效应和遮蔽效应, 导致局部过度沉积或沉积不足。为缓解此问题, 电源设备必须具备灵活调节的脉冲控制能力, 通过“低占空比+高频率”模式优化沉积速率, 控制微粒成核行为, 提升厚度控制精度^[1]。

1.2 传统电镀电源的局限性

目前工业中仍大量使用线性直流电源或简单 PWM 控制的恒流电源用于电镀, 这些设备普遍存在以下缺陷: 其一, 输出波形单一, 仅具备恒流或简单斜坡功能, 无法实现细致的工艺过程分段控制; 其二, 响应速度慢, 特别是在应对快速负载变化时出现滞后, 易导致电流突变; 其三, 调节精度低, 难以满足纳米级

电镀厚度控制需求。

更重要的是，这类电源在电磁干扰抑制、噪声管理与功率因数控制方面设计滞后，易引起系统不稳定，影响整体制程良率。在面对高端电子器件电镀时，这些问题被进一步放大，不仅影响生产一致性，还可能降低芯片封装的可靠性^[2]。

2 新型脉冲电源的系统设计方案与控制原理

2.1 整体架构设计思路

针对高精密电子元件电镀所需的脉冲波形控制能力和系统稳定性要求，新型脉冲电源设备在系统结构上采用了“高速数字控制+多级电流放大+闭环反馈保护”的三层架构。控制核心基于高性能 ARM 或 DSP 控制器，可实现纳秒级电流调制命令发出，并同步监测输出波形状态。在功率输出部分，设备通过多组并联 MOSFET 阵列进行 PWM 功率放大，利用高速开关与滤波器组合确保输出波形平滑、响应迅速，避免传统线性放大方式带来的发热大与功率浪费问题。

为确保系统长期稳定运行，设计中还引入了多通道隔离采样与反馈环节。包括输出电压、电流、温度、负载阻抗等参数的实时采集，每秒更新频率可达 5000 次，通过数字滤波算法实时调整输出指令，防止过冲、欠压等异常波动影响工艺稳定性。同时，系统具备过流、过压、过温自保护功能，异常时自动切断输出并记录报警数据，便于后期追溯与优化。

2.2 核心模块功能与波形生成机制

在波形生成方面，新型电源不再依赖传统模拟脉冲信号，而是通过数字编程方式完成波形设定。控制器内置多种预设波形模板，如方波、梯形波、双极脉冲等，并支持用户自定义输出曲线，适应不同金属材料和工艺流程的电镀需求。波形周期可从 1 微秒调至 1 秒，脉冲宽度、占空比、电流值等可分段设置，支持按

图形化界面拖拽设置参数，极大提升了操作便捷性。

尤其值得一提的是该系统支持“多段复合脉冲”输出功能。用户可将不同频率、不同幅值、不同极性的波形进行序列化编排，如设定前段为高频低电流促使晶核细化，中段为中频中电流形成平滑镀层，后段加入反向电流抑制毛刺形成。此类波形对微结构调控和应力消除效果明显，特别适用于要求高致密性、高结合力的精密金属电镀过程^[3]。

2.3 界面友好与多样化接口设计

为适应现代自动化生产线的多系统融合需求，新型脉冲电源设备在接口设计上支持多种通讯协议，包括 RS485、CAN 总线、Modbus、EtherCAT 等工业标准接口，便于与 MES 系统、PLC 控制器或上位机软件进行无缝对接。同时还支持以太网远程控制和数据读取功能，工程师可在后台远程设定电镀程序、查看运行状态及故障报告，极大提升了生产管理效率。

设备配备 7 寸工业触控屏作为人机界面，用户可在本地设置波形参数、查询历史数据、调试运行状态，界面采用模块化设计，便于不同熟练度的用户快速掌握操作要领。此外，系统具备配方管理功能，支持 100 组以上电镀工艺方案存储与调用，适合多品类元件的交替生产场景^[4]。

3 电源性能优化与系统稳定性提升研究

3.1 电流输出精度与波形一致性控制

高精密电镀对电流输出的精准度要求极高。为降低输出误差，新型脉冲电源在电流检测与校准方面进行了多重优化。首先，采用 0.01 级高精度电流采样电阻并配合 24 位 ADC 模数转换芯片，可实现毫安级甚至微安级的电流变化感知。其次，系统引入温度补偿机制，电源在高低温环境下均可保持电流偏差在 ±0.5% 以内，有效保障设备在不同工作环境下的

一致输出。

波形一致性方面，系统具备波形实时监控功能，每一周期内采样输出信号与预设波形进行比对，若发现偏差超出设定阈值，则通过控制算法自动进行调整补偿。实验表明，在频率 20kHz 条件下运行 1 小时内，脉冲宽度变化幅度不超过 ± 2 微秒，输出电流波动范围小于 $\pm 1\%$ ，可满足纳米级膜层均匀性控制要求。

3.2 温控与散热系统提升设备稳定性

长期运行状态下，电源设备内部热量积聚可能导致元器件性能下降，甚至损坏。为解决此问题，设备采用了“热源识别+分区散热”结构设计。通过对功率器件温升分布建模，识别出主加热区域后，配置了多点热敏电阻进行监控，并根据温度反馈自动调节风扇转速及散热通道开闭。主控模块独立封装并配备铝合金热沉，提升局部散热效率。

此外，为防止散热系统失效带来的风险，系统设置了“三级温控报警机制”：第一档为温度提醒，第二档为功率自动降载，第三档为强制断电保护，确保设备在极限环境中亦能安全运行。长期测试数据显示，在持续工作 8 小时条件下，内部温度控制在 65°C 以内，关键器件无老化损伤，设备可靠性显著提高。

3.3 抗干扰设计提升整机电磁兼容性

电子电镀设备通常处于高电磁干扰环境中，特别是高频脉冲运行时易对周边仪器、信号传感器等产生影响。本设备在电磁兼容性设计方面也做出优化处理，包括输入端滤波器、功率回路隔离屏蔽、控制电路光耦隔离等手段，有效抑制电磁辐射与传导干扰。

此外，内部通信采用差分信号制式，抗干扰能力强，并对控制器软件设定了异常数据识别机制，避免因外部电压波动、磁场干扰造成信号误触发或系统宕机。整机通过 EMC 三级测试，满足工业设备运行安全标准，可在较为复杂的生产环境中长期使用而不受干扰影响。

4 典型应用验证与性能实测分析

4.1 电镀实验平台构建与测试方法

为验证所研发的新型脉冲电源在高精密电子元件电镀中的实际效果，实验团队搭建了模拟电镀平台，选取典型的微型电子器件作为试样材料，包括引线框架、微型连接片及芯片封装底板。电镀材料以镀金、镀银、镀锡为主，实验液采用行业通用电镀液配方，并控制环境温度在 $25\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，搅拌速度、pH 值、离子浓度等关键工艺参数保持一致，确保测试数据的可比性与有效性。

测试中对比使用传统恒流直流电源与所研发脉冲电源，在相同电镀时间与沉积总量条件下，对比分析其膜层厚度分布、表面粗糙度、电镀结晶质量以及附着强度。使用扫描电子显微镜（SEM）观察镀层微观形貌，用 XRD 分析结晶取向，并采用四探针法测量电阻率，辅助以附着力剥离试验与盐雾腐蚀试验进行综合评估^[5]。

4.2 关键性能指标对比结果

实验数据显示，在相同条件下，使用脉冲电源电镀所得镀层在厚度均匀性上提升明显。以镀金膜层为例，其表面厚度波动从原来 $\pm 15\%$ 降低至 $\pm 6\%$ ；表面粗糙度 Ra 值平均降低 30% 以上，表面更加致密光滑。XRD 谱图显示脉冲电源沉积的金属颗粒晶向更规则，结晶度提高，颗粒尺寸分布更集中，反映出电流控制对结晶过程的显著调节能力。

从附着力测试来看，脉冲电源组在微拉剥测试中表现出更高的临界剥离力，说明膜层与基底结合力更强。电阻率测量结果也优于恒流组，说明沉积层导电性能更优，更适合用于微电子导电电极或信号通道的构建。此外，盐雾试验中脉冲电源电镀膜的起泡与腐蚀现象出现时间延后超过 24 小时，说明其保护性更强。

这些结果表明，所研发的新型脉冲电源不仅在控制精度、响应速度方面表现优异，也在

实际电镀应用中显著提升了膜层性能，为电子元件提供更可靠的功能支持。

5 发展趋势与未来优化方向

5.1 智能控制与自适应调节技术融合

尽管当前设备已实现高精度控制与性能稳定，但随着工艺的精密化与产品的多样化，未来脉冲电源仍需进一步向“智能化”发展。结合人工智能算法，通过对历史工艺参数与电镀质量数据的学习，设备可逐步实现电镀波形的自动推荐与自适应调节。例如针对不同金属材料或复杂三维结构，系统可根据目标特性自动构建最优脉冲策略，减少人工经验依赖，提升操作标准化程度。

同时，可引入“闭环电镀质量控制机制”，通过在线监测膜层厚度、电压、电流等指标反馈电源调整策略，实现电镀工艺全过程的智能纠偏。这样可避免由于环境波动或工艺扰动引发的膜层偏差，保障产品质量稳定。

5.2 模块化设计与系统集成拓展性增强

考虑到不同企业对产能、电压等级、输出通道数量等的差异化需求，未来脉冲电源设备应向模块化设计方向发展。通过“主控单元+功率模块+接口模块”的组合方式，用户可根据工艺需求灵活组合设备，实现从单通道小型试验型到多通道大功率工业型的自由切换。这不仅降低了用户初期投资成本，也提升了设备维护与升级的灵活性。

此外，设备与MES系统、SCADA平台的数据接口也将更加标准化和开放化，实现跨平

台数据互联，支持数字化车间的建设。未来脉冲电源不再是孤立设备，而是深度嵌入到生产流程与工艺数据链中的“控制节点”。

5.3 绿色节能与环保方向的考量

现代制造越来越重视能源消耗与环保要求。传统电镀电源在转换效率、能量利用率方面存在大量损耗。新一代脉冲电源设备需在高效率拓扑结构设计、电磁损耗优化、能量回收等方面持续改进。可采用软开关技术、多相并联平衡设计等方式降低开关损耗，提高能效比。同时，系统还可结合能耗监测模块，帮助用户评估电镀单元能耗水平，优化排产计划，推动绿色制造发展。

结论

面向高精密电子元件电镀的需求，本文围绕新型脉冲电源设备的研发与性能优化进行了系统研究。从电镀工艺对电源性能的核心要求出发，设计了一套具备高速响应、高精度控制与灵活波形编程能力的脉冲电源系统。通过硬件优化、软件算法改进以及稳定性增强措施，解决了传统电源在控制不精、波形畸变和系统稳定性差等问题。在实际电镀测试中，该设备显著提升了膜层均匀性、结合强度与导电性能，展现出良好的工业应用前景。

未来，随着智能制造、绿色制造理念的推进，脉冲电源设备将进一步向智能控制、系统集成与节能环保方向演进，成为支撑高端电子元件制造不可或缺的核心技术装备。

参考文献

- [1]潘泽宇. 功率变换系统电子元器件电磁兼容模型建立方法研究[D]. 电子科技大学, 2024.
- [2]刘强. ICP源中射频发生器的研究与设计[D]. 烟台大学.
- [3]何柏桦. β -Zn₄Sb₃热模块制备及应用的基础研究[D]. 云南师范大学, 2022.
- [4]何鹏. kA级高重复性脉冲电流源关键技术研究[D]. 电子科技大学, 2022.
- [5]曹瑄. 脉冲负载两级式直流变换器研究[D]. 南京理工大学, 2021.