

半导体热处理设备微环境中的精密微正压控制解决方案

Precise Micro-Positive Pressure Control Solution In Micro-Environment of Semiconductor Heat Treatment Equipments

摘要：针对半导体热处理设备微环境中的微正压精密控制，本文分析了现有技术造成微正压控制不稳定的原因，提出了相应的解决方案。解决方案主要是采用绝对电容真空计替代压差计，采用真空低漏率的高速电动针阀和电动球阀替代气体质量流量计和蝶阀，采用具有分程控制和串级控制功能的真空压力器进行进出气流量的同时调节以及氧浓度和微正压的同时控制。解决方案不仅可以实现微正压准确控制，同时也可以用于真空负压的精密控制过程。

1. 问题的提出

在半导体热处理设备中，微环境是除了工艺腔室之外需要与外部大气环境隔离的封闭空间区域，是半导体处理设备的核心结构之一，其主要功能是提供晶圆在半导体设备内部进行传输、装卸及中转的稳定区域，晶圆在进行工艺处理前以及在完成工艺后的传输、装卸都要在微环境内部进行，因此在该区域内要求满足洁净度、氧含量、温度、压力等环境要求，其中压力控制作为微环境的重要参数指标，对产品最终的工艺性能有着重要的影响。为此，北京北方华创微电子装备有限公司在专利CN110797278B中提出了一种微环境压力控制解决方案，如图1所示。

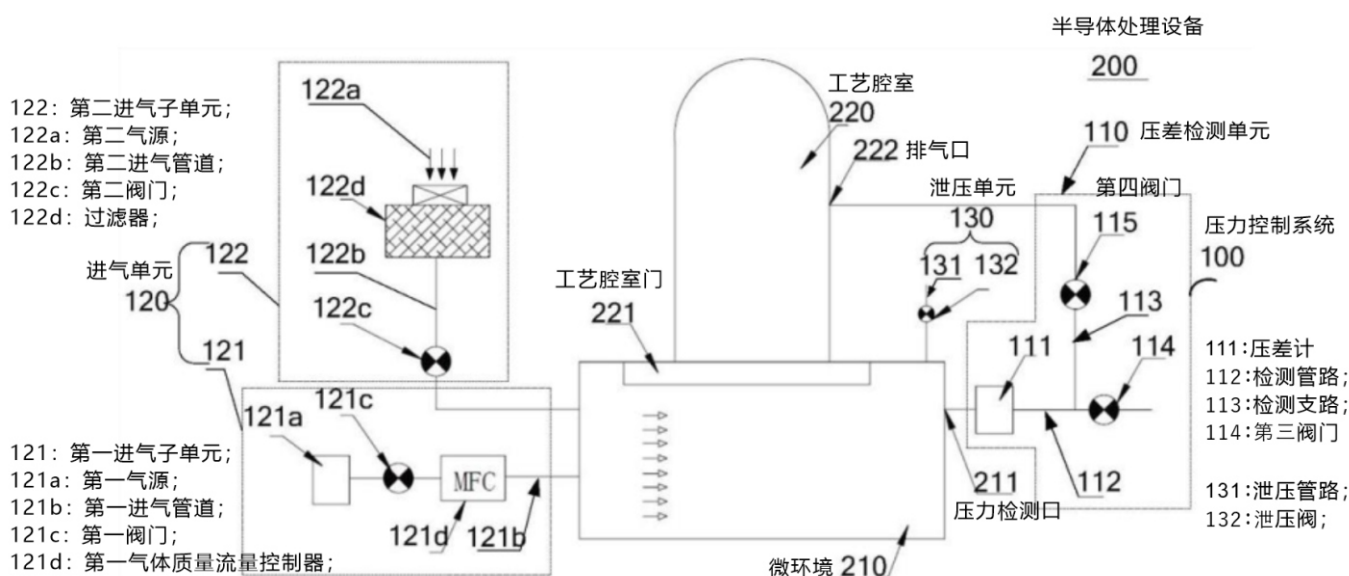


图1 专利CN110797278B的微环境压力控制系统结构示意图

同样，为解决硅片加工完成后下降至装卸腔室时导致仍处于高温的硅片上产生非必要氧化层而降低硅片加工质量的问题，北京北方华创微电子装备有限公司在专利CN115101443A中，提出了一种半导体工艺炉及其装卸腔室的控氧控压解决方案，如图2所示，通过控制装卸腔室内的氧含量和气体压力，以使氧含量和压力值达到工艺要求，通过使装卸腔室保持微正压来有效阻止外界空气进入装卸腔室，从而保证氧含量控制效果和提升硅片加工质量。

通过描述可知，上述两专利所涉及的解决方案是为了解决晶圆在半导体设备内部进行传输、装卸及中转区域空间的氧含量和压力控制问题，目的是要实现微正压精密控制，阻止外界空气进入装卸载腔室，避免高温硅片上产生非必要的氧化层。微正压控制范围为1.5Torr~3.5Torr（表压），理想控制压力为 2.5 ± 1 Torr。

通过分析，我们认为上述专利提出的解决方案存在以下几方面的问题：

（1）上述专利中的压力控制方法是采用压差计测量腔室与周围环境之间的压力差，并根据设定值与测量值对比结果控制微正压，但这种控制方式受环境压力的波动影响较大。

（2）上述专利中采用了气体流量调节器和蝶阀分别调节氮气进气流量和出口排气流量以实现微正压的恒定控制，但这种压力调节方式的响应速度较慢，而且微正压控制精度不高。

（3）微正压控制是个典型分程控制方式中的正反向控制模式，即通过调节进气和排气流量达到平衡实现微正压恒定控制，但上述专利中并没有给出这种分程控制实施手段。

（4）尽管上述专利中采用氧分析仪检测微环境中的氧浓度，且采用增加微正压的压力来降低氧浓度达到工艺指标要求，但如何根据氧浓度测量来控制微正压压力在上述专利中并未提及。

为了解决上述微正压控制中存在的问题，本文将提出更切实可行的解决方案。

2. 解决方案

为避免作为参考压力的环境气压波动带来的微正压控制的不稳定性，本解决方案采用高精度的绝对压力真空计（薄膜电容规），其真空压力测量范围为10~1000Torr，测量精度为任意压力读数的0.2%，在对应的标准大气压下760Torr（10132Pa），精度为 ± 20 Pa。如果还需要控制精度更高的微正压环境，可以采用精度更高的0.05%薄膜电容规，那么在标准大气压下的测量精度可以达到 ± 5 Pa。所使用的两种精度的真空计如图3所示，由此可实现微环境压力控制的精确控制，并不受地区、气候和气温等因素对环境气压影响。

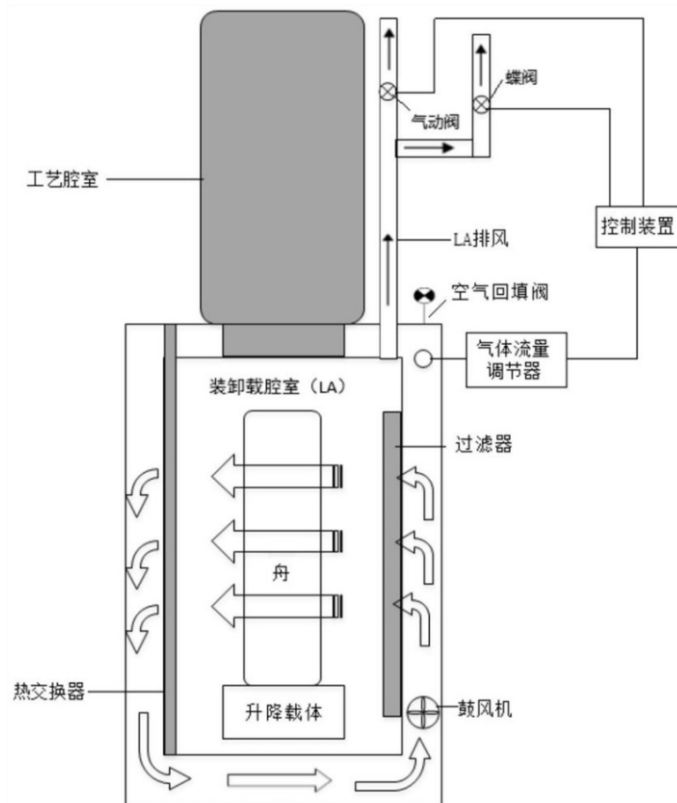


图2 专利CN115101443A半导体工艺炉装卸载腔室的控氧控压结构示意图



图3 两种不同测量精度的薄膜电容真空计

为解决进气和排气流量调节速度较慢且微正压控制不准的问题，本方案采用电动针阀代替气体质量流量计来实现进气流量调节，采用电动球阀代替蝶阀进行排气流量调节。电动针阀和电动球阀的优势一是响应速度极快，全程动作时间都在1秒以内；二是球阀口径小于蝶阀，更有利于微环境的微正压准确控制；三是电动针阀和电动球阀具有极小的真空漏率，更能有效保证半导体热处理设备的真空密封性以及防止外部环境气体渗透进入工作腔室。本方案所用的电动针阀和电动球阀如图4所示。



图4 真空用低漏率高速电动针阀和电动球阀

针对微正压控制过程中的进气和排气的正反向自动控制问题，本解决方案采用了具有分程控制功能的PID真空压力控制器，以通过PID控制方式自动调节电动针阀和电动球阀实现正压和负压的自动控制。采用此真空压力控制器的优势一是可以同时对接气和排气流量进行调节；二是控制器具有很高的测量精度，控制器采用了24位AD、16位DA和0.01%最小输出百分比，由此可很好的匹配薄膜电容真空计并充分发挥真空计的测量精度优势；三是控制器可同时连接两个不同量程的真空计以及自动切换功能，很便于实现全量程真空度的测量和控制。此高精度真空压力控制器及其接线示意图如图5所示。

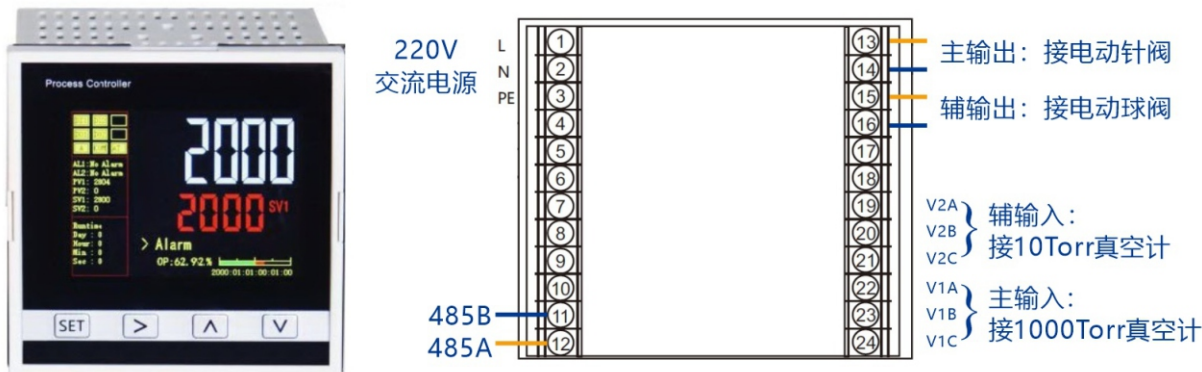


图5 高精度真空压力控制器及其接线示意图

针对通过检测氧浓度来控制正压压力大小以实现氧浓度低于工艺要求的控制过程，本解决方案提出了以下两种具体实施方案：

- (1) 第一种方案是增加整个半导体设备的真空密封性，减小各个相关部件和管路的真空漏率，在真空漏率达到要求的前提下，再通过固定数值的微正压控制，基本可以在全工艺过程中保证氧浓度低于工艺指标要求。
- (2) 第二种方案是采用串级控制方式，分别以氧浓度和压力为控制参数，使用具有串级控制功能的双通道PID真空压力控制器。第一通道构成压力控制闭环回路，在固定电动针阀开度使得氮气进气流量恒定的前提下，调节电动球阀进行微环境的压力控制。第二通道连接氧浓度传感器，与第一通道构成另一个闭环控制回路，由此通过改变正压压力实现氧浓度控制。

3. 总结

本文所述的解决方案可归纳总结为以下几项主要内容：

(1) 明确给出了半导体热处理设备微正压控制系统中真空计、调节阀和控制器这些关键部件的具体细节。

(2) 解决方案可在半导体热处理设备中很好的实现微正压准确控制，且技术成熟度高。

(3) 解决方案还可进行微正压之外的真空负压范围内的精密控制。

(4) 解决方案提出的串级控制模式可实现氧浓度和微正压的同时调节和控制，使得此解决方案具有更强的功能性和扩展性，如可以进行温度和真空压力的同时控制，晶片清洗工艺中的药液流量和温度的同时控制等。