

半导体低温工艺中制冷系统的压力和温度准确控制解决方案

Solution for Accurate Control of Pressure and Temperature of Refrigeration System in Semiconductor Low Temperature Process

摘要：针对半导体低温工艺中制冷系统在高压防护和温度控制中存在的问题，本文将提出一种更简便有效的解决方案。解决方案的核心是在晶片托盘上并联一个流量可调旁路，使制冷剂在流入晶片托盘之前进行部分短路。即通过旁路流量的变化调节流出晶片托盘的制冷剂压力，一方面保证制冷剂低压工作状态，另一方面实现晶片温度的高精度控制。

1. 问题的提出

随着新一代半导体工艺技术的发展，如低温刻蚀和沉积，需要晶片达到更低的温度。更低温度的实现目前可选的技术途径一般是采用循环流体介质直接作用在晶片卡盘，而介质可以是单一制冷剂（如液氮）和混合制冷剂。目前，更具有应用前景的是使用混合制冷剂的自复叠混合工质低温制冷技术，但在半导体低温工艺的具体应用中，需要处理好以下两方面的问题：

(1) 当制冷系统连接到晶片托盘后，混合工质就在一个容积固定管路内循环运行。在压缩机启动初期，整个系统基本处于较高温度的，系统内大部分工质为气相，随着制冷温度的降低，除压缩机和冷凝器外的其他部件内的液相工质含量逐渐增加，当制冷温度达到最低时，系统内的液相工质含量达到最高。由于气液两相工质的比容相差较大，不同相态的工质通过节流单元的能力不同，工质间的沸点也不同，所以在制冷系统启动初期，通过节流单元的几乎全部为气态工质，压缩机的排气压力也将会很高。而在半导体工艺设备中，半导体晶片托盘及其回路部件的最大工作压力通常在1~1.4MPa范围内，那么在低温制冷过程中，冷却剂压力可能会超过晶片托盘冷却回路的最大操作压力而造成系统损坏。因此，要在晶片制冷系统中增加低温压力控制装置，避免出现高压问题，保证制冷系统在整个运行过程中制冷剂压力符合要求。

(2) 晶片冷却温度是半导体低温工艺的一项重要技术参数，晶片冷却过程中的低温温度要求按照设定值进行准确控制。尽管大多数低温制冷系统都具有温度控制功能，可通过外部温度传感器、调节回路和控制器组成的闭环回路实现低温温度控制，调节回路基本都是通过调节制冷剂流量和膨胀方式，有些则通过辅助加热方式进行温度控制，但这些温控方式普遍结构复杂且控温精度不高，特别是在多个晶片同时冷却的半导体设备中这些问题更是突出。

针对上述半导体低温工艺中制冷系统在压力和温度控制中存在的问题，本文将提出一种更简便有效的解决方案。解决方案的核心是在晶片托盘上并联一个流量可调旁路，使制冷剂在流入晶片托盘之前进行部分短路。即通过旁路流量的变化调节流出晶片托盘的制冷剂压力，一方面保证制冷剂低压工作状态，另一方面实现晶片温度的高精度控制。

2. 解决方案

对于半导体低温工艺中的晶片托盘进行冷却，一般所采用的技术方案是直接将自复叠混合工质制冷机与晶片托盘连接，其结构如图1所示。这种方案在温度控制时是在晶片托盘上安装温度传感器，并与控制器连接进行温度控制，但这种方案存在压力过高和温度控制不准确的问题。

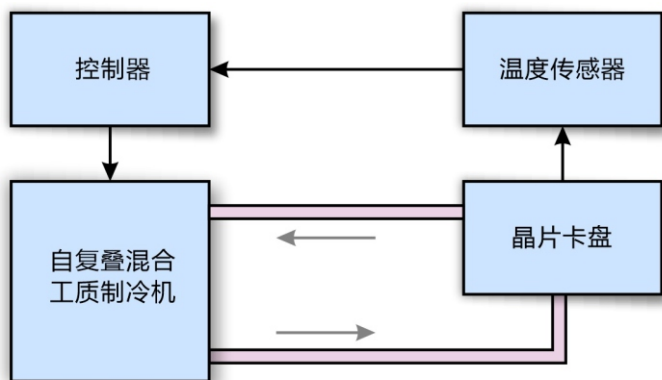


图1 半导体晶片低温冷却常规方案

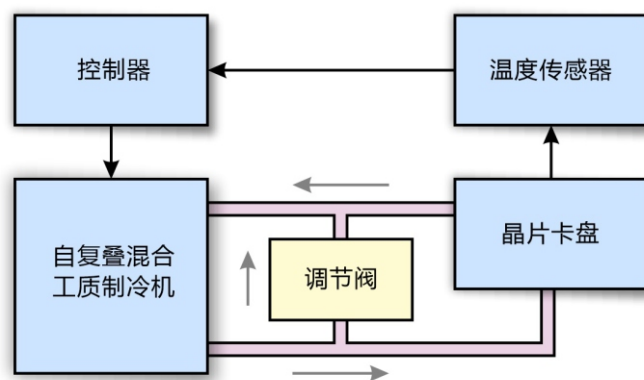


图2 半导体晶片低温冷却改进后方案

本文提出的改进方案如图2所示，为了使冷却过程中的混合工质压力始终处于安全工作范围，在图1所示的冷却管路上增加了一个短接旁路，通过一个调节阀控制此旁路中的工质流量可以降低晶片卡盘及其管路的内部压力达到安全范围。同时，此旁路调节阀具有高精度动态精密调节能力，可使晶片卡盘内部的制冷剂压力波动非常小而实现更准确的温度控制，由此可在制冷机现有温度控制能力的基础上，降低压力波动和提高温度稳定性。具体实施方案如图3所示。

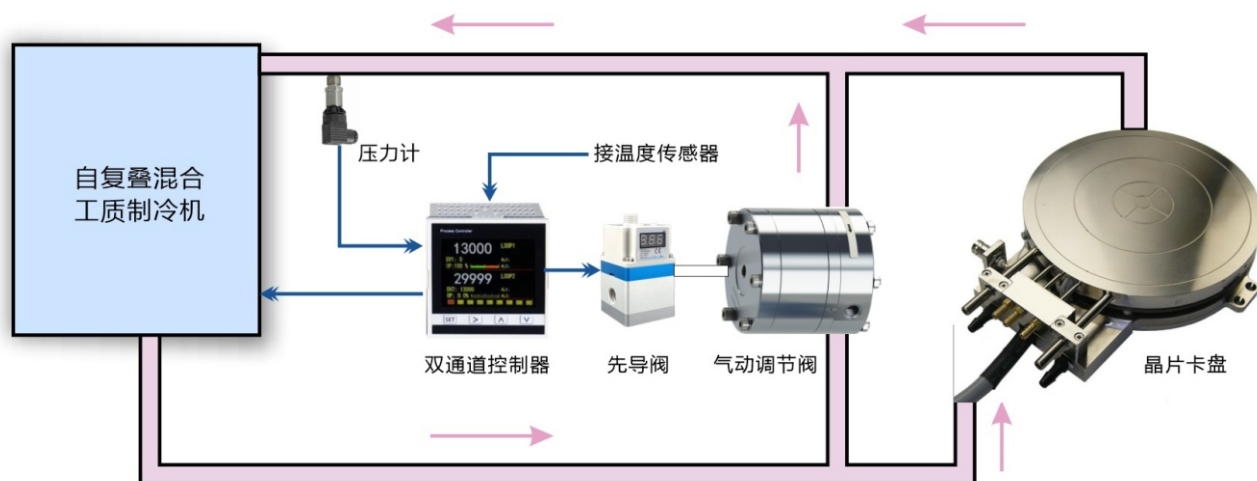


图3 半导体晶片低温冷却系统压力和温度精密控制方案示意图

在图3所示的解决方案中，采用了以下几个控制部件：

(1) 气动调节阀：此气动调节阀也称之为背压阀，即通过较小的气体压力来驱动较大压力下流体介质中阀门的开度变化。通过此低温调节阀开度变化来改变旁路流量进而实现压力调节。

(2) 先导阀：先导阀是一个低压气体压力调节阀，可对表压（如0.6MPa）的进气压力进行高精度减压调节，调节控制信号为模拟量（如4~20mA或0-10V），由此来驱动气动调节阀。

(3) 传感器：晶片低温冷却系统包含了压力和温度传感器，以分别检测晶片冷却剂回路中的压力和晶片温度，并将检测信号传输给双通道PID控制器。压力传感器可根据实际需要布置在制冷剂管路中的不同位置，以提供合理和准确的压力监测。

(4) 双通道控制器：此双通道控制器是具有两路独立控制通道且具有很高精度的PID控制器，一路通道与压力传感器和先导阀构成压力控制回路，另一通道与温度传感器和制冷机构成温度控制回路。

总之，通过这种增加旁路并进行压力精密调节的解决方案，即可满足降低制冷剂压力提供安全防护功能，又可以提高晶片温度控制精度，是一种可用于晶片低温工艺的更优化方案。