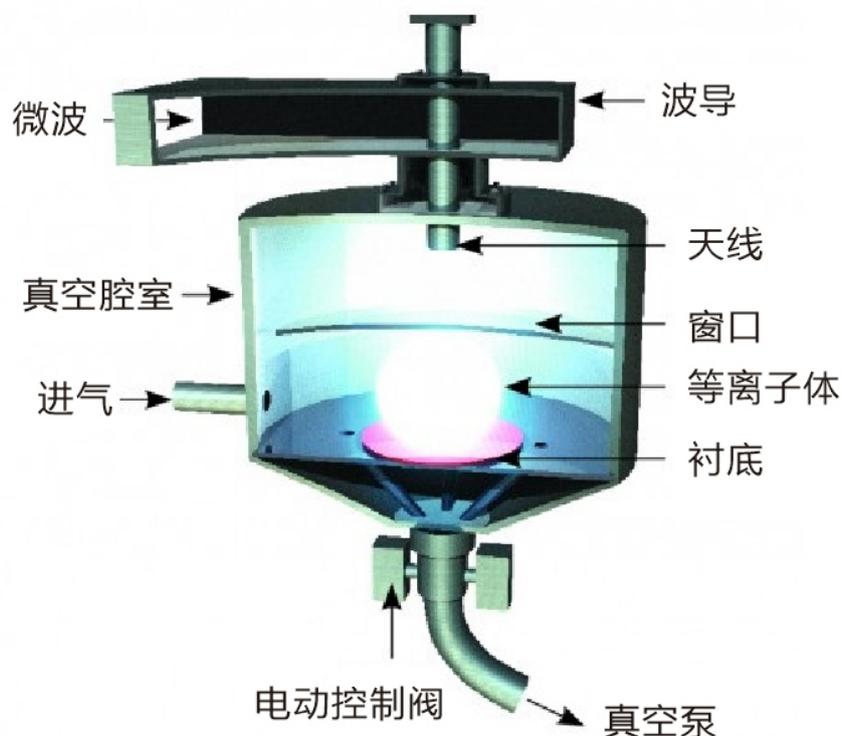


## CVD和MPCVD法钻石生长过程中采用双通道PID控制器控制真空度（气压）和温度

The Vacuum Pressure and Temperature are Controlled by Dual-Channel PID Controller in CVD and MPCVD Diamond Growth Process



摘要：本文将针对 CVD 和 MPCVD 工艺设备中存在的问题，介绍一种国产的两通道 24 位高精度多变量 PID 控制器，此一台控制器可对温度和真空度同时进行控制，大大缩小了仪表占用空间和造价。两通道可一次共接入 4 个传感器，每个通道可以连接备用的温度和真空度传感器，由此可保障长时间钻石生长的安全性又可满足宽量程测控的需要，同时还可用来进行差值和平均值监测。

## 1. 问题的提出

目前，高等级钻石生长的首选工艺是采用化学气相沉积 (CVD) 和微波等离子体 CVD (MPCVD) 技术，另外 CVD 和 MPCVD 工艺还可用于在钻石以外的基材上进行钻石沉积，这为许多行业带来了技术上的进步，如光学、计算机科学和工具生产。在 CVD 工艺中，通过采用气体原料（氢气、甲烷）在低于 1 个大气压和 800~1200°C 的温度下，采用外延生长的方式获得完全透明无色大尺寸金刚石单晶，其成分、硬度和密度等与天然钻石基本一致，而价格远远低于天然钻石。

在采用 CVD 和 MPCVD 工艺进行钻石生长过程中，需要严格调节和控制 CVD 工艺的温度、真空压力和气体成分，这三个变量中的任何一个变化或波动都会影响钻石的生长速度、纯度和颜色。这三个变量在实际工艺中分别代表了温度、真空压力和工作气体的质量流量，即在 CVD 工艺中一般是在进气口处采用气体质量流量计控制氢气和甲烷以达到设定的混合气体成分，通过温度传感器和加热装置来调节和控制工作腔室内的温度，最后在出气口处通过真空计和电动阀门来调节和控制工作腔室内的真空压力。

目前这三个变量的同时控制，在国内的 CVD 工艺设备上还存在以下几方面问题：

(1) 在气体质量流量和温度这两个变量的测控方面，国内仪表已经非常成熟和可靠，但在真空压力的测控方面，普遍还在使用测量精度较差的皮拉尼真空计及相应的控制器，这会严重影响腔室内工作气压的测控精度，而对钻石质量带来影响。

(2) 在 CVD 工艺设备中，上述三个变量都需要独立的传感器和控制器进行独立操作和控制，由此造成一方面的所占空间比较大，另一方面是设计操作复杂且成本无法进一步降低。

(3) 部分 CVD 工艺设备在真空度测控中采用了成熟的国外产品，但价格昂贵且功

能单一，只能进行真空度的测控，同时还需要准确的控制算法来适应温度突变情况下的真空度稳定控制，而且还需配套国产的气体质量流量计和温度控制仪表。

总之，国内的钻石生长市场在近几年发展快速，据统计，2018年，国内自主生产供应的宝石级培育钻石约37.5亿元，相比2016年的0.4亿元，呈现了几何级的增长。然而国内掌握CVD技术，特别是MPCVD技术的厂家并不多，目前依旧是欧美厂家占主导，国内很多大厂家都已经涉足该领域，但量产一直是难点，而量产这一难点的根源在于CVD和MPCVD在真空环境下的控制很难。

本文将针对CVD和MPCVD工艺设备中存在的问题，介绍一种国产的2通道24位高精度多变量PID控制器，此一台控制器可对温度和真空度同时进行控制，大大缩小了所占空间和造价。2通道可一次共接入4个传感器，每个通道可以连接备份用的温度和真空度传感器，由此可保障长时间钻石生长的安全性又可满足宽量程测控的需要，同时还可用来进行差值和平均值监测。

## 2. 真空压力上游和下游控制模式的选择

在如图2-1所示的工作腔体内部真空压力控制过程中，一般有上游和下游两种控制模式。上游控制是一种保持下游真空泵抽速恒定而调节上游进气流量的方式，下游控制是一种保持上游进气流量恒定而调节下游真空泵抽速的方式。

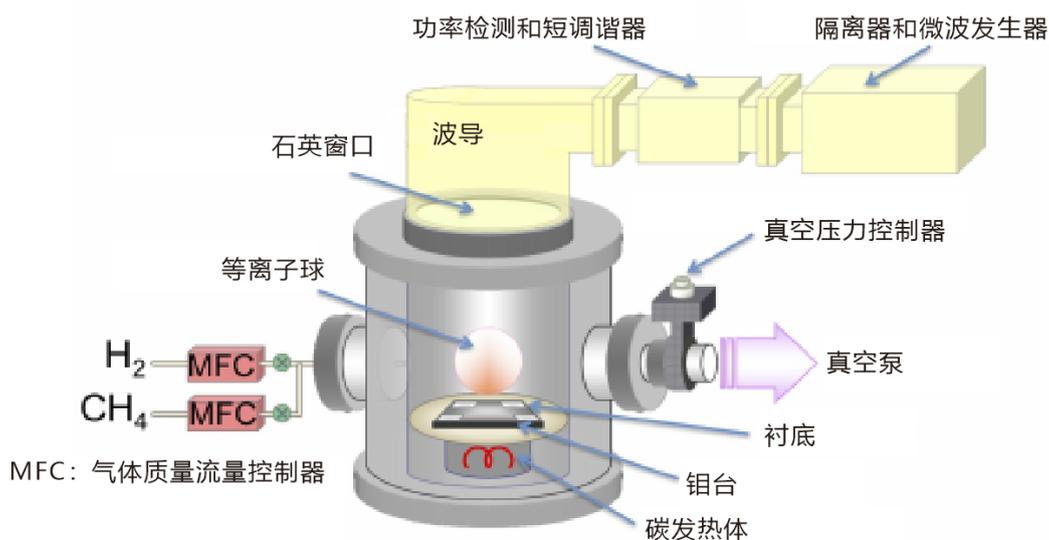


图 2-1 CVD 工艺设备典型结构示意图

针对CVD和MPCVD工艺设备中的真空压力控制，国内外普遍都采用下游控制模

式,也有个别国外公司推荐使用上游控制模式,这里将详细分析上下游两种控制模式的特点和选择依据:

## 2.1. 下游控制模式

(1) 在采用 CVD 和 MPCVD 工艺进行宝石生长过程中,对气体成分有严格的规定并需要精确控制。因此在 CVD 和 MPCVD 工艺设备中,通常会在工作腔体进气端采用气体质量流量控制器对充入腔体内的每种工作气体流量进行准确控制,也就是说对进气端调节控制的是气体流量,而且至少是两种工作气体。

(2) 在进气端实现对工作气体成分准确控制后,还需要对工作腔体内的真空压力进行控制。下游控制可通过调节真空泵的抽速快速实现真空压力的准确控制,而且在控制过程中并不会影响工作腔室内的气体成分比例。

(3) 在 CVD 和 MPCVD 工艺过程中,温度变化会对腔体内的真空压力会给真空压力带来很大影响,由此要求真空压力控制具有较快的响应速度,使腔体内的真空压力随温度变化始终恒定控制在设定值上,因此采用下游控制模式会快速消除温度变化对真空压力恒定控制的影响。

(4) 在 CVD 和 MPCVD 工艺过程中,工作腔体内的真空压力一般在几千帕左右这样低真空的范围内进行定点控制。对于这种低真空(接近一个大气压)范围内的真空压力控制,较快速有效和经济环保的控制方式是下游控制,在进气流量恒定的前提下,只需较小的抽速就能快速实现真空压力的准确控制,排出的工作气体较少。

## 2.2. 上游控制模式

(1) 上游控制模式普遍适用于高真空(真空压力小于 100Pa)控制,即真空泵需要全速抽气,通过调节上游进气的微小变化,即可实现高真空准确控制。

(2) 采用上游控制模式对低真空进行控制,在真空泵全速抽气条件下,就需要增大上游进气量,增大进气量一方面会造成恒定控制精度差和响应速度慢之外,另一方面会带来大量的废气排出。因此,在这种低真空的上游控制模式中,一般还需在下游端增加手动节流阀来减小真空泵的抽速。

(3) 在真空压力控制中,一般在流量和压力之间选择其中一个参量进行独立控制,

也就是说控制了流量则不能保证压力恒定，而控制了压力则不能保证流量恒定，因此在一般真空压力控制中，上游控制模式在一定范围内比较适用。但在 CVD 和 MPCVD 工艺过程中，如果在进气端进行流量调节来实现进气成分比例和真空压力的同时恒定，而且还要针对温度变化做出相应的调整，这种上游控制方式的难度非常大，如果不在下游增加节流阀调节，这种上游控制方式几乎完全不能满足工艺过程要求。

(4) 有些国外机构推荐在 CVD 和 MPCVD 工艺设备中使用上游控制模式，一方面是这些机构本身就是气体质量流量控制器生产厂家，并不生产下游控制的各种电动阀门，因此他们在气体质量流量控制器中集成了真空传感器，这种集成真空计的气体质量流量控制器确实是能够用来独立控制进气流量或腔室内的真空压力，但要同时控制流量和压力则几乎不太可能，还需下游节流阀的配合才行。另一方面，这些生产气体质量流量控制器的机构，选择使用上游控制模式的重要理由是下游控制模式中采用电动阀门的成本较高，情况也确实如此，国外主要电动阀门的成本几乎是气体质量流量控制器的好几倍，但目前国产的电动阀门的价格已经只是气体质量流量控制器的四分之一左右。

### 3. 成分、温度和真空压力三参量同时控制方案

在宝石生长专用的 CVD 和 MPCVD 工艺设备中，针对气体成分、温度和真空压力这三个控制参数，本文推荐一种全新的控制方案，方案如图 3-1 所示。

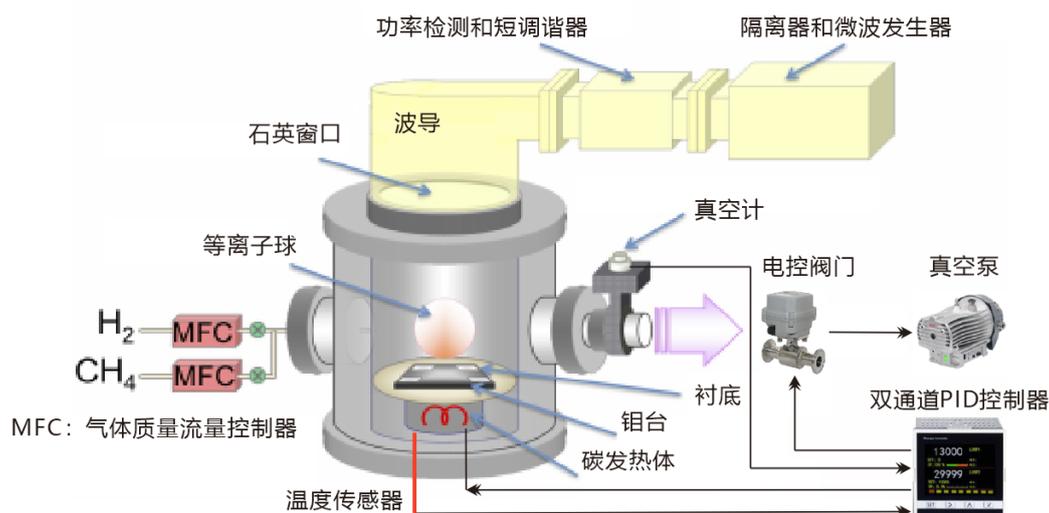


图 3-1 CVD 工艺设备中三变量控制结构示意图

控制方案主要包括以下几方面的内容：

- (1) 进气端采用气体质量流量控制器进行控制，每一路进气配备一个质量流量控制

器，由此实现进气成分的精确控制。

(2) 采用双通道 24 位高精度 PID 控制器对温度和真空压力控制进行同步控制，其中一个通道用于温度控制，另一个通道用于真空压力控制，由此在保证精度的前提下，可大幅度减小控制装置的空间占用和降低成本。

(3) 温度控制通道连接温度传感器输入信号和固态继电器或可控硅执行机构，可按照设定点或设定程序曲线进行温度控制，PID 控制参数可通过自整定方式进行优化。

(4) 真空压力控制通道连接真空计输入信号和电动阀门，同样可按照设定点或设定程序曲线进行真空压力控制，PID 控制参数可通过自整定方式进行优化。为了保证真空度测控的准确性，强烈建议采用薄膜电容式真空计，其精度一般为 0.25%，远高于皮拉尼计。最重要的是薄膜电容式真空计内部不带电加热装置，在氢气环境下更具有安全性。

(5) 双通道控制器除了具有两路控制信号主输入端之外，还有两路配套的辅助输入端，这两路配套的辅助输入端可用来连接温度或真空压力测控的备用传感器，在主输入端传感器发生故障时能自动切换到辅助输入端传感器继续进行测量和控制，这对较长时间的 CVD 和 MPCVD 工艺过程尤为重要。

(6) 双通道控制器可连接 4 个外部信号源，在进行两路独立变量的控制过程中，4 个外部信号源的组态形式可为控制和监测带来极大的便利，除上述备用传感器功能之外，还可以用来进行差值和平均值的监测等。

