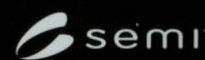


半 导 体 制 造

FABS, FOUNDRIES, CAPITAL EQUIPMENT AND MATERIALS

芯片制造, 半导体代工, 固定资产设备和生产材料



集成电路 功耗管理

晶圆清洗技术
面临的挑战
- 31页

CMP 耗材性质对抛光垫
使用寿命的影响
- 37页

超越瞬变气压
- 39页

共同开发 SiP 封装新技术
- 45页

材料：工艺控制

超越瞬变气压

作者：R. Mike McDonald, Advanced Energy

1960年代，在NASA（美国国家宇航局）的阿波罗登月计划开发过程中，流量控制器（MFC）应运而生，并且很快被研究人员发现了在当时刚刚萌芽的半导体制造行业中的应用。多年来，这项技术经历了在外观和性能方面的多种变化。从历时超过30秒才能完成一个监测点，同时还得忍受误差 $\pm 30%$ [1]的手工操作时代，发展到今天的快速、高精度、高可靠性、自动化、多功能的设备，MFC已经发生了巨大的变革。

推动MFC技术大规模应用于半导体行业的重要因素是最近被称为稳压式MFCs设备代的诞生，简称PIMFCs。顾名思义，这类设备最主要的优势在于能够不受气体传送线上气压变化的干扰。集成于板上的压力和温度传感器使得PIMFC能够提供显著的、革命性的流量控制能力。尽管随着整合式流量控制器概念的出现，针对压力传感器和温度传感器的研究已经历时多年 [2]，然而真正推动设备商业化的市场需求也是最近才出现的。

实时的压力监控加上对阀门的主动控制，使得PIMFC能够避免气体管路中的压力突变的干扰，压力突变的原因可能来自于交叉干扰（临近的MFC开启或关闭）、前端减压阀的压力突降或者气压脉冲，或者后端反应室的压力变化等。由于PIMFC将4个独立设备（平衡阀、压力传感器、稳定传感器以及MFC）的功能整合到了尺寸仅如一个传统的MFC大小的设备中，因此这种稳压能力实现了气体管路整体成本的极大改善，如图1所示。

正因为如此，PIMFC也带来了巨大的经济效应。显而易见，传统的压力平衡阀、压力传感器以及所有相关的基板、密封垫被取代对成本节约非常有意义，同时可靠性也得到了改善。不能即时显现的特性包括整合的压力传感器和温度传感器等所实现的性能改善是非常引人注目的。本文将探讨PIMFC这些衍生的特性。

MFC的最新发展趋势

MFC的供应商积极地开发了若干技术，主要是针对缩减成本，改善性能。三个关键的彼此依赖的成果包括多气体多范围（MGMR）、氮气（ N_2 ）校准以及稳压式流量控制器（PIMFC）。

MGMR有效地减少了实现全流量范围的MFC“尺寸”。为用户提供了配置设备的方法，实现了在任意流量范围和任意气体环境下的运转。在半导体行业应用中，MFC的流量范围从10sccms（标准毫升/分）到30slms（标准升/分）。毫无疑问，在设备容许的机械限度内这些设备都能够轻松地完成配置，实现宽泛的流量应用，这种情况下，只需要少量不同量程的MFC即可完成流量范围的全部应用。MGMR MFC制造商能够通过7到12种不同量程的MFC（取决于制造商的设计水平）满足上述的从10sccm（标准毫升/分）到30slms（标准升/分）的流量范围。而在典型制造环境下，采用单一的气体MFC实现多种气体和多种工艺过程下相同流量范围可能需要上百种不同的MFC。MGMR的多范围能力极大地减少了制造厂库存中需要的备品数量。

多气体技术更进一步地简化了MFC的应用。此前，MFC供应商在研发方面付出了巨大的努力，以便更好地理解不同种类气体在不同条件下的表现，同时将这一信息移植到MFC的控制逻辑中。目前，终端用户通过简单的软件即可轻松完成MFC的设定。这种可设定特性使得PIMFC能够被用于任意针对实际气体的测量和控制，同时无需增加成本和时间进行重新校准/调整。简言之，多气体和多范围技术有效地减少了终端用户所需的备用库存数量。

实际应用的局限性迫使MFC不得不使用安全的、相对便宜的替代气体来进行校准。大多数多气体MFC能够使用多种不同的替代气体进行校准，这些替代气体各自代表了拥有相似流量特征的气体“家族”。通常，

利用替代气体，经设备校准的真实气体流量的近似值可以通过校准气体和真实气体之间简单的比热 (C_p) 比来表示。多数多气体 MFC 仍然使用这种简单的标量方法来计算转换因数，即 CF；然而，由于工艺控制的需求不断吃紧，这种方法已经过于单纯了。 C_p 是非常适合表现压力和温度非线性特征的函数。而且，不同工艺气体和混合气体之间的依赖关系大不相同。业内已经开发出了成熟的模型来解决这些压力和温度之间的依赖关系。

当前的趋势是开发出仅使用氮气进行调配和校准的 MFC。由于实际操作中只需要一套调配和校准数据即可作用于所有的真实工艺气体，因此这种方法节约了制造成本和服务成本，并有效改善了一致性。尽管表面上看起来 MGMR 技术显而易见、步骤简单，但实际上这一技术关系到了从多种工艺气体单一气体的校准（测量）和调谐（某个设定点的响应时间）。

PIMFC 性能优势

由于增加了额外的压力和温度度量能力（参见图 2），在符合理想气体定律 $PV=nRT$ 的条件下，PIMFC 的所有选项都具备了可视性。更为重要的是，这一新功能使得已知的压力和温度依赖关系在关键的气体属性中得以补偿，如密度、压缩因数 (Z)、比热、粘度、热导率以及气化曲线等。由于很多气体存在量热和热缺陷，用来解决更高顺序效应的模型在以下三个重要领域获得了极大地改善：精度、响应速度和自我诊断能力。

精度：PIMFC 的精度改善得益于同时包括了补偿数据读取的气体模型，这些数据的读取另外也会受到压力和温度的影响。出于对精确流量深入了解的需求，MFC 制造商们使用测量特定工艺过程气体的温度和压力的设备，经过数年的测试和校准，已经积累了大量的专利数据。得益于 PIMFC 的发明，这些数据能够被用于质量流量模型的设计中，以补偿压力和温度的影响。

为了确认精度的改善，我们收集了产自不同供应商的一组传统 MGMR MFC，用以进行精度测试，测试条件为压力、温度、用户水平以及气体类型（氮 N_2 、氩 Ar 、氦 He 以及六氟化硫 SF_6 ）的变化组合。对相同数量的 PIMFC 单元进行相同的成套测试。测试结果如图 3 和图 4 所示。

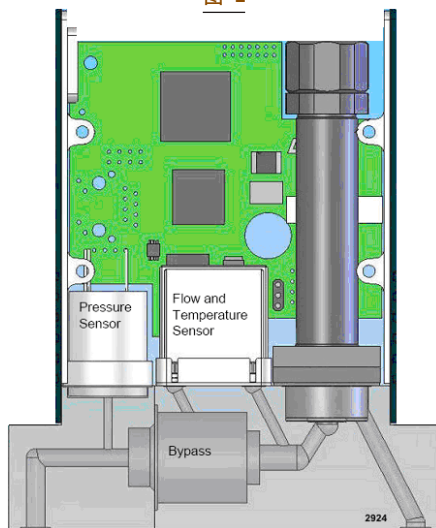
上述测试数据表明，传统 MFC 的 3σ 误差范围大于 1.5%，而 PIMFC 的 3σ 误差范围比 0.5% 还要低得多。PIMFC 中附加的工艺可视性使得其精度和可重复性更

图 1



PIMFC 简化了气体管路

图 2



PIMFC 结构

趋于完美。

响应速度：由于压力和温度对粘度和密度的影响同样能够用于调整控制校准参数，因此响应速度也得以提升。最新资料表明可以根据特定的工艺气体和操作条件来调整和优化校准参数。

由于新的工艺技术 [4] 需要更快的剂量配比以及兼容的、可度量的摩尔总量，因此在质量流量控制器中设置时间变得日益重要。最新技术的 PIMFC 提供了简单二进制阀门技术的可行选项，进而满足了诸如 ALD（原

子层沉积)工艺处理所需要的速度目标。

为了获取 PIMFC 技术速度性能改善的具体数据,同样使用了上述精确度测量中使用的设备来进行响应时间的系列测试。测试结果如图 5 所示。

其中一些传统的 MFC 无法达到自定义的 1.0 秒的设置时间规格。而 PIMFC 设备的设置时间远远低于 500 毫秒,平均响应时间在 350 毫秒左右。可以预见,对速度的需求将继续推动设置时间的改善。目前正在开发的设置时间目标是低于 100 毫秒。

自我诊断能力:自我诊断能力通过在 PIMFC 设备中增加额外的工艺信息而得以改善。国际半导体制造技术联盟 SEMATECH 的研究数据表明 70% MFC 故障检测结论是“MFC 无明显的问题”[5]。拆装或者替换 MFC 不仅费用高昂、消耗时间,而且在某些情况下可能是非常危险的。替换一套 MFC 可能会导致至少 2 个小时的停机、数万美元的生产成本损失[6]。PIMFC 所增加的工艺监控功能赋予了该系统执行以往不能进行的自我诊断评估能力,而且使得 MFC 制造商和工艺工程师们更快地找到根本原因。

举例说明,新的压力和温度传感器使得 PIMFC 能够完成热流量传感器精度的连续评估。压降、 dP_2 、跨 MFC 的控制阀构成了以一个方程式近似表达的模型,该方程式可能是根据经验值定义的,取决于下列变量:

$$dP_2 \sim f(VVH, P, T, \dot{m}, gas_type)$$

其中 VVH 是阀门电压的历史值,代表了控制阀中已知的磁滞。

如果 dP_2 值近似,那么可以通过已知的处理方法或者下游压力(通过软件配置供应给 PIMFC 的),根据以下计算公式来获取某个气体的质量流量近似值:

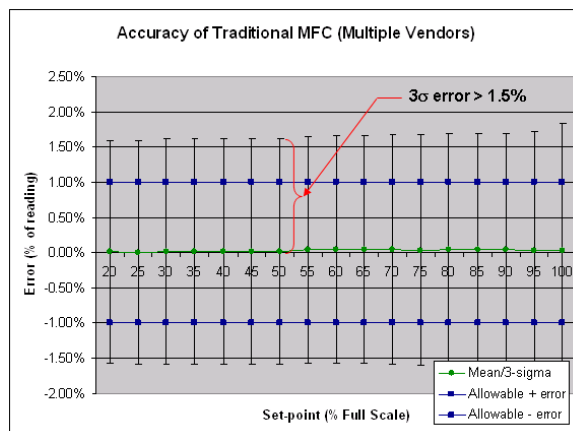
$$\dot{m} = \frac{C(Re) * dP_1 * \rho(T, P)}{\eta(T, P)}$$

其中 dP_1 是流量传感器和旁路组件的压降。计算公式假定为层状流量,是雷诺数的函数,Re 代表的是每个 MFC 制造商所设计的进气门、旁路组件以及流量传感器规格等的独特属性。校准函数 $C(Re)$ 取决于阀门尺寸、构造和模型的经验值。

近似的质量流量可以通过图 6 所示的流量传感器测量以获得更精确的流量值。

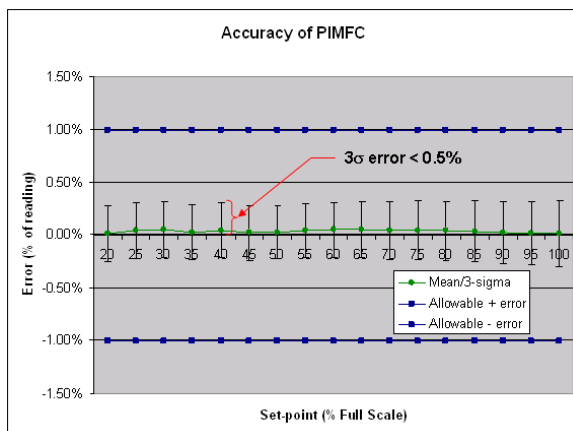
对于某种气体或混合气体,方程式中 CF 与前面讨

图 3



压力、温度、用户水平以及气体类型的变化组合条件下 MFC 的精度特征

图 4



压力、温度、用户水平以及气体类型的变化组合条件下 PIMFC 的精度

论的 CF 相同,函数由气体类型、检测电压、压力、温度以及其它与传感器和旁路设计相关的参数组成。此外,这些复杂的模型随 MFC 制造商和型号的不同而变化。

\dot{m} 是通过温度传感器、压力传感器以及阀电压获得的,能够实现持续的监控,并能够与通过热流传感器测量获得的质量流量相比较。由于传感器漂移引起的误差可以通过这一比较获知,并传送到设备控制器,以便尽早通告。而且,如果怀疑 PIMFC 可能存在问题,便可以启动特定的自我诊断,通过压力和温度评估设备的状况,避免替换掉运转正常的 MFC,从而实现了设备制造商和最终用户的成本节约。

总结

毫无疑问，成本节约推动了 PIMFC 技术研发的投入，这种成本节约是通过气体管路中系统需求的压力校准来实现的，已经被证明的其它衍生优势包括改善了精度、缩短了响应时间、以及自我诊断能力的提升。总而言之，在设计规范不断紧缩的半导体制造领域，PIMFC 技术将提高工艺过程的控制能力，并能够促进高级工艺过程的开发。

R Mike McDonald 是 Advanced Energy 公司流量工程部主管，主要负责半导体工艺流量输送技术的开发，包括 AE 最新的压力敏感 MFC 产品等。

McDonald 在 Utah 大学获得电子工程学位。

参考文献

[1] Missing Critical Capabilities in MFCs needed to allow Advanced Process Control, FuGacity, WW White, in "Future Fab Intl. Volume 9", January 2000.

[2] Intelligent Mass Flow controller, Richard L. Anderson, Sematech, Inc., US Patent 5,062,446, November 5, 1991

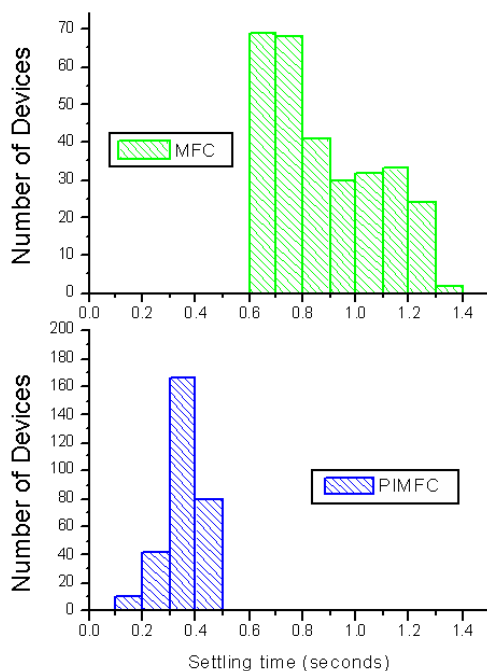
[3] Going With the Flow, Hank Hogan, Gases and Technology, November/December 2002.

[4] Fast-Switching Valves for High-Productivity ALD, William Glime, Swagelok Co., Solon, Ohio; Tom Seidel, Genus Inc., Sunnyvale, CA, Semiconductor International, 9/1/2005.

[5] SEMATECH Technology Transfer Document #93021493A-TRG, 1993.

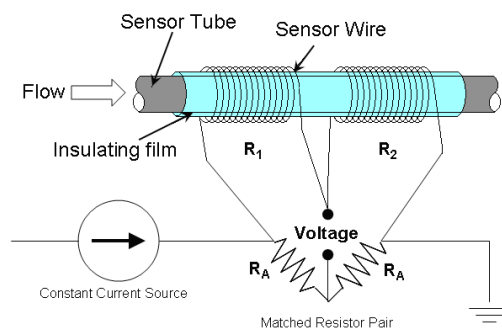
[6] Squeezing In More Capability, Youfan Gu, Steve Sexton, Brady Cole, Don Higgins, William Holber, Xing Chen, Robert Wadja, Dave Lafleur and Dick Jacobs, MKS Instruments, Semiconductor International, 3/1/2002.

图 5



传统 MFC 与 PIMFC 之间设置时间的比较

图 6



流量传感器模型