

纳米级制造时代： 高纯度化学品输送守护工艺良率

阿迈得® E2.0系列气动双隔膜泵应对不断缩小的工艺节点和日益严格的污染容差挑战

2026年5月

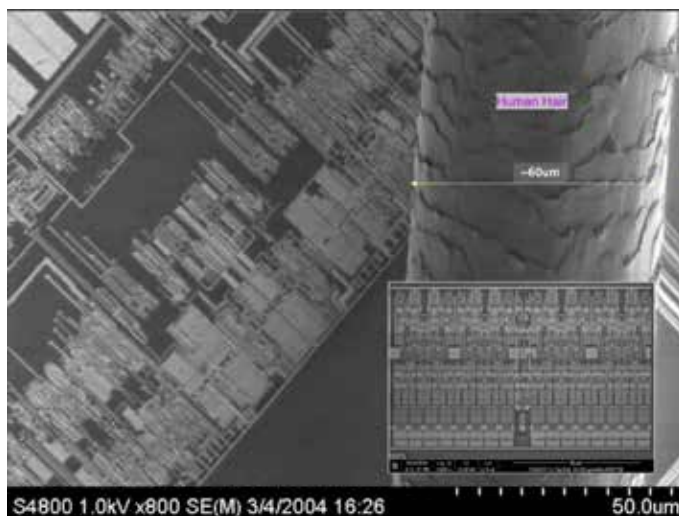
作者：Bruce Xu



简介

半导体制造已进入尺寸公差以个位数纳米计量的时代。在10纳米、7纳米、5纳米及更先进的工艺节点，器件结构比人类发丝直径（约40至120微米）小数千倍。在此尺度下，传统检测手段无法识别的颗粒物，都可能造成图形缺陷、引发电气故障，甚至导致灾难性的良率损失。事实上，据国际半导体技术路线图（ITRS）统计，仅晶圆表面污染一项，就可能占总体良率损失的70%。

随着工艺节点和器件结构不断缩小，污染控制的难度呈指数级上升。在这些要求严苛的制程中，气动双隔膜泵（AODD泵）在控制污染方面扮演着关键角色。如今，专为高纯度性能设计的AODD泵，对保障半导体产线的运行可靠性、工艺可重复性和良率保护，比以往更为重要。



无形精度：芯片电路结构与人类发丝的尺寸对比

本白皮书探讨了先进AODD泵如何通过工程设计，应对新一代半导体化学品输送中因工艺节点缩小和污染容差收紧所带来的挑战。

挑战

几十年来，AODD泵凭借高效可靠的运行，一直是半导体制造中流体输送的可靠选择。它的工作原理是：压缩空气交替充入由传动轴连接的两个隔膜背侧气室，推动隔膜往复运动；一侧隔膜前推排出流体，另一侧后缩吸入流体，如此交替形成平缓的正排量输送。该泵具备自吸、可干运行、无动态轴封等特点，工艺流体与气动机构和机械部件隔离，有助于保持化学介质纯度，降低污染风险。

然而，尽管有上述优点，半导体化学品输送系统对泵的要求已超出传统工业级AODD泵的设计能力。光刻胶、溶剂、酸液、蚀刻剂等流体必须以超高纯度输送，微量污染物就可能损害晶圆良率、损坏设备或引发高成本停机。面向通用化学品输送的工业级AODD泵，在超洁净环境中往往力不从心，其材质、表面光洁度和结构构型并未针对污染敏感型工艺进行优化。

常见的难点包括：

- **污染风险** – 金属磨屑、颗粒脱落和化学残留物堆积，会将杂质引入敏感工艺。
- **运行不稳定** – 流量脉动和压力波动可能导致工艺波动和药液定量加注不一致。
- **污染风险** – 金属磨屑、颗粒脱落和化学残留物堆积，会将杂质引入敏感工艺。
- **运行不稳定** – 流量脉动和压力波动可能导致工艺波动和药液定量加注不一致。

制造方法：五轴CNC精密加工

为满足纳米级制造的日益增长的需求，部分AODD泵制造商近年来开发了更精密的加工方法。因为泵体零部件的质量与泵本身的设计同等重要。表面缺陷、几何尺寸不一致或刀具加工残留纹路，都可能造成颗粒物产生、化学介质滞留和污染，进而影响晶圆良率或引发停机。

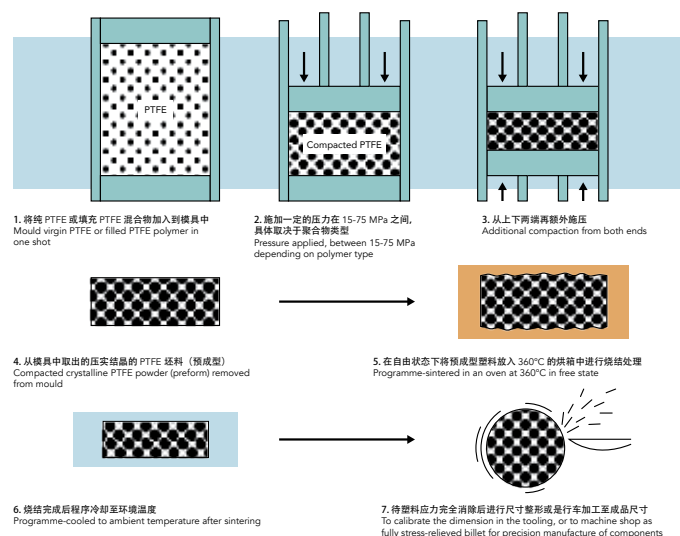
传统加工工艺会引入波动，这在纳米级公差下问题愈发突出。多次装夹会产生对中偏差，导致表面过渡粗糙、形成凸起棱边或微观凹腔，成为颗粒物的积聚点。频繁换刀和操作增加了碎屑嵌入关键过流浸润面的可能性，提高污染风险。内部几何形状不一致还会增加清洗、灭菌与工艺验证的难度，最终影响工艺可重复性。

对关键过流浸润部件采用五轴CNC精密加工，可直接应对这些挑战。该方法能以更少的装夹工序加工复杂的内部几何形状，最大程度减少传统多步骤加工中常见的重复夹持与二次定位。换刀次数和操作减少，表面瑕疵的出现概率随之降低。连续、均匀光滑的内表面和平滑过渡的流道降低了颗粒滞留风险，一致的表面状态提高了可清洗性，并为要求严苛的半导体应用提供了可靠、可重复的化学介质输送。

凭借高度均匀且可预测的内部几何形状，AODD泵可帮助半导体制造商保持工艺完整性、减少污染事件并最大化产能，将精密加工转化为对良率和运行效率的直接贡献。

材料选择：高纯度PTFE过流浸润系统

在高纯度半导体加工中，过流浸润部件必须耐受腐蚀性化学品、保持尺寸稳定性并产生极少的颗粒物。因此，AODD泵采用来自全球领先供应商的高纯度PTFE制造过流浸润部件，至关重要。PTFE对多种强腐蚀性化学介质呈化学惰性，即使在其熔点以上也不会变形，是超高纯度应用的理想选择。



由于PTFE在熔点以上不流动，无法采用传统熔融成型工艺加工。其部件制造需经过专用成型与烧结工艺：超细粉末原料经模压成型为预成型坯体，再经高温烧结——类似粉末冶金——使颗粒熔合成致密、机械性能稳定的结构，满足高纯度半导体应用需求。

烧结后，通过精密加工获得最终几何形状，生产出具有平滑流动表面和化学兼容性的内表面。

这种方法可确保：

- 高材料纯度，不含污染物
- 优异的耐化学性，耐受腐蚀性介质
- 结构稳定性，保障长期运行可靠性
- 良好的可加工性，适用于精密表面精加工和清洗

将材料选择与精密制造相结合，AODD泵能最大限度地降低污染风险并保持工艺可重复性，这是半导体制造中的关键因素。

结构设计

运行稳定性

传统泵设计中，机械结构不稳定和密封受力不均，可能导致隔膜疲劳老化、泄漏和颗粒物产生——这些均威胁工艺一致性和晶圆良率。

结构优化的AODD泵设计，通过增强机械稳定性、密封完整性和安装适配性来应对上述风险。



优化的结构刚性和先进的连接方式减少了运行振动，将振动峰值幅值降低约20%。这种降低减轻了关键部件的疲劳应力，支持连续运行工况下的长期系统可靠性。环箍紧固式泵壳通过在隔膜密封端面均匀分布夹紧应力，进一步提升性能，增强扭矩耐受度，同时降低反复循环中泄漏或隔膜损坏的可能性。此外，标准化底部吸液口和顶部出液口布局，促进高效排液和工艺兼容性；可配置的中间泵体使泵能适应安装空间限制，而不牺牲结构完整性或性能。

这些结构增强功能共同最大限度地降低了运行风险，延长了设备使用寿命，并确保了在高纯度半导体化学品输送应用中性能的一致性。

人性化优化设计

用于高纯度半导体工艺的AODD泵，必须兼顾工艺完整性和操作员效率。过高的维护复杂度、搬运困难和不良的人体工程学设计，会延长维护时间，增加污染暴露风险，并提高洁净室内操作失误的概率。采用人性化设计原则的泵，有助于减轻这些风险，同时强化洁净室作业规范和运行可靠性。

免工具旋转排液结构可实现更快、更彻底的清洗，减少维护时间，最大程度减少操作人员与关键过流浸润区域的接触。集成的双侧一体式操作抓手，在安装或维护期间提供稳固抓握和可控搬运，降低意外撞击或误操作的风险。加固防护包装在安装前保护精密加工部件，避免运输和搬运过程中的磕碰损伤，从源头维护表面完整性。二维码追溯标签通过简化文档记录、检查和审计合规要求，加强质量管控，支持半导体制造所需的严格验证标准。

这些功能简化了日常维保，降低了搬运风险，并支持半导体化学品输送操作中至关重要的污染管控规范。

解决方案

阿迈得E2.0系列AODD泵，作为都福集团旗下百士吉（PSG）的产品品牌，依托数十年隔膜泵技术研发积累和市场反馈，针对高纯度环境优化了性能。通过五轴CNC精密加工、高纯度PTFE过流浸润系统和优化的结构设计，E2.0系列专为满足纳米级半导体化学品输送对极高纯度、安全性和可靠性的要求而设计。

E2.0系列在AODD工作原理基础上，通过先进材料、精密制造和结构优化进一步精进。一体式PE或PTFE泵壳、带金属芯隔离结构的无压板隔膜、以及外部无金属结构设计，防止工艺介质与结构部件接触，从而保护高纯度化学品。免维护的PERSWING P®气动控制系统消除了死点停滞，同时实现平稳的隔膜驱动动作，减少脉动，即使在工况波动下也能确保稳定的流量和压力。

结构创新还包括中间块一体式结构、壁厚优化设计、法兰连接接口和环箍紧固结构，增强了机械完整性和长期尺寸稳定性。升级的紧固件材料提高了抗蠕变性能，支持在延长维保周期内保持一致的密封性能。模块化结构、内藏式拉杆和人性化操作结构简化了维护，同时最大程度减少过流浸润表面的暴露，降低停机时间和污染风险。这些设计进步共同实现了：

- **最小化的污染风险** – 完全惰性的过流浸润材料、隔离的隔膜结构和精密表面，防止颗粒物产生和化学品降解。
- **增强的运行稳定性** – 平稳的气动驱动隔膜运动、脉动抑制选配方案和优化的流体流道，确保不同工艺条件下的一致输送。
- **改进的可用性和可维护性** – 模块化架构、免维护气动控制及易于操作的维护功能，减少停机时间并保护关键表面。

凭借平缓的正排量输送、无级气动流量调节以及安全处理强腐蚀性、高纯度化学品的能力，E2.0系列为半导体制造提供了一套稳健、抗污染的泵送方案。

结论

随着先进工艺节点不断缩小至个位数纳米制程区间，工艺纯度、运行稳定性和系统集成可靠性成为影响良率和产能的关键因素。在这些高纯度环境中，AODD泵在通过化学流体输送控制污染风险方面发挥着更为重要的作用。

应用案例研究

高纯度电子化学品中央集中供应系统

在先进半导体制造设施中，集中式电子化学品供给系统负责存储、温控调节、计量输送，并将超高纯度工艺化学品分配至晶圆厂内的多个机台。这些系统是湿法工艺的基础，其中污染控制和流量稳定性直接影响缺陷密度和良率。

挑战

集中供应环境对性能和纯度提出严苛要求。传统泵技术可能通过颗粒物产生、弹性体老化降解、金属离子污染或不稳定的输送行为引入风险。



关键运行挑战包括：

- 维持超低颗粒与离子污染指标
- 确保与强腐蚀性电子化学品的兼容性
- 在并联泵组阵列中实现稳定、可重复的性能
- 支持可预测的流量，用于计量、批量供液和分配输送
- 在不影响洁净度的前提下，实现安全、快速的维护
- 集成到封闭机柜和二次防泄漏围护系统中

阿迈得E2.0系列AODD泵的优势

在集中供应架构中，阿迈得E2.0系列可安装在密封机柜系统中，支持连续式和批量式化学品输送，同时保持工艺纯度。



性能优势包括：

- 通过惰性PTFE过流浸润部件和全非金属流道，实现污染控制型输送
- 并联泵之间流量一致，支持均衡供液回路和设备冗余设计
- 平滑内部几何形状最大程度减少颗粒物捕集和介质滞留死区，保持高纯度
- 在不间断连续运行和波动需求下具备运行弹性
- 易维护结构设计，允许在不干扰关键过流浸润表面或机柜洁净度的情况下进行维护

通过将化学惰性与可重复的流量性能相结合，E2.0系列先进的隔膜泵设计在集中式化学品输送系统中同时保障了纯度保证和运行可靠性。

化学品分配系统（CDS）集成

化学品分配系统（CDS）将电子级化学品从日供储罐或小型药液桶输送至紧凑、高度受限机柜空间内的机台使用端设备。这些系统必须在由机台工艺配方驱动的动态供液需求和频繁启停条件下，保持化学介质的纯度完整性。



挑战

CDS安装存在独特的机械与运行工况限制，可能影响泵的可靠性和污染控制。

常见挑战包括：

- 由间歇性机台供液需求驱动的频繁启停循环
- 有限的机柜空间和垂直安装高度限制
- 快速循环或低吸入压头工况下的气蚀风险
- 可能导致污染风险增加的药液残留
- 在低流量和中等流量下保持一致的输送

E2.0系列AODD泵的优势

E2.0系列AODD泵的优势

性能优势包括：

- 可靠的自吸性能，确保药液桶更换后正常启动
- 频繁循环期间流量稳定，支持可重复的机台性能
- 通过优化的隔膜驱动动作和流体动力学设计，降低气蚀风险
- 极低的药液残留（得益于五轴CNC精密加工），降低污染和不同药液交叉污染风险
- 紧凑的占地结构，可在高密度机柜布局中安装

凭借精密的工程设计、紧凑的设计和一致的流量控制，E2.0系列确保可靠、低污染的化学品输送，同时在紧凑的CDS环境中最大程度延长设备正常运行时间。

通过创新设计和工程，AODD泵已准备好迎接纳米级制造时代的需求。高纯度PTFE过流浸润部件确保化学惰性，同时最大程度降低颗粒物产生风险。五轴CNC精密加工提供一致的内部几何形状，提高可清洗性并减少污染陷阱。减振结构设计增强运行稳定性，支持敏感应用中的工艺一致性。人性化的可用性增强功能促进更安全、更高效的维护，有助于保障设备性能和正常运行时间。

AODD泵专为在广泛的高纯度半导体应用中运行而设计，例如集中式化学品供应系统和紧凑的CDS装置，全面支持污染控制、工艺可重复性和系统可靠性。随着公差收紧和工艺复杂性增加，先进的AODD泵技术——例如阿迈得® E2.0系列——对于保护良率和支撑半导体制造的持续进步将愈发重要。

关于作者

Bruce Xu是百士吉亚洲的产品经理。可通过邮箱bruce.xu@psgdover.com与他联系。百士吉亚洲是泵、计量与定量输送解决方案的领先供应商，在性能和可靠性至关重要的应用中，实现关键与高价值流体的安全、高效输送。百士吉亚洲服务于广泛的行业客户，致力于通过创新解决方案和以客户需求为核心的服务理念，帮助企业提高效率、降低能耗并克服复杂的流体输送难题。百士吉亚洲隶属于都福集团旗下的百士吉（PSG）。了解更多信息，请访问psgdover.com.cn。