如何通过 N_2 吹扫系统改善能效，降低二氧化碳排放

半导体制造商面对要求降低能耗和二氧化碳排放的压力越来越大。在晶圆厂中有个用到氮气 (N_2) 的区域可以轻松做到改善，挖掘节能潜力。本白皮书介绍了以下内容:

- 深入探讨 N_2 在半导体晶圆厂中的作用，包括其在清除前开式晶圆传送盒 (FOUP)中的作用
- 大型半导体晶圆厂中 N_2 吹扫碳足迹的评估
- 基于压电原理的流量控制技术的特点和优点概述
- 基于压电原理的 N_2 吹扫系统的成本节约、能源节约和碳排放减少分析

© Copyright 2023, Festo Corp.

在氮气吹扫系统的设计中使用压电阀技术可以获得许多好处，包括可将碳排放量减少至多4%，以大型半导体晶圆厂为例。

随着对更小、更复杂的电子产品的需求持续激增，半导体制造商现在必须在惰性或非活性环境中运营。通常，他们可以通过用超高纯度（UHP）、无颗粒氮气冲洗晶片盒或前开式晶圆传送盒（FOUP）和其他生产设备来实现这些环境。由于现今技术已能够从空气中大量分离氮气，所以这种保护措施几十年来一直是行业标准。氮气吹扫曾经在氧化敏感层上少量使用，现在由于晶片上极小的光刻特征和原子层材料厚度，在整个制造过程中广泛使用。然而，生产超高压氮气所涉及的压缩和冷却过程消耗了大量能量，以便将氮气与氧气和其他微量气体分离。

所有半导体制造商都面临着越来越大的压力，要求他们减少能源消耗和二氧化碳（CO_2）排放。推动实现碳中和的和减少二氧化碳对气候的影响是一项涉及所有制造业部门的巨大国际努力，这项努力被认为是人类有史以来最重要的努力之一。然而，实现气候科学家和联合国制定的目标对任何行业来说都不是一件容易的事，更不用说半导体制造商了。

由于制造过程具有高度精确和复杂的性质，数百种气体和化学品在数百个工艺步骤中发挥着作用，如薄膜沉积、涂层、化学机械抛光（CMP）、光刻、计量、烘干和蚀刻等。使这些挑战更加复杂的是，制造商必须跟上全球市场的需求，预计到2029年，全球市场将达到13800亿美元。除了全球消费电子产品的爆炸性消费外，这一增长还与先进计算应用的发展有关，包括人工智能、物联网和机器学习技术。

对于普通制造商来说，跟上如此巨大的需求——同时在不断缩小的芯片上植入更多晶体管，保持产量并开发更先进的半导体制造技术——可以让减少能源和碳排放看起来像是事后才想到的。

幸运的是，晶圆厂中有一个可轻松做到改善的区域，可以实现巨大的节能，这个区域中大量使用氮气（N_2）——半导体制造过程中使用最广泛的介质。

分析 N_2 吹扫的碳足迹

在半导体制造中的许多作用中，氮气用于吹扫 FOUP，为晶圆从一台机器搬运到另一台机器进行处理时创造一个受控、无污染的环境。在大型半导体晶圆厂中，氮气的消耗量可以达到每小时50000立方米。此外：

欧洲工业天然气研究所的一项研究表明，在一个典型的空气分离厂，每吨液态 N_2的氮气生产需要549千瓦时。纯气制氮技术可以用大约一半的输入电力（即275千瓦时）生产相同体积的氮气。

在美国，电力行业所有能源的发电量为4.01万亿千瓦时，导致二氧化碳排放量为15.5亿吨，相当于每千瓦时约0.85磅的二氧化碳排放量。当外推到配备空气分离系统的大型半导体晶圆厂时，这些每千瓦时的排放量约为每年5.8 x 104公吨二氧化碳。

这些数字为支持半导体晶圆厂的能源、经济高效的现场氮气发生器（空气分离装置（ASU））提供了理由。这些系统在现场提供具有小于十亿分之一（ppb）杂质的超纯气态和液态氮。主要的工业天然气供应商继续提高 ASU 的效率，但热力学定律规定这永远不会是一个“低能耗”的过程。

知道了这一点，我们必须明智地使用产生的氮气，小心将浪费降至最低。仔细分析晶圆厂中使用氮气的区域并最大限度地减少使用，可以在短时间内节省大量资金。一个这样的领域是 FOUP 吹扫，它被证明有许多可能的机会通过闭环控制的主动计量来明智地使用氮气。压电吹扫阀可以满足其中的一些需求，并且它们以极低的功率运行，使其成为生产线中的便携式解决方案。事实上，简单地部署这样一个系统已经被证明可以每年将大型晶圆厂的氮消耗、相关能源使用和二氧化碳排放量减少4%（见侧栏）。

通过高效率 N_2 吹扫系统降低 CO_2 排放

考虑到大型晶圆厂的氮消耗量达到每小时50000立方米，每千瓦时排放约0.85磅二氧化碳，我们可以计算出配备典型空气分离系统的晶圆厂每年生产多少公吨二氧化碳：

50,000 m^3/小时 x 8,760 小时/年

= 438 x 10^6 m^3/年 N_2

= 547,773 公吨/年 N_2

x 275 kWh/公吨 N_2 (空气分离系统)

= 1.50637 x 10^8 kWh/年

使用以下等式，我们可以计算一个晶圆厂每年制造氮气的成本（以美元计）：

<u>$0.06/kWh 时的成本:</u>

$0.06 x 1.506 x 10^8 = 9.038 x 10^6 USD, 或 $9 百万

<u>$0.10/kWh 时的成本:</u>

$0.10 x 1.506 x 10^8 = 1.506 x 10^7 USD, 或 $1500 万

x 0.85 磅 CO_2/kW

= 1.2804 x 10^8 磅 CO_2/年

= 5.808 x 10^4 公吨 CO_2/年

现在，使用这些值，我们可以计算基于压电的 N_2 FOUP 吹扫系统提供的成本节省。如果使用受控流量，则每个 FOUP 可以从 20 nl/min降低到 5 nl/min:

15 升/分钟 x 60 分钟/小时 x 24 小时/天 x 365 天/年

= 7,884 m^3/年 N_2

= 9.86 吨/年 N_2

x 275 kWh/吨

= 2,711 kW/年

这些N_2吹扫系统不仅显著减少了CO_2排放，而且还降低了制造氮气所需的成本，每年可节省6至10美分/kW:

<u>$0.06/kWh 时，每个 FOUP 节省的成本:</u>

$0.06 x 2,711 = 163 美元/FOUP/年

<u>$0.10/kWh 时，每个 FOUP 节省的成本:</u>

$0.10 x 2,711 = 271 美元/FOUP/年

x 0.85 磅 CO_2/kWh (基于 2020 年美国平均值)

= 2,304 磅 CO_2/FOUP/年

所以，CO_2 减排量 = 1.045 公吨 CO_2/FOUP/年

© Copyright 2023, Festo Corp.

基于压电原理的节流技术优势

与包含电磁阀的流量控制系统相比，使用压电技术的N_2吹扫系统具有更高的精度、更低的功耗和更高的能效。它们还提高了前端制造流程的能源效率，提高了整体可持续性，并有助于实现企业可持续发展目标。

N_2吹扫系统释放了这些好处，因为压电阀的设计将导致磨损的颗粒尺寸限制在约0.1微米（µm）。该值是N_2吹扫系统每个切换循环的峰值颗粒尺寸，比传统N_2吹扫体系的值小了大约五倍。通过防止摩擦磨损，压电技术还延长了阀的使用寿命，节省了大量的操作和维护费用。

除了采用压电阀技术外，最有效的N_2吹扫系统还包括以下特征和特性:

- **闭环控制。**该功能确保了准确、稳定和线性的流量，而不会出现滞后现象。例如，Festo N_2吹扫系统的重复精度额定为设定值的+/-0.25%。
- **防泄漏。**流量控制系统应紧凑，并尽量减少连接数量。例如，只有两个气动连接的系统将显著降低泄漏风险。这种系统的功率需求小于1瓦，与比例流量调节阀相比，能耗也降低了约80%。
- **节省空间。**寻找预装配的流量调节阀，以适应许多半导体生产区域的空间限制性质。接收一个预装配的功能单元，而不是几个单独的组件，意味着您还可以节省组装和气管成本，最大限度地减少测试时间，并消除不锈钢气管和配件的额外费用。

一个大型晶圆厂有大约20000个带有N_2吹扫的FOUP存储空间。如果我们假设最低入住率为50%，那么我们需要计算10000个空间。1年的费用是:

<u>$0.06/kWh 时每个晶圆厂节省的成本:</u>
10,000 x $163 = 1.63 百万美元/年

<u>$0.10/kWh 时每个晶圆厂节省的成本:</u>
10,000 x $271 = 2.71 百万美元/年

每个晶圆厂 CO_2 减排量 = 10,000 x 1.045 = 1.045 x 10^4 公吨 CO_2/年

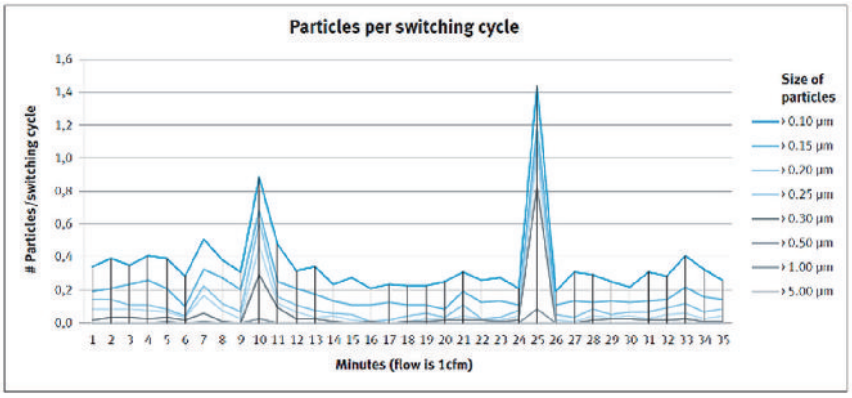
考虑到大型晶圆厂每年产生5.8 x 104公吨的二氧化碳，而基于压电的N_2吹扫系统每年可节省1.05 x 104公吨二氧化碳，我们现在可以计算出与这些先进吹扫系统相关的总减排量:

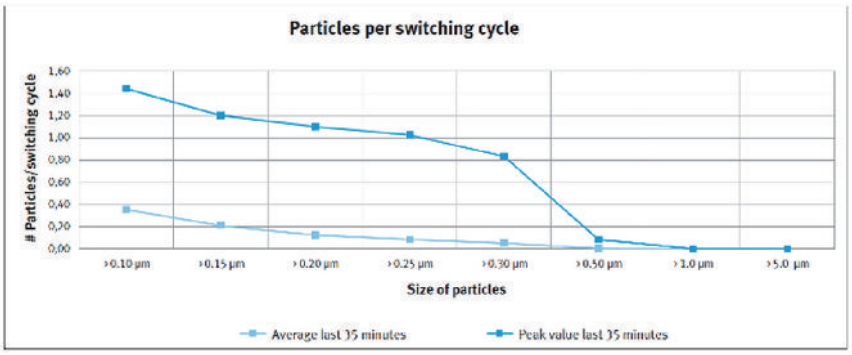
$(5.8 \times 10^4 - 1.05 \times 10^4) / (5.8 \times 10^4) = 82\%$,
或每年 CO_2 减排 18%。

成本节约在相同的范围内：氮气使用成本降低18%。

© Copyright 2023, Festo Corp.

Festo N_2 吹扫系统概览图





Festo N_2 吹扫系统每次切换循环的颗粒

© Copyright 2023, Festo Corp.

N_2 吹扫系统工作原理

利用节能压电阀技术的流量控制系统的一个例子是 Festo N_2 吹扫系统（见图1）。该流量控制系统由一个双向比例阀和集成流量传感器组成，是单个FOUP存储和缓冲空间的理想选择，其集成电子设备包括以下内容:

- 电源
- 压电陶瓷片的高压技术
- 传感器稳定、高精度控制回路
- 压电比例调节阀 — 如，Festo VEMR

在氮气吹扫过程中，电子系统连续控制与设定值一致的流量。压电阀确保在阀的整个使用寿命内，可重复、准确的流量高达25正常升/分钟（nl/min），短期内可能高达30 nl/min。用户可以使用额外的压力传感器监测FOUP出口处的压力。例如，Festo的SPAN在10千帕（kPa）范围内工作，具有出色的可重复性、远程零点设置功能和IO接口兼容性，可轻松集成到生产线中。为了改善氮气分布和晶圆保护，一些FOUP甚至在一个入口之外还包含了几个出口。

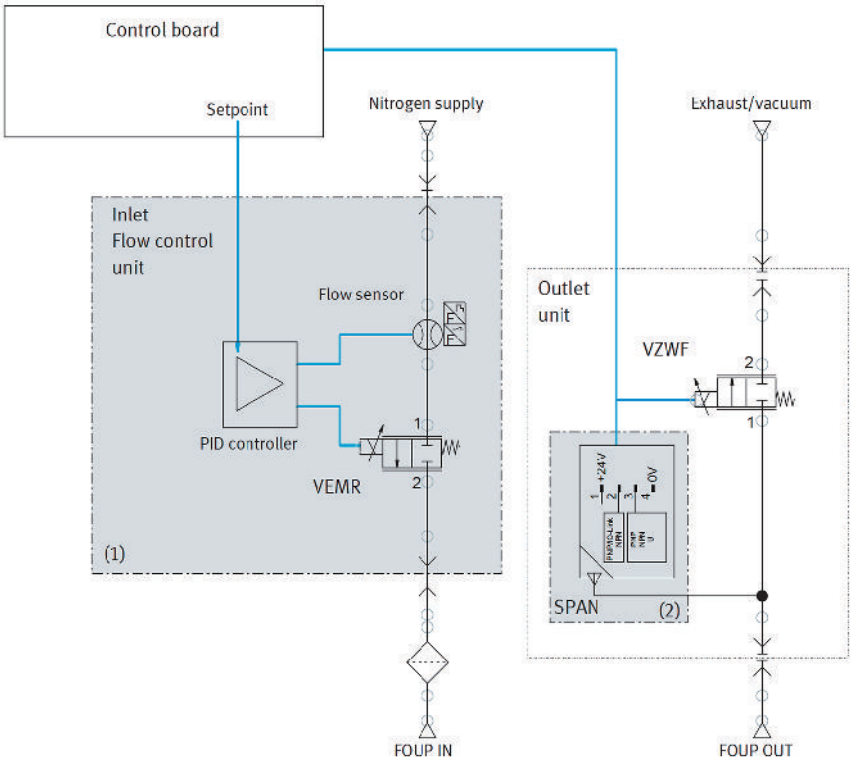
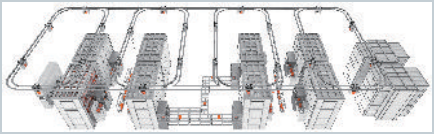


图1: Festo N_2 吹扫系统功能回路图，带 (1) N_2 流量控制器和 (2) 采用 SPAN 传感器的输出解决方案。

FOUP 设置示例

在工艺步骤之间，由于有害颗粒、挥发性有机化合物、氧气和湿度而导致不必要的晶片反应的风险更高，并且这些条件可能导致表面缺陷。使用N2吹扫系统可以降低这些风险，并消除有害的亚微米级污染物。氮气是干燥和不可燃的，它还可以置换任何氧气，防止不必要的氧化反应并保护产量。

在一个典型的半导体晶圆厂（见下图）中，FOUP 存放硅片后，运输通过数百个工艺步骤。自动物料搬运系统，如高架升降运输（OHT）系统，可提升和降低FOUP以接近机器。在步骤之间，FOUP存储在特殊的洁净室货架中，如储料器和缓冲器，这些货架安装在OHT导轨上，以最大限度地减少设备占地面积。



前道系统概览

除了FOUP, 前道系统还包括一辆OHT车辆, 用于传送FOUP, 以及用于存储的侧轨缓冲器（STB）和储料器。

© Copyright 2023, Festo Corp.

从今天开始节能减排

N_2 吹扫系统在半导体制造、储存和运输晶片的同时防止不必要的反应和表面缺陷发挥着关键作用。最好、最有效的系统将采用创新的压电阀技术，带来以下好处：

- 总拥有成本低
- 可靠、简单、高精度 — 迟滞
- 能耗低
- 结构紧凑
- 几乎无泄漏
- 使用寿命长

然而，最值得注意的是，这些阀解决方案有助于实现更节能、更可持续的制造业运营——每年减少多达4%的排放。这些系统提供了一种非常简单的方式来应对当今市场的许多挑战，同时创造一个更环保、更可持续的未来。

详情，请访问: www.festo.com/semiconductor.

压电技术是什么？

压电阀包含一个压电元件，这是一种机电转换器，可以将压力、拉伸应力或加速度等机械力转换为可测量的电压。当施加电压时，这些元件也会变形，产生机械运动或振荡。根据应用情况，您可以使用各种类型的换能器来利用这种效果，如弯曲器致动器、圆盘换能器或堆叠换能器。

气动阀通常集成弯曲执行器。在这种情况下，阀的性能取决于电场的强度：强度越大，性能越好，反之亦然。由于其电容原理，压电阀几乎不需要任何能量来保持活动状态，从而消除了有害的热量产生。

与电磁阀相比，这些阀有几个优点。它们在发生故障时不会点燃，适用于危险环境。它们还可以达到小于一微秒的切换速度，使其非常适合闭环控制系统。压电阀重量轻，通常采用塑料外壳，避免使用铁或铜等重型材料。而且，它们由单个固态工作部件组成，最大限度地减少了受到摩擦和磨损的零件数量。

发行/作者:
Charles Bowers
自动化技术工程师,
Festo Corp.
www.festo.com

© Copyright 2023, Festo Corp.