

关于半导体洁净厂房工艺废气治理的研究

杨超¹ 陈荣华² 齐文杰³

中国电子系统工程第二建设有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 半导体制程工序产生的各类废气, 会危害人体健康、恶化大气环境并影响企业的日常工艺生产。本文从8英寸功率器件工艺废气的产生危害、图纸的设计、现场实施优化和洗涤塔和沸石转轮+RTO焚烧设备运行原理等内容进行分析总结。

关键词: 功率器件; 工艺废气; 洗涤塔; 沸石转轮+RTO焚烧系统

引言

随着我国新一代移动通信、物联网、新能源等高新技术的不断发展, 半导体行业尤其是功率器件半导体的应用大幅增长。半导体生产的制程工序, 会产生很多对生产工艺和大气环境有严重危害的污染气体, 如何妥善处理芯片制作中的工艺废气, 是半导体行业建设中不可忽视的重要环节。本文针对酸性、碱性及有机废气, 从废气的产生、废气处理系统的设计、现场BIM优化、废气处理设备的运行原理等方面进行了详细的研究, 为半导体厂房工艺废气系统的设计、实施和控制方面提供建议与帮助。

1 工艺废气的来源及危害

1.1 功率器件的生产工艺流程

- (1) 通过热氧化、物理/化学气相沉积等成膜工艺, 在硅片表面形成一层薄膜。
- (2) 使用光刻技术将掩模上的图像转移到形成的薄膜上, 之后使用刻蚀技术在薄膜上形成需要的器件图形或掺杂通道。
- (3) 通过离子注入或高温扩散的方法进行器件加工和线路连接, 形成半导体PN结, 最后进行包装出库。

1.2 工艺废气的来源及危害

表1.1 工艺废气的来源与危害

序号	废气种类	产生废气的工序	废气类别	处理方式	对工艺流程的危害
1	酸性废气	湿法刻蚀, 光刻-湿法去胶、化学机械研磨等	NO _x 、HF、HCl、H ₂ SO ₄	碱液喷淋塔中和处理	引起铜膜和铝膜的腐蚀, 导致电子元器件和在芯片中发生金属点腐蚀等
2	碱性废气	光刻-显影, 湿法刻蚀, 化学机械研磨-碱洗等	NH ₃	酸液喷淋塔中和处理	在硅片及显示器表面产生薄雾, DUV在显影剂作用下被碱性物质中和产生显影缺陷等
3	有机废气	光刻-涂胶、前烘、曝光后烘焙、坚膜、有机洗等	非甲烷总烃	沸石浓缩转轮焚烧系统、活性炭吸附系统、催化燃烧等	永久吸附产品表面使良品率下降, 影响氧化栅极的完整性, 改变介电质特性而影响溃电压等

1.3 光刻相关工序及产污节点分析

光刻是在照相技术、平板印刷技术的基础上, 发展起来的半导体关键工艺技术。其原理是将掩模版上的图形转移到涂有光刻胶的硅片上, 通过一系列步骤将硅片表面薄膜的特定部分去除的一种图形转移技术。

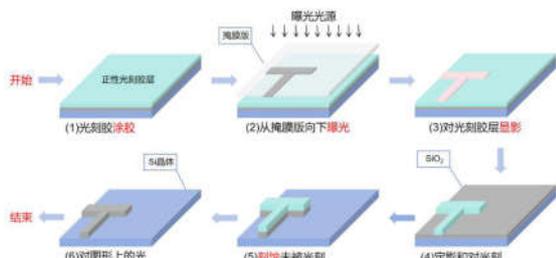
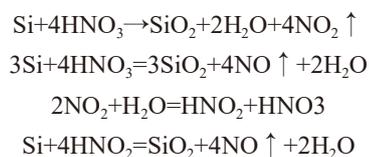


图1.1 光刻工序流程简图

下面我们以其功率器件生产中湿法刻蚀工序为例, 对其工艺步骤和产污节点进行详细的研究: 刻蚀是将经过曝光和显影后的光刻胶薄膜上的微图形结构, 转移到光刻胶下面硅片上的重要工序, 其目的是达到图形的转移。湿法刻蚀依次先采用硝酸将Si氧化成SiO₂, 随后使用氢氟酸与SiO₂发生反应生成H₂SiF₆, 从而达到刻蚀多晶硅的目的。

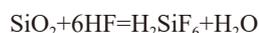
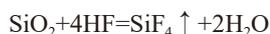
主要反应式为:

(1) 多晶硅氧化成SiO₂:





(2) 去除 SiO_2 :



多晶硅和 SiO_2 的湿法刻蚀工艺产生酸性废气，主要包括 NO_2 、 HF ，其清洗工序主要产生碱性废气 NH_3 、有机废气（主要为非甲烷总烃）。

2 废气处理系统设计计算

废气处理系统设计以UM提供的工艺设备废气排放量为标准，结合LAYOUT图，布置主管路由，并预留Take off点位接入设备。

工艺设备产生的废气由二次配管道由Take off点排至支管；再通过主风管和集管进入废气处理设备；废气处理后达到排放要求，最终通过离心风机和烟囱高空排放。其流程如图2.1所示：

废气洗涤塔为整套设备，设计时主要对其处理废气量和风机压损进行计算，并确定设备数量及备用情况。

2.1 废气系统设备参数计算

处理废气量包含UM表中工艺设备全期排气量、洁净车间内阀门箱VMB及尾气处理器Scrubber的排气量、化学品间自动供液柜BSGC的排气量、特气及大宗气辅房中气瓶柜GC、尾气处理器及纯化器Purifier等的排气量，并考虑一定漏风量和余量。

配套风机的全压 ΔP 包含排风管最不利环路压损 ΔP_f 、洗涤塔压损 ΔP_x 以及末端设备所需要负压 ΔP_t 三部分。其中，最不利环路压损包含沿程阻力损失 ΔP_m 和局部阻力损失 ΔP_j ；洗涤塔压损根据处理设备确定，末端设备所需负压来源于业主提供的UM表或厂家的提资数据。

$$\Delta P = \Delta P_f + \Delta P_x + \Delta P_t \quad \text{式2.1}$$

$$\Delta P_f = \Delta P_m + \Delta P_j \quad \text{式2.2}$$

$$\Delta P_m = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} = R_m l \quad \text{式2.3}$$

$$\Delta P_j = \zeta \frac{\rho v^2}{2} \quad \text{式2.4}$$

其中， ΔP —风机全压，Pa； ΔP_f —最不利环路压损，Pa； ΔP_x —洗涤塔压损，Pa； ΔP_t —工艺设备/气柜/VMB等所需负压，Pa； ΔP_m —沿程阻力，Pa； ΔP_j —局部阻力，Pa； λ —摩擦系数； l —风管长度，m； d —风管直径，m； v —风管内废气流速，m/s； ρ —废气密度， kg/m^3 ； R_m —比摩阻， Pa/m ； ζ —局部阻力系数。

根据《电子工业废气处理工程设计标准》GB51501-2019的规定，废气处理设备、风机、加药泵及喷淋循环水泵等均应设备用^[1]。实际工程中，可根据工艺要求、造价成本及运行费用等，采取N+1的热备用和1用1备的冷备用的方案。

2.2 废气系统设计要点

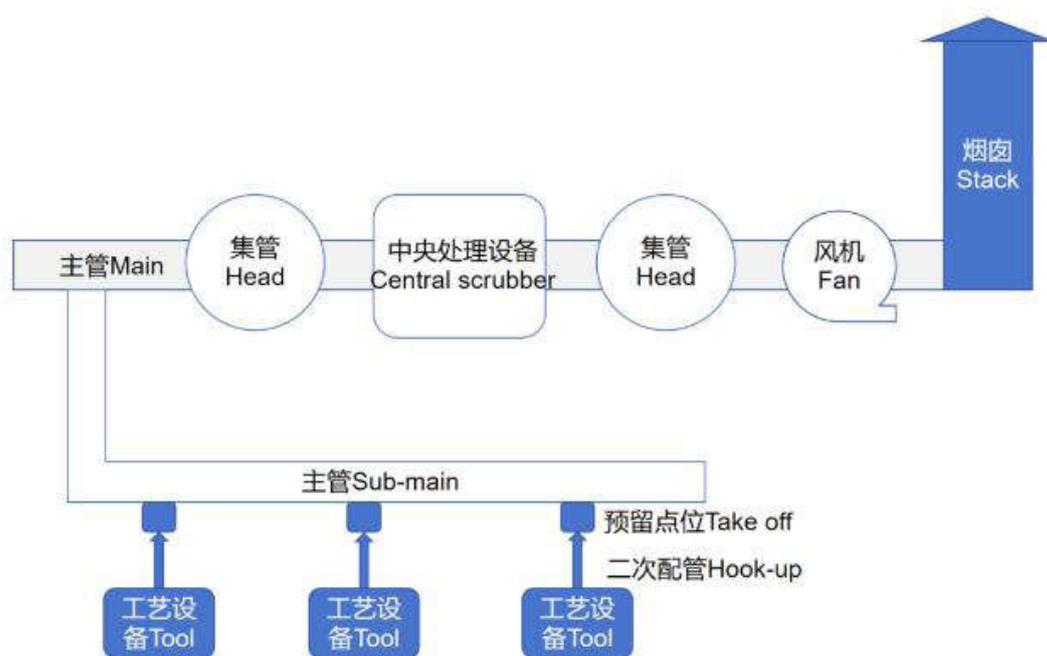


图2.1 洗涤塔处理流程图

(1) 系统支管与主管的连接呈鱼骨状, 各支管风量分配尽量均匀, 且靠近工艺设备布置。对于防微震及噪声要求比较高的洁净室, 可降低相应的风速, 风管尺寸根据下式计算。

$$Q = A \cdot V \quad \text{式2.5}$$

$$A = \pi \cdot d^2 / 4 \quad \text{式2.6}$$

其中, Q—风管计算风量, m³/s; A—风管截面积, m²。

表2.1 风管风速参考值表

风管类型	参考风速 (m/s)
Sub-main	3-9
Main	10-12
Head	12-15
Stack	15-20

(2) Take off点的布置应综合分析工艺设备排气量及点位、二次配管线走向等因素, 使Take off点靠近排放设备均匀布置。根据化学品、特气及大宗气厂家提资, 将排风管接入相应辅房的排气点位; 规划好洁净车间灰区或回风夹道内VMB的二次配路由; 在排风支管上预留一定的Take off点。

(3) 洁净室室温维持在20~25℃, 易低于工艺设备排放的高温废气的露点温度, 致使风管内壁产生凝结废水。因此风管宜顺气流方向设坡度, 并在管道最低点处设排水点, 将凝结废水排出洁净室^[2]。

(4) 废气排放点位分布广且排量差异明显, 为了调节废气系统风管风量及风压的平衡, 各支管入口处应设置调节阀和风量测定孔, 末端应设置压力传感器和真空表。

(5) 废气具有腐蚀特性不得使用熔断式防火阀, 可选用电动防火阀或与建筑构造耐火极限相同的防火构造。根据废气排放温度, 选用温度为70℃、120℃、150℃、280℃等阀门关闭电信号的电动防火阀, 从而避免防火阀误关闭的情况发生。

(6) 废气由烟囱高空排放, 烟囱高度应考虑以下情况:

- a. 环评报告规定的烟囱高度;
- b. 排气筒高度通常应 ≥ 15m, 当废气中含极毒物

质、Cl₂及HCN等时, 排气筒高度应 ≥ 25m;

c. 烟囱排放口与机械送风口水平距离 ≤ 20m时, 排风口位于送风口之上, 间距 ≥ 6m^[3];

d. 具有在线检测装置的烟囱, 高度应考虑采样处前后预留一定长度的直管段。

(7) 废气系统设计时对其他专业提资要求如下表:

表2.2 废气系统提资要求

专业	要求
建筑、结构	设备基础的定位及尺寸、荷载、管井、开洞
电气	设备位置、对应电量及应急电源
给排水	设备补水量、水压
废水	冷凝废水排放点位、设备废水水量和管径
动力	CDA、燃气管路管径及气量

(8) 在前期方案阶段, 化学品、特气、大宗气厂家介入不及时会导致废气处理装置风量选型偏小, 因此无厂家提资时, 需对类废气量进行估算:

$$Q_m = V \cdot K \quad \text{式2.7}$$

其中, Q_m—阀门箱和气瓶柜等末端设备的预估风量, m³/h; V—末端设备的体积, m³; K—换气次数, 次/h, 阀门箱及气瓶柜等可取300次/h, 硅烷根据限流孔直径0.25mm和0.15mm分别取1200、400次/h^[4]。

3 设计方案与 BIM 空间管理

3.1 废气系统常见设计问题

某项目酸排系统包含4台碱液喷淋塔, 处理风量60000CMH, 集管直径2200mm, 原设计方案(图3.1), 未考虑到厂房建设的施工可行性和应有的运维管理, 存在如下施工安装问题:

(1) 排气集管位于狗屋正上方, 未考虑支架安装空间, 存在极大的漏雨漏水风险;

(2) 排气集管紧贴外墙, 未设置检修和物流通道;

(3) 管线与风机、废气喷淋塔交错穿插, 无法进行BIM空间管理, 厂房建设难度极大;

(4) 采用固有模式设计图纸, 对建设厂房调试运维、厂务管理考虑较少。

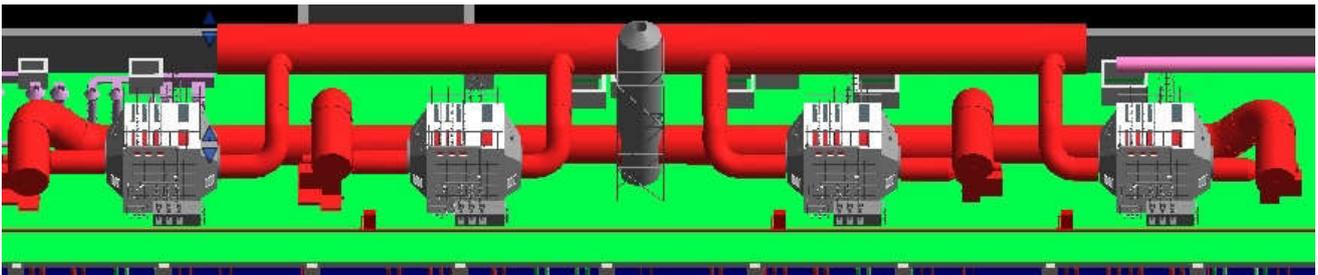


图3.1 原设计空间管理三维模型显示

3.2 废气系统优化

依据以下两条设计规范，现场实施结合BIM空间管理重新优化了废气方案，将酸性废气末端处理方案由单一直径为2200mm的烟囱和连通集管，改为一对一使用直径为1200mm的烟囱。

(1) 《大气污染物综合排放标准》7.1规定：排气筒高

度除须遵守表列排放速率标准值外，还应高出周围200m半径范围的建筑5m以上，不能达到该要求的排气筒，应按照其高度对应的表列排放速率标准值严格50%执行^[5]；

(2) 《固定源废气检测技术规范》5.1.2规定：采样位置应设置在距弯头、阀门、变径管下游方向不小于6倍直径，和距上述部件上游方向不小于3倍直径处^[6]。

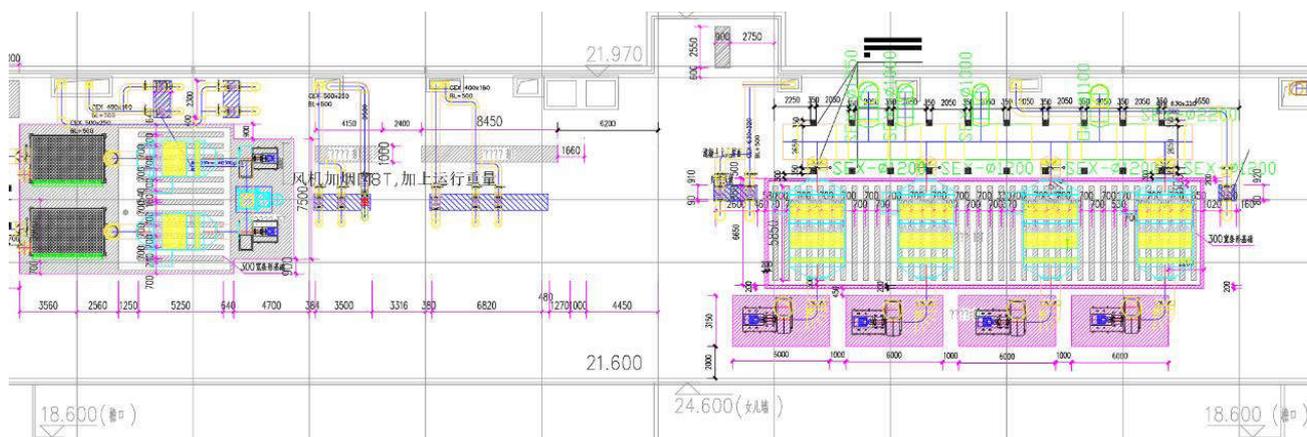


图3.2 设计方案变更和BIM规划后的屋面整体布局

重新规划后的废气系统，烟囱管径减小到1200mm，高度降低到10.8m，极大程度上解决了现场的安装难题。

酸排系统整体布局和末端处理方案的变更，改变了屋面荷载的承重。经结构设计复核，该区域主梁尺寸由500mmx800mm变更为500mmx1100mm，其上部钢筋、下部钢筋、梁侧钢筋分别由9Φ32、6Φ25、N6Φ14增加到11Φ32、8Φ25、N8Φ14；楼板上、下部分别附加钢筋Φ8@150。变更后该区域荷载能力由2.0kN/m²增加

到15.0kN/m²，能够满足此处单台风机和烟囱总重2t的承重要求。

4 废气处理设备的选型与研究

下面以某功率器件半导体项目的设备选型为实例进行详细分析：

4.1 沸石转轮浓缩吸附装置

该装置由预处理与沸石转轮浓缩装置组成，是处理大风量低浓度有机废气的首选。

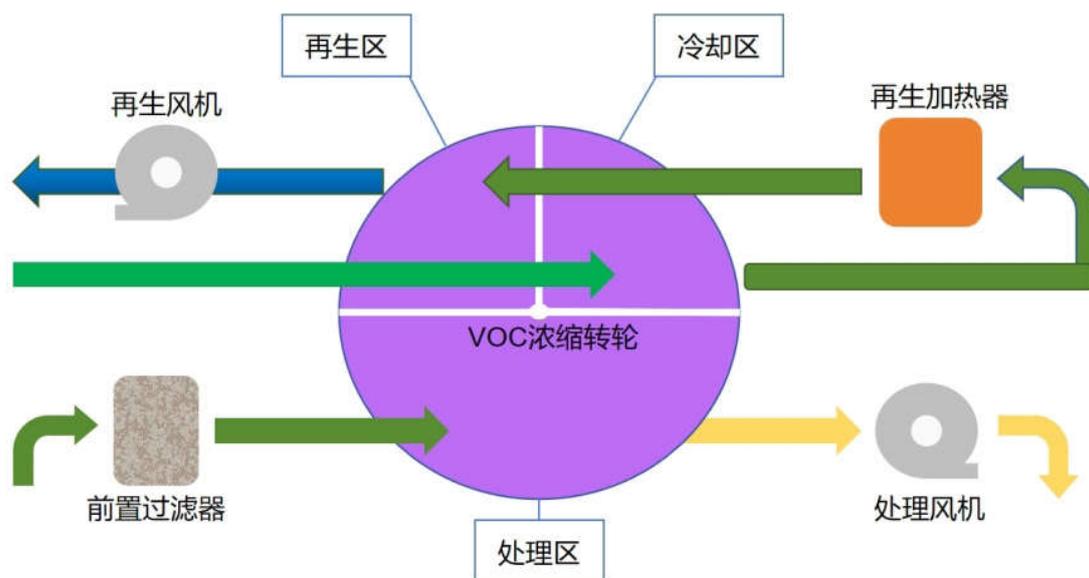


图4.1 沸石转轮浓缩系统原理图

前处理装置是废气最先进入的部分，可由初、中、高效过滤段构成，其分别用于去除 ≥ 5 、1-5和 ≤ 1 微米的颗粒物。

沸石转轮浓缩装置可分为处理区、再生区和冷却区。废气进入沸石转轮，将VOCs物质吸附在具有吸附性、耐热性等优良特性的改性沸石中，可实现10倍浓缩。转轮以2-4转/h缓慢转动，其吸附进化、脱附再生、冷却工作同时进行；沸石在趋向饱和时，少量RTO热空气与脱附气体换热至大约180-220℃，开始进行脱附工序，再生出的小风量高浓度废气会被主风机带入RTO焚烧装置燃烧处理。

4.2 RTO焚烧系统

4.2.1 RTO系统运行原理

RTO焚烧系统主要用于处理高浓度挥发性有机废气，具有节能环保的特点。

该系统几乎可以处理所有含有机化合物的废气；可以适应有机废气中的VOC组成和浓度的变化、波动；净化效率高（三室 > 99.5%）；维护工作量少、安全可靠；其热回收效率可达95%以上。

典型三室结构的RTO焚烧系统，其运行过程可以分为三个阶段。

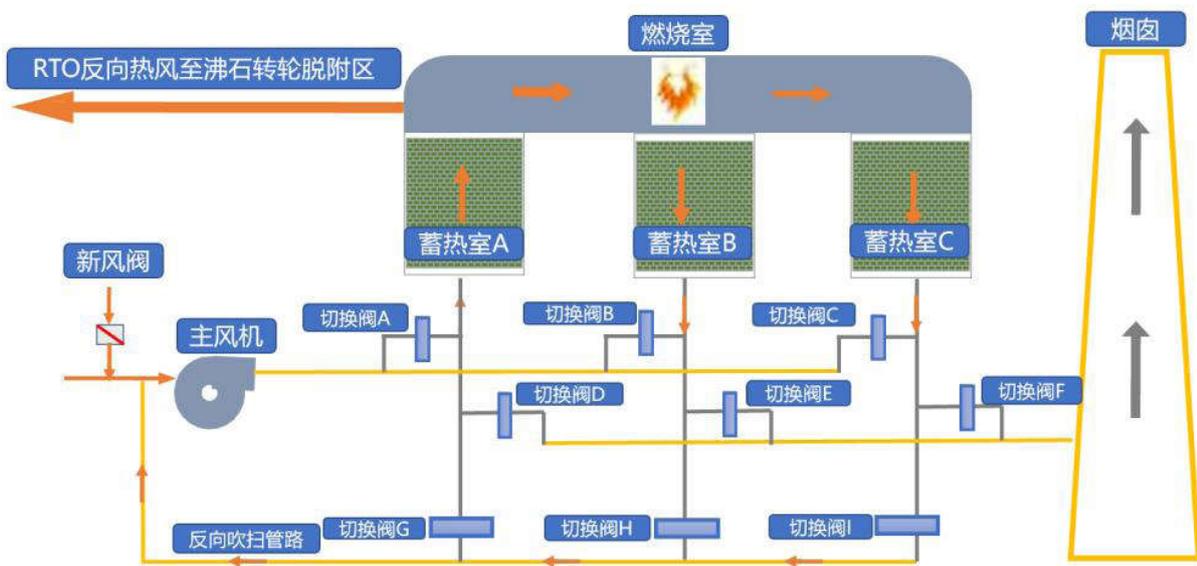


图4.2 某项目三室RTO焚烧系统原理图

阶段1：脱附后的有机废气，穿过预设温度为150℃的蓄热室A，在A室中被陶瓷蓄热介质的高温及燃烧室的热量升温至750℃，有机废气被氧化。净化后气体进入蓄热室C排出，同时对其进行蓄热。

阶段2：切换阀A/E/F关闭，同时切换阀C/D打开，改变废气流向，使有机废气进入燃烧室开始氧化过程。此时存在两种情况：（1）陶瓷蓄热介质的热量能够支持废气被完全氧化，燃烧器关闭。（2）废气溶剂的浓度不足，需要额外的热量氧化分解废气，此时燃烧器自动打开，可达到750℃-927℃。经过处理后的达标废气，从蓄热室B排出，同时对其进行蓄热。

高沸点的有机物会聚集在陶瓷蓄热体的下部，减小蓄热室的气流通道，增加阻力产生交叉污染，降低设备的净化效率。依据使用情况，可打开切换阀G，通过主风机吸入口处的负压，对蓄热室A进行反向吹扫，以达到解决此问题的目的。

阶段3：控制切换阀A/C/F/G/H关闭，B/D/E/I打开，控制高浓度的有机废气，从蓄热室B进入，蓄热室A排出，同时对蓄热室C进行反向吹扫。

4.2.2 RTO处理效率

蓄热式焚烧炉的处理效率与其形式，燃烧室氧化分解温度，都有密不可分的关系。

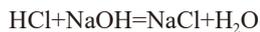
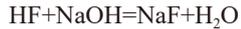
表4.1 VOCs破坏效率与温度、停留时间、RTO形式的关系

破坏效率 (%)	高于自燃温度 (℃)	停留时间 (s)	RTO形式
95	148.9	0.5	\
98	204.5	0.5	2室结构
99	246.2	0.75	2室+捕获室结构
99.5	\	\	3室结构
99.9	287.8	1.0	五室以上结构
99.99	343.4	2.0	\

4.3 酸、碱废气洗涤塔

4.3.1 洗涤塔工艺原理

废气洗涤塔主要由填料式洗涤塔、风机、烟囱、喷淋循环水系统、加药装置等组成。其原理为加药装置向循环水中加入NaOH碱性药剂并混合均匀,通过水泵和管道输送,最后由喷头喷出,在喷淋洗涤区与工艺流程产生的NO_x、HF、HCl等酸性废气充分混合,并发生以下酸碱中和化学反应:



经处理后的废气浓度达到排放标准,在风机负压下经烟囱排入大气之中。

4.3.2 酸碱废气处理控制版块

根据系统运行的静压值,采用PID控制风机频率。洗涤塔前集管设置两个压差传感器,可以在HMI上任意选择其中一个作为PV值。设置有静压差值偏差报警功能,可以修改两个传感器之间的需求偏差数值,以及单个静压传感器运行时的上下偏差值。两种静压偏差值超出设置范围时,风机由PID自动控制切换为手动控制,保证整个废气系统更加稳定的运行。

风机的切换须有自保持功能,即采用保持继电器元件,保证风机在远程/本地切换之后可以维持切换前一刻的运行状态,具有防止控制盘柜电源丢失情况下整个系统仍可在一定时间内稳定运行的能力。手动切换至自动

时,PID将会以手动值为开始点做追逐控制。每台风机分为MAN和PID控制,运转中LOCAL/REMOTE相互切换,风机都将保持切换前频率运转。

5 结语

工艺废气的处理与排放是半导体洁净厂房建设中不可缺少的重要环节,与无尘室芯片生产、良品率标准、房间正压控制、环境保护等诸多方面都有着关联和影响。本文以自身工程建设经验,从废气治理的危害、设计、BIM空间管理与施工深化、设备运行原理等方面,对半导体厂房的废气治理进行简述总结,希望可为后续相似厂房的施工建设提供借鉴和帮助。

参考文献

- [1]GB 51401-2019,电子工业废气处理工程设计标准[S].北京:中国计划出版社,2019.
- [2]GB 50472-2008,电子工业洁净厂房设计规范[S].北京:中国计划出版社,2008.
- [3]GB 50019-2015,工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [4]GB 50646-2020,特种气体系统工程技术标准[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [5]GB 16297-1996,大气污染物综合排放标准[S].北京:中国环境科学出版社,1996.
- [6]HJ/T 397-2007,固定源废气监测技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2008.