

12 寸晶圆制造厂二次配气管路施工技术研究

Research on Construction Technology of Secondary Gas Distribution Pipeline in 12 Inch Wafer Manufacturing Plant

尤开华

Kaihua You

益科德（上海）有限公司 中国·上海 200070

Exyte Shanghai Co., Ltd., Shanghai, 200070, China

摘要：半导体芯片被誉为工业皇冠上的珍珠，其生产制造所用的电子气体同样被誉为半导体行业的“粮食”和“血液”，集成电路制造涉及上千道工序，工艺极其复杂，需使用上百种电子特种气体，对于纯度、安全性等具有较高的要求，论文以国家存储器基地 3D NAND 12 寸晶圆制造厂二次配管超高纯及特殊气体管路安装工程为案例，首先分析整个项目施工技术的难点和特点，然后对施工工艺中的超高纯及特殊气体输送安全性、管路洁净度控制技术以及空间管理方案进行详细的研讨。

Abstract: Semiconductor chips are known as the pearls on the industrial crown, and the electronic gases used in their production and manufacturing are also known as the “food” and “blood” of the semiconductor industry. Integrated circuit manufacturing involves thousands of processes, and the process is extremely complex, requiring the use of hundreds of electronic special gases, which have high requirements for purity, safety, and other aspects. This paper takes the installation project of ultra-high purity and special gas pipelines in the secondary piping of the National Memory Base 3D NAND 12 inch wafer manufacturing plant as a case study. Firstly, the difficulties and characteristics of the entire project construction technology are analysed, and then the safety of ultra-high purity and special gas transportation, pipeline cleanliness control technology, and spatial management scheme in the construction process are discussed in detail.

关键词：12 寸晶圆厂；超高纯及特殊气体输送安全性；管路洁净度；空间管理

Keywords: 12 inch wafer factory; safety of ultra-high purity and special gas transportation; pipeline cleanliness; space management

DOI: 10.12346/etr.v6i2.9027

1 引言

随着国内半导体产业的蓬勃发展，制程工艺技术目前主流的是 7 纳米（nm）到 5 纳米制程技术，而一些行业领导者已经在开发更先进的 3 纳米甚至更小尺寸的技术。随着制程技术的进步，晶圆厂的规模、工艺越来越复杂，对晶圆厂的建设也带来更严格的挑战，论文将参与国家存储器基地 3D NAND 12 寸晶圆制造厂长江存储新建项目，在二次配套工程气体系统施工工艺方面积累的经验作一简介，希望能为国内同行业工程项目提供参考。

市东湖高新区，总建筑面积 111000m²，其中洁净室面积 37000m²，本次安装半导体生产设备共计约 1100 台（套），其中气体管路工程量总计约 25 万米；机台接点数约 25000 个；设备分别分布在一层附属设备层、二层附属设备层及三层工艺主设备三个层面。本次工程内容主要为电子气体管路安装、测试及衔接。本工程机台数量多、工艺系统种类多、工艺复杂、机台类型多且 85% 以上均为进口设备，尤其是电子类特殊气体的安全性和洁净度需要达到行业领先水平，这对本工程带来极大的挑战。

2 工程概况

国家存储器基地 12 寸晶圆制造厂一期工程位于武汉

3 主要施工难点和特点

本项目的施工安装过程中主要有以下特点和难点：

【作者简介】尤开华（1988-），男，中国湖北宜都人，本科，工程师，从事建筑安装、微电子、新能源、生物制药等研究。

① 12 寸晶圆制造厂所需的工艺气体种类多达 100 多种，其中核心工艺制程薄膜、蚀刻、扩散、沉积、外延等工艺需要 30 种左右，其中包含毒性、剧毒性、易燃性、自燃、腐蚀性、氧化性和惰性等特殊气体，因此对高危气体输送的安全技术措施控制是每个晶圆厂的重点和难点。

② 在晶圆制造生产过程中，电子气体在很大程度上决定了半导体器件性能的好坏，电子气体纯度每提高一个数量级，都会极大地推动半导体器件质的飞跃，因此如何保证超高纯管路的洁净度，从而保证气体的输送不受污染是施工的重点和难点。

③ 晶圆制造厂二次配工艺系统种类多达数十种，其运行要求及难度也随着设备复杂程度的提高而提升，业主方为了控制厂房的建造成本，往往会尽量降低厂房的高度，然而在主系统施工完成后留给二次配的空间非常有限，为应对这一发展趋势，同时为避免二次配施工中管路出现干涉情况，而且保证后期主系统的扩容、后期设备及管线的维修改造空间，因此二次配气体管路施工的空间管理和管路布局是施工过程中的重点和难点。

4 施工技术重难点的研究和分析

4.1 特殊气体双套管的安装工艺及气体侦测分析

为保障气体使用的安全性，特殊气体均采用双套管设计，双套管的接头必须安装在 VMB 或气柜内部或机台 Gas Box 内（如图 1 所示）。内管有任何的泄漏真实气体都会扩散到 VMB、气柜。外套管如果无法插入机台内的 Gas Box，这一侧必须封闭，原则上均为机台端缩口封闭，VMB 内也以收尾环封闭，在 VMB 内收尾环上方外管安装一个三通，外管保压完成后保持三通开口于 VMB 内。上述设备的 gas detector 均会第一时间侦测到，所有的读值和报警必须传送回厂务气体监控系统。密封式、敞开式对比分析见表 1。

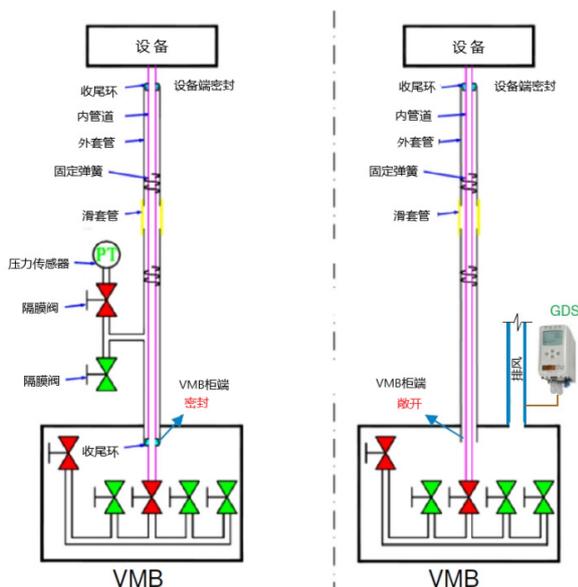


图 1 双套管安装图

表 1 密封式、敞开式对比分析表

	封闭式	敞开式
收尾状况	机台和 VMB、GC 端使用收尾环，内管外管封闭	机台端使用收尾环，内管外管封闭；和 VMB、GC 端在 VMB 或 GC 中敞开
外管试压和压力监控	外管试压，并抽真空，装负压表压力开关	外管常规难试压，或者用肥皂泡试压
泄露后状态	内管泄露后，工艺气体泄露在外管中	内管泄露后，通过外管将气体吸入 VMB 的排风中
泄露侦测	压力开关触发压力报警	VMB 或 GC 的排风管中的侦测器探知
安全性对比 1	特定的压力开关对应特定的管路	VMB 有多个 sticks，不能明确那个回路泄露，需要盘查
安全性对比 2	施工过程中可以保压测试施工质量	外管很难保压，施工质量容易被忽视
安全性对比 3	可以关闭特定的管路	所有设备所对应的所有管路都只能关闭
维修	用氮气对内外管道进行 purge 后，才能拆管维修	用氮气对内管道进行 purge 后外管用排风吸净后，才能拆管维修
安全系数	高	低

特殊气体按照气体属性均采用 SUS316L 内管和 SUS304 外管的双套管的设计原则^[1]（见表 2），且双套管内外管之间安装不锈钢弹簧，内外管道管径常规配置表（见表 3）。

表 2 特殊气体双套管材质表

序号	气体名称	内管材质	外套管材质
1	1%PH ₃ /N ₂ 、0.8% SiH ₄ /Ar、5%B ₂ H ₆ /N ₂ 、1%GeH ₄ /H ₂ 、COS、SiH ₄ 、Si ₂ H ₆ 、CO	SUS316L EP	SUS304 AP
2	C ₁₂ 、ClF ₃ 、20%F ₂ /N ₂	SUS316L VIM+VAR	SUS304 AP

表 3 电子特殊气体内外管管径配置表

外管	内管
1/4"×1.0	1/2"×1.0
3/8"×1.0	5/8"×1.0
1/2"×1.0	3/4"×1.24
3/4"×1.24	1"×1.65

半导体晶圆工厂工艺生产制程中所使用的气体大多数为毒性、腐蚀性或易燃性的特殊气体，一旦这些气体发生泄漏，将会产生严重的人员伤亡风险，因此我们设计气体泄漏侦测报警联动系统，在发生气体泄漏时联动关闭阀门并启动应急报警系统；对于自燃性、易燃性气体的报警设定值（见表 4）。

4.2 超高纯气体管路洁净度的技术措施

严格控制超高纯气体管路的洁净度才能有效地保障超高纯气体的输送品质，其关键是要保证内外层管道洁净度、密闭性、预制质量、管道焊接安装质量以及吹扫测试质量；主要从作业环境、材料选用、管路预制过程、焊接过程及测试方法多个维度进行分析。

表 4 侦测器报警设定值

序号	设备气体种类	测试气体	等级	零点抑制值	TLV (8小时) ppm	预警 1/4TLV(ppm)	第一阶段报警值 (H) 1/2TLV(ppm)	第二阶段报警值 (HH) 1TLV(ppm)	侦测器显示	侦测器种类	检测原理
1	1.2%F2/3.6Ar/Ne	F2	0-3ppm	0.18	1ppm	0.25	0.5	1	F2	GD-70D-ET	定电位电解式
2	1%F2/1.2Kr/Ne	F2	0-3ppm	0.18	1ppm	0.25	0.5	1	F2	GD-70D-ET	定电位电解式
3	C4F6	C4F6	0-2000ppm	200	10ppm	500	1000	2000	C4F6	GD-70D-ET	半薄体式
4	CL2	CL2	0-1.5ppm	0.09	0.5ppm	0.125	0.25	0.5	CL2	GD-70D-ET	定电位电解式
5	P-H2	H2	0-2000ppm	200	2000ppm		1000	2000	H2	GD-70D-ET	半薄体式
6	NG	CH4	0-2000ppm	200	2000ppm		1000	2000	CH4	GD-70D-ET	半薄体式
7	NF3	NF3	0-30ppm	1.8	10ppm	2.5	5	10	NF3	GD-70D-ET+PLU-70	定电位电解式

本工程中现场采用 SS304 不锈钢型材为结构, 防静电塑料薄膜密封的形式搭设 5m × 5m × 3m 的专用洁净棚作为管路加工场所, 同时洁净棚配置安装高效过滤器, 用于洁净棚空气循环过滤, 以保证洁净棚的洁净度不小于静态 1000 级, 通过以上方案能够有效保证施工作业环境的洁净度, 防止管路被污染。

针对超高纯度要求的管路选用管内壁粗糙度小于 0.25 微米的 SS316L EP 不锈钢管道, 连接方式采用焊接和高纯度、无泄漏、高压输送的 VCR (真空连接径向密封) 接头连接形式, 配装柔性爪式不锈钢金属垫片, 其端面密封泄漏量 $1.0 \times 10^{-9} \text{atm} \cdot \text{cc}/\text{sec}$, 控制阀门采用能迅速关断、开关过程中不会产生颗粒、密封性能好的隔膜式阀门以及压力调节阀, 同时调压阀前端安装垫片式过滤器, 防止大颗粒损坏阀门和污染设备影响产品质量。

施工过程中重点控制管路切割、管路平口以及管路焊接的质量以保证管路的洁净度; 施工技术中主要采用水平 15° 倾斜摆放姿势进行加工, 切割过程中使用不锈钢闭口割刀, 在被切割管道的一端接上经 0.1 微米过滤吹扫氩气接头, 并用 1/4" 限流器在另一端接上另一个吹扫接头, 使用 6N 级别 (99.9999%) 高纯氮气顺管内介质流向吹扫, 气流量控制在大约 10 升 / 分钟; 切割完成使用全自动专用管道平口机平口, 以保证管道管口的平整度和圆度, 最后需用无尘布沾异丙醇或无水酒精擦拭干净并用洁净防尘帽密封。

管路预制需使用 5D 弯管器, 除美观外也可降低微粒子产生, 保证管内洁净度。

晶圆制造厂超高纯气体普遍为小管径不锈钢管, 因此常规的手工氩弧焊技术已经不能满足焊接质量要求, 故选用全自动轨道氩弧焊接设备 (Arc Machine 207 / Swagelok M200), 每次焊接前按照管道不同材质、管径、壁厚、连接方式等调整焊机高低电流、焊接时间、脉冲率、脉冲宽度、高低转速电压、吹扫气体流量等参数进行焊样制作; 焊接时管内采用高纯氩气 (99.9999%) 吹扫保护, 以保证焊缝不产生氧化^[4], 同时施工管路必须保证正压吹扫状态, 且管路末端加装负压表监测, 焊接前保护气流量可按照下面曲线选定 (如图 2 所示)。

通过材料选用、焊接设备选用以及施工过程措施控制焊接质量均能达到要求, 焊道偏移小于 20% 管厚、凸出和凹陷小于 10% 管厚、焊道宽度 1.5~2.0 管厚、宽度均匀度小于

25% 焊道宽度^[2]; 焊缝内表面氧化程度在 1 和 2 之间 (如图 3 所示)。

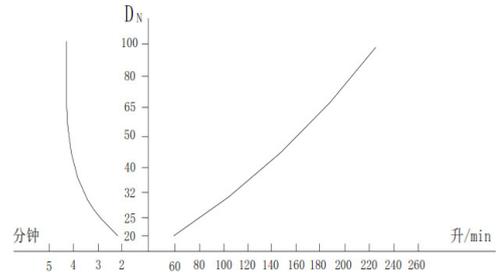


图 2 焊接保护气流量参考曲线

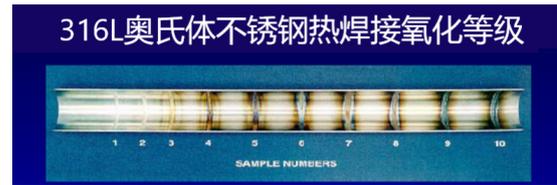


图 3 316L 奥氏体不锈钢热焊接氧化等级

超高纯管路施工完成后进行压力试验、氦检测、水分子、氧分子及颗粒检测五项测试, 测试前采用 6N 级别 (99.9999%) 高纯氮气进行 12 小时吹扫, 压力试验采用高纯氮气为介质, 采用管路末端安装保压记录仪和电子压力表记录; 氦检测采用穿透性极强的氦气为介质^[3], 在氦检测仪将管路抽至真空状态对管路接头处、盲点处喷氦气, 保证泄漏率不大于 $1 \times 10^{-9} \text{Atm cc}/\text{sec}$; 采用水分仪、氧分仪对管路水分子、氧分子进行检测, 其管路最终 D.P (含水 / 氧量) 不大于 10ppb; 采用颗粒测试仪对管路颗粒测试, 采样气体每 1.0ft³ 测 1 点, 连续测 3 次, 高纯气体、特殊气体粒径不大于 0.1μm, 颗粒数不大于 0pcs/cf。微粒测试仪雷射有效值应为 7.5 以上。测试结果采用圆盘保压纸和记录纸打印存档。

4.3 管路施工中空间管理

半导体晶圆制造厂往往在规划初期, 由 IE 工程师根据生产制程工艺完成机台的整体布置, 在整体机台布置的前提下, 因洁净室内包含设备平面布局、主系统管线管道、二次配工艺管线管道、设备内连线管道等, 对于管道空间管理必须建立一套原则, 以确保后续工艺设备布局可以顺利推动及促进坪效并确保后续管道扩充需求, 同时保障在同一机台投影范围内的各工艺管线不发生干涉, 尤其对数量多、占用空间大的气体管路提出合理的解决方案, 本项目采用建立二次配电

系统空间管理布置规范和 BIM 建模辅助施工的双重方案。

首先，对设备层进行规划，一次钢构下方设置三个空间转折层，二次钢构上方设置四个空间转折层；对洁净室高架地板下空间设置三个空间转折层，这个规划十分明确了各系统管路安装的分层顺序及标高（如图 4 所示）。

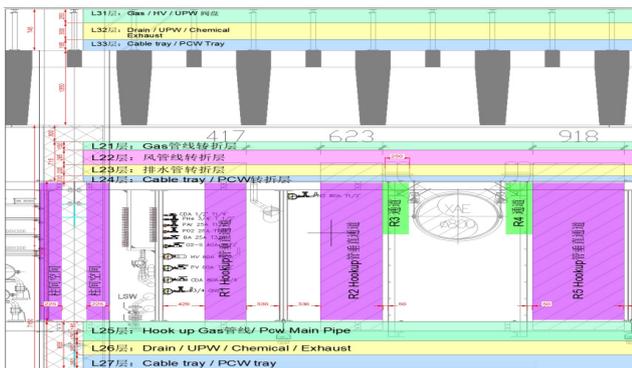


图 4 二层水平空间管理原则图

针对数量多、种类多的气体管路专项原则规划为东西向水平排列，南北向垂直排列；气体东西向走在工字钢槽内（如图 5 所示），特别是特殊气体管路；尤其对工字钢槽内走管设计了专用支架，该方法很大程度上释放了有效空间；对主系统预留阀门的分支开三通方向也做了详细的规划，很好地避免了管路交叉的情况（如图 6 所示）。



图 5 气体管路安装原则



图 6 二层垂直空间管理原则图

工字钢槽内走管设计的专用支架采用 $40 \times 20 \times 15\text{mm}$ 单面不锈钢 C 型钢，两端焊接定制不锈钢板，使用长度 22cm 的 M10 螺母、弹簧螺母及平垫片固定在钢构的缝隙中，如图 7 所示。

其次，参考 MLD 图纸（如图 8 所示）辅助 BIM 建模对施工作业人员作为指导文件，MLD 图纸明确了各系统管路的路径，层高、起始点、华孚洞上洞口位置、各机台连接点位

置以及洁净室高架地板下阀门盘面的位置及顺序，本项目针对生产厂房二层辅助设备层及三层工艺制程设备分别设计 BIM 轴侧图及设备平面图（如图 9 所示）。

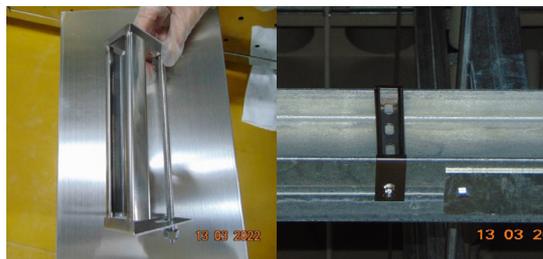


图 7 气体工字钢专用支架图

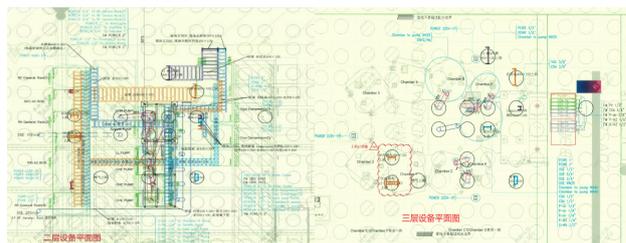


图 8 设备平面图（MLD 图）

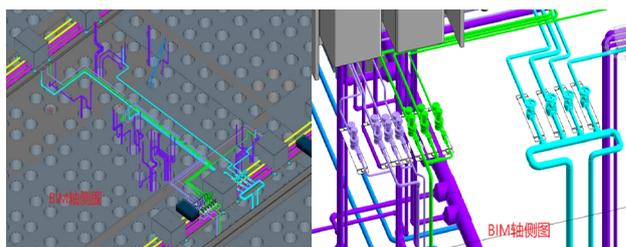


图 9 管路 BIM 轴测图

5 结语

国家存储器基地长江存储项目二次配套工程气体系统施工技术得到了业主方的充分认可，达到业主方生产工艺的要求，相关施工技术方案已在同行业其他项目得到应用，论文可以为从事该行业的人员提供一定的参考和学习。

参考文献

- [1] 信息产业电子第十一设计研究院科技工程股份有限公司,中国电子系统工程第二建设有限公司.GB 50646—2020 特种气体系统工程技术标准[S].北京:中国计划出版社出版,2020.
- [2] 中国石油和化工勘察设计协会,中油吉林化建工程股份有限公司.GB 50236—2011 现场设备、工业管道焊接工程施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社出版,2011.
- [3] 中国电子系统工程第二建设有限公司.GB 50467—2008 微电子生产设备安装工程施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社出版,2009.
- [4] 沈英杰,蔚道祥,杨宇清,等.不锈钢洁净管自熔焊技术工艺探讨[J].化工装备技术,2020,41(5):15-17.