



上海交通大学毕业论文答辩

0.11~0.18 μm 集成电路制造当中的介电层气泡缺陷研究



答辩人：曹琛
指导老师：段力
专业：集成电路工程
学号：1150392003

目录

01

第一部分：选题背景

02

第二部分：论文综述

03

第三部分：研究过程

04

第四部分：研究成果

05

第五部分：论文总结



第一部分

论文背景

背景依据 选题意义 研究目的



背景 依据

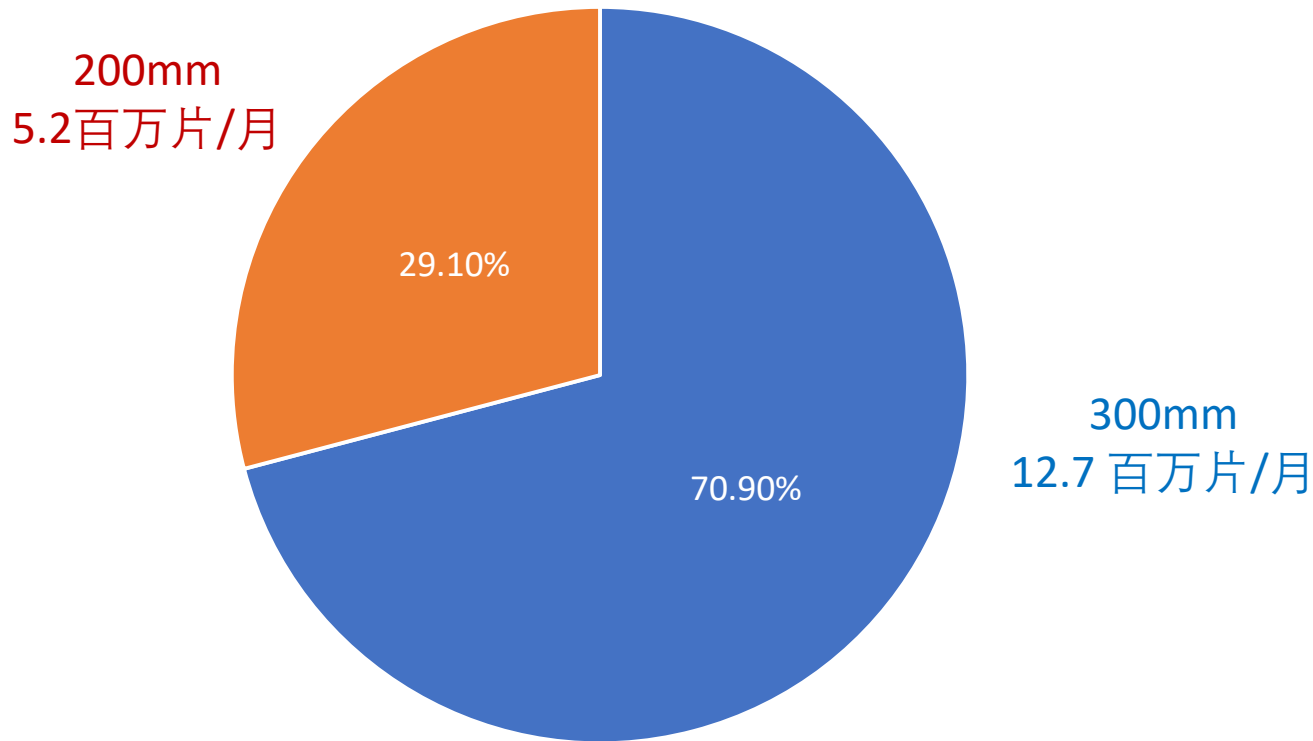
进入21世纪后，智能终端设备开始成为时代的主流并且影响人们生活的方方面面，从物质生活的吃穿用度，到精神世界，越来越深刻的受到人工智能设备的影响。集成电路作为这些智能终端设备大脑，更是在其中扮演着不可替代的作用。我国的人工智能产业的应用与发展在世界上处于领先的地位，特别是自2010年开始，相关人工智能产业发展迅速，在极大的方便了人们的生活的同时，也迅速成为国民经济发展的主要推动力之一。

集成电路产业在我国也越来越受重视，国家在大力引进先进设备的同时，通过鼓励技术创新，引进以及现有工艺改良来促进我们集成电路产业的发展，本文取材于集成电路生产的实际案例，结合集成电路生产的实际情况，通过工艺改良提高生产企业的品质，具有很强的可操作性。

从技术角度上看，集成电路通过缩小金属导线间距和增加金属导电层数的方法来实现其小型化和多功能化的需求，从0.18微米开始的集成电路制造广泛采用HDP FSG 作为介电层，并开始成为200mm集成电路制造的主要工艺。

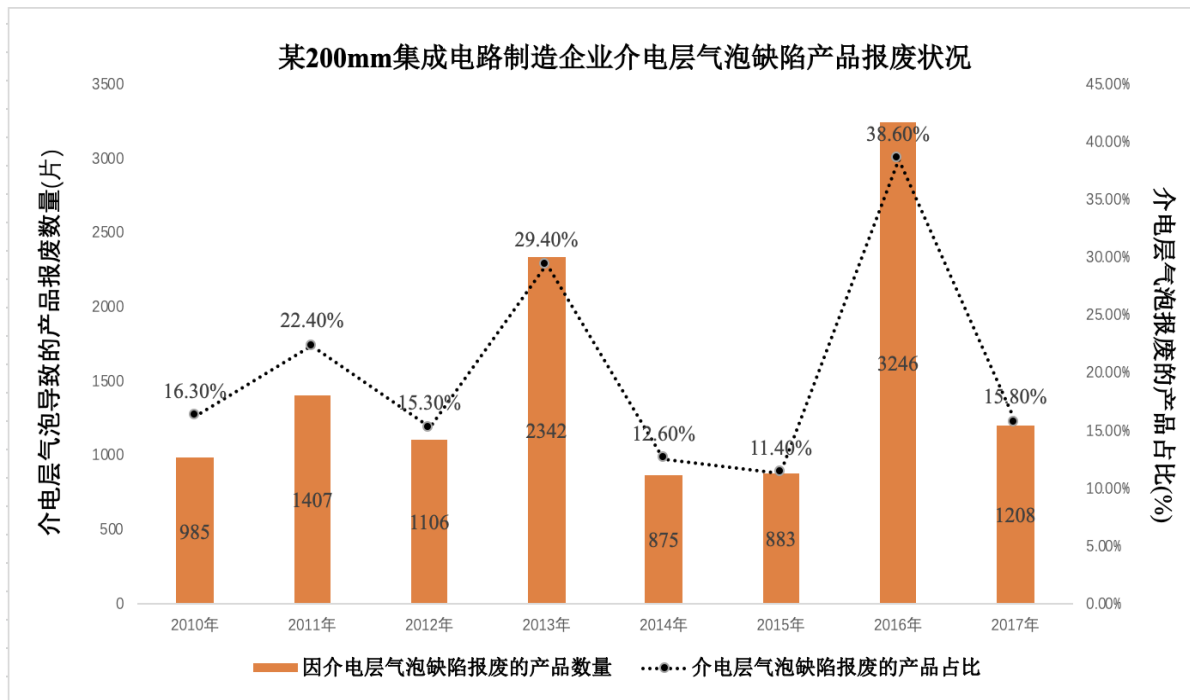
选题 意义

0.11~0.18微米集成电路产品主要在200mm集成电路生产企业进行且应用广泛，因此发生在0.11~0.18微米生产中的问题对200mm 晶圆制造企业影响较大，下图为2017年全球晶圆产出对比。



0.11~0.18微米集成电路制造中面临着一个共同的问题：介电层气泡缺陷。

选题
意义



研究 目的

研究0.11~0.18微米集成电路制造中介电层气泡缺陷的产生机制并寻找相应的解决方案。

方案应用范围：0.11 ~ 0.18微米集成电路制造。

研究目标：

- 1) 介电层气泡缺陷的具体呈现形式；
- 2) 影响因素；
- 3) 具体实效模型；
- 4) 寻找经过验证且易于大规模应用的解决方案；

重点关键词

1) 介电层气泡

产生于集成电路金属导线之间的介电层的气泡缺陷，我们将在集成电路内用来实现金属与金属之间隔离的氧化层称为介电层，也就是常说的IMD

2) 栅极线宽

集成电路中关于金属线宽的名称，随着技术的发展，栅极线宽向着更小的体积发展。

3) 掺氟硅玻璃 HDP FSG

0.18微米以及更为先进的微纳米集成电路介电层的主要工艺，其主要特点是填洞能力强，可以有效满足金属与金属之间的隔离需求，同时通过在工艺中加入氟离子，降低电阻电容延迟 (RC delay), 提升集成电路器件功能。

4) 制造良率

普遍应用于制造企业的一项指标，计算方式是：产出/投入，常被用来表征制造企业品质管理能力。

第二部分

论文综述



综述

本文结合200mm集成电路制造的实际情况，推测该缺陷的形成与 $0.11\sim 0.18\mu\text{m}$ 产品中的介电层工艺结构相关。通过对比 0.25 和 $0.35\mu\text{m}$ 产品的介电层气泡缺陷发生几率以及工艺结构，我们发现如果产品的介电层结构中没有使用掺氟的工艺，在大规模生产中就不会发生介电层气泡缺陷.因此本文推测介电层气泡缺陷的生成机制是: $0.11\sim 0.18\mu\text{m}$ 产品介电层中掺氟硅玻璃工艺所蕴含的氟离子在高温工艺过程中活性加强，将相关的薄膜氧化层撕裂，从而导致了介电层气泡缺陷的产生。

本文通过实验验证了缺陷生成机制的正确性，依据在不同条件下相关产品的缺陷发生几率以及严重程度来定义与缺陷相关的各个因素，并寻找各因素之间的主次关系，从源头和防御两个层面寻找问题的解决方案。通过增强薄膜氧化层的抗撕裂能力，使游离氟离子难以将其撕裂，从而达到杜绝介电层气泡缺陷产生的目的。最后结合集成电路制造的实际情况提出了解决这一问题的具体方案：运用FSG liner取代 $0.11\sim 0.18\mu\text{m}$ 产品介电层结构中的富硅氧化层，增强薄膜氧化层的抗撕裂能力，使氟离子难以将其撕裂，杜绝介电层气泡缺陷的产生。并将该方案应用到大规模的生产中，验证方案的可行性与稳定性，得到了令人满意的结果。

本文在分析介电层气泡缺陷特征的基础上，提出并验证了介电层气泡缺陷的生成机制，并依据该机制探索出一种彻底解决 $0.11\sim 0.18\mu\text{m}$ 集成电路生产中介电层气泡缺陷的方案。该方案在大规模生产中可以有效的解决介电层气泡缺陷对现有产品的影响，使单个企业年度减少产品报废约1200片， $0.11\sim 0.18\mu\text{m}$ 产品的生产良率由97.5%提升至98.3%，减少客户诉讼的同时提升客户满意度，进而给相关的集成电路制造企业带来巨大的经济效益。

第二部分

研究过程

认识缺陷

缺陷的特性与影响因素

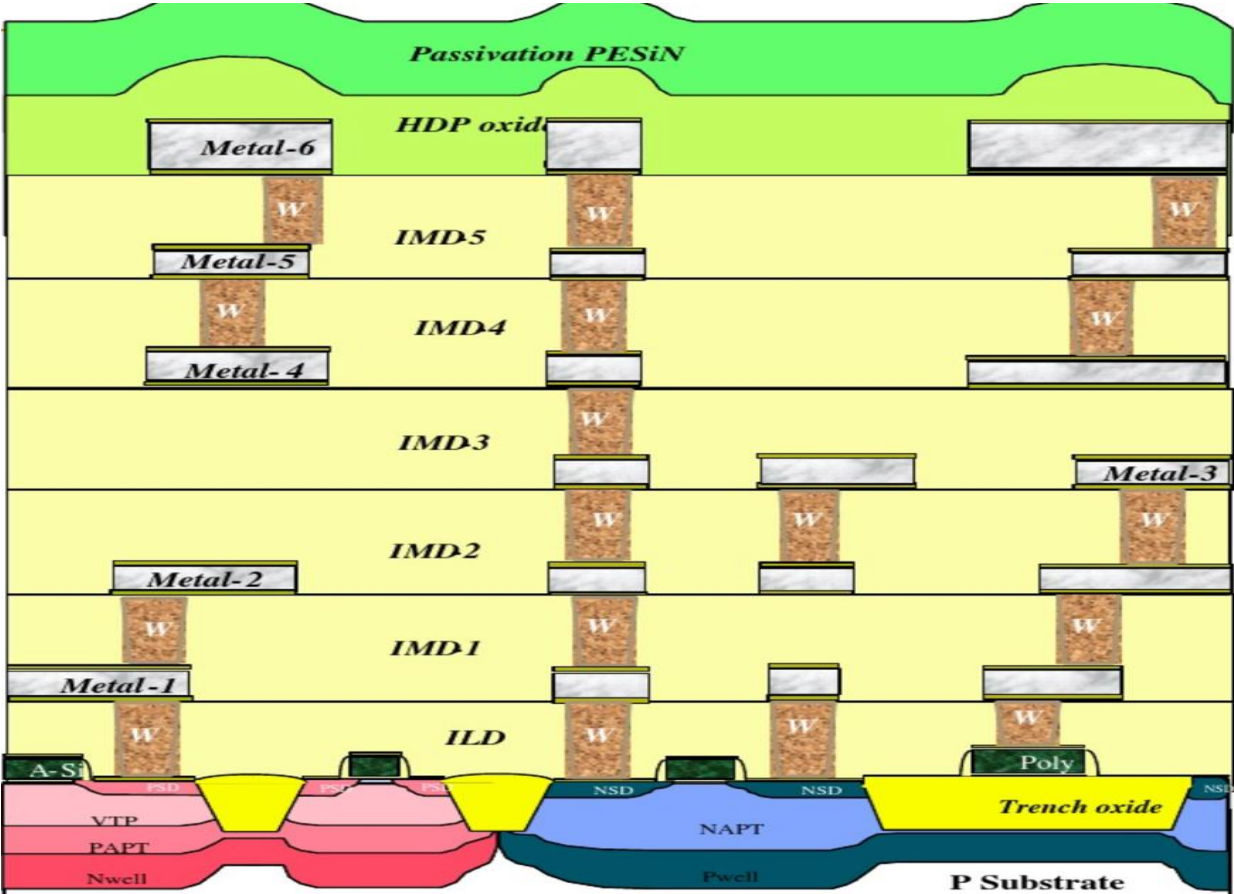
缺陷的实效模型

缺陷的解决方案

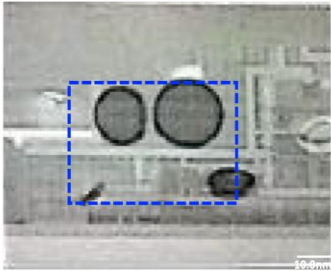
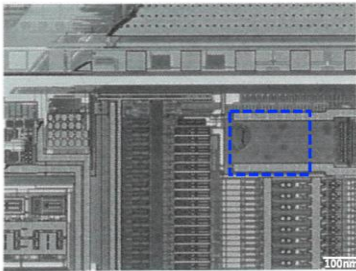
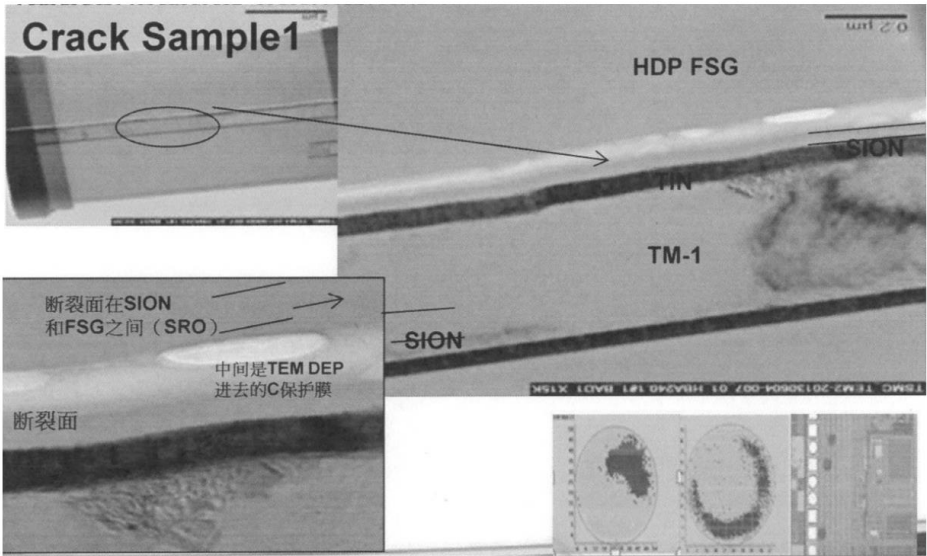
解决方案的效果验证



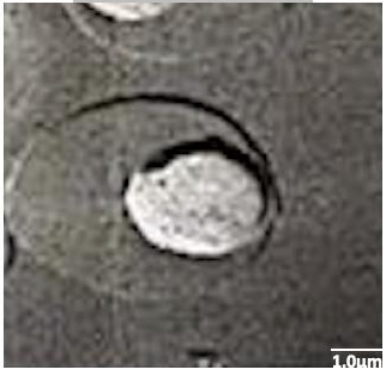
什么是介电层(IMD): 集成电路内用来实现金属与金属之间隔离的氧化层。



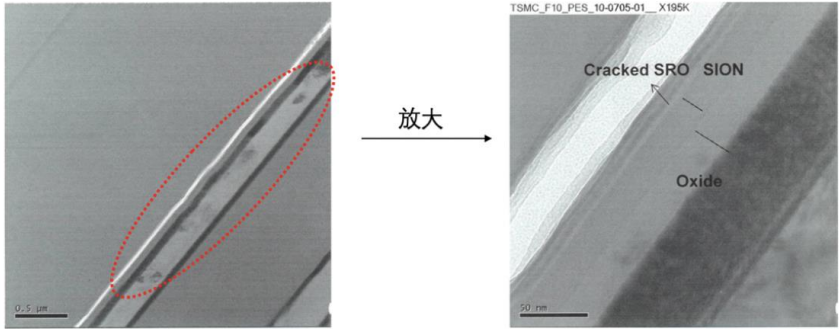
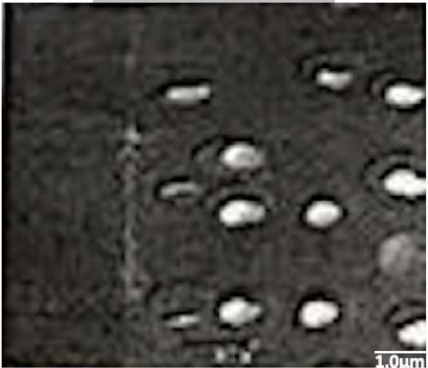
什么是介电层气泡缺陷：始于介电层结构富硅氧化层(SRO-300A) 的薄膜撕裂。



缺陷形态-凸起

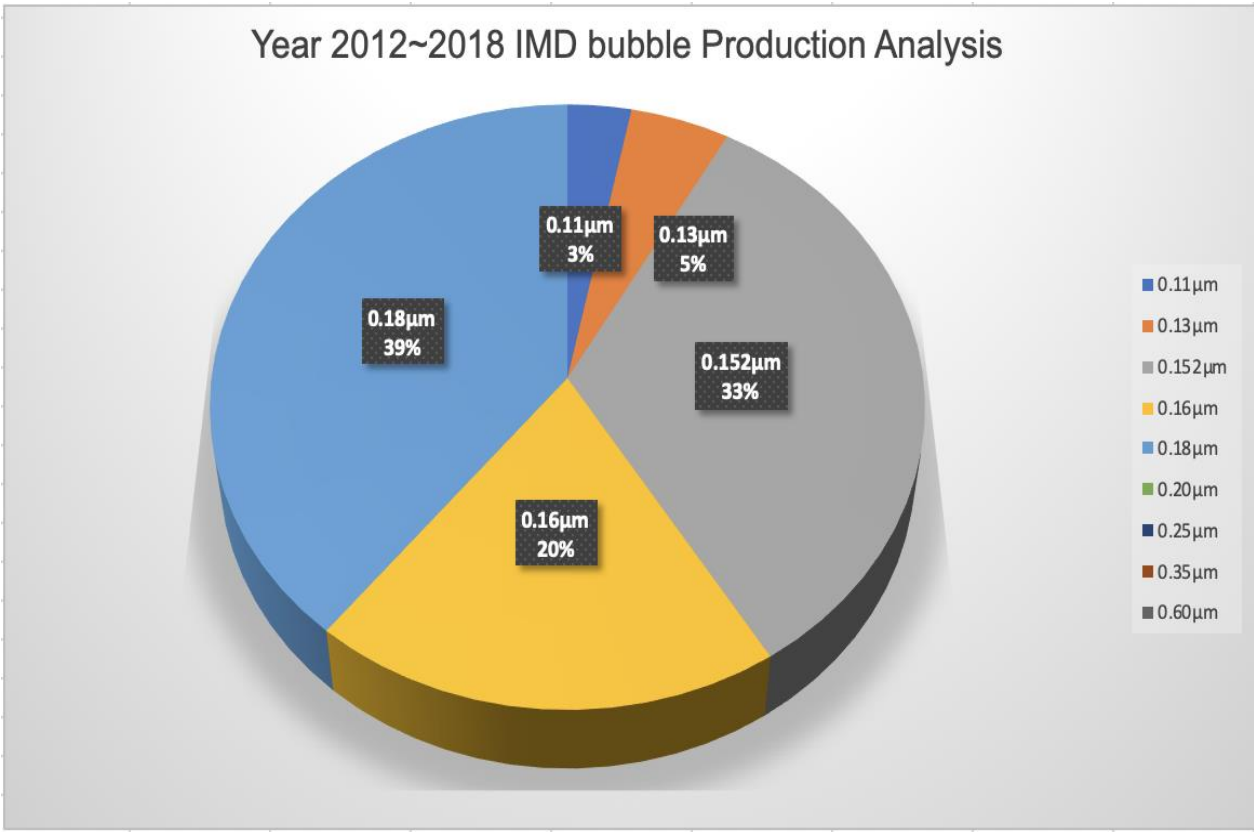


缺陷形态-凹坑

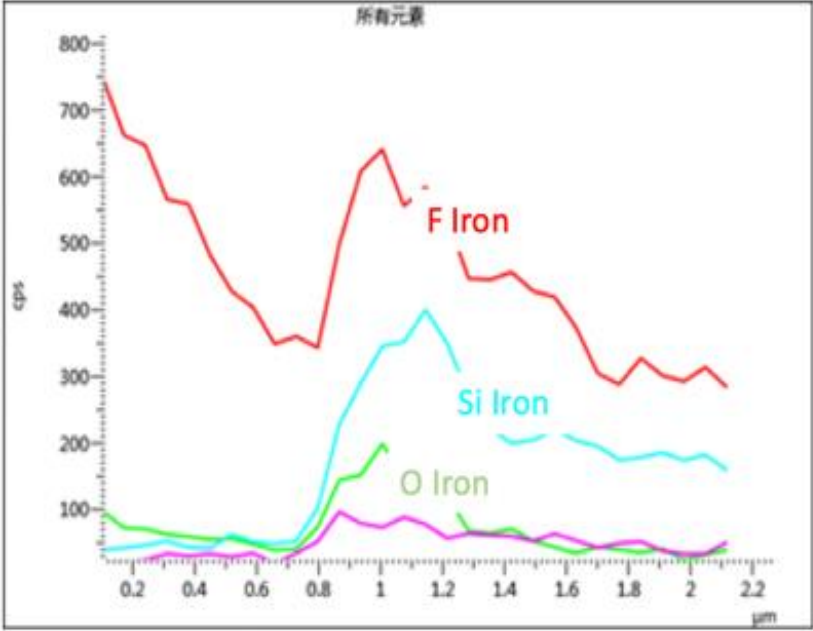
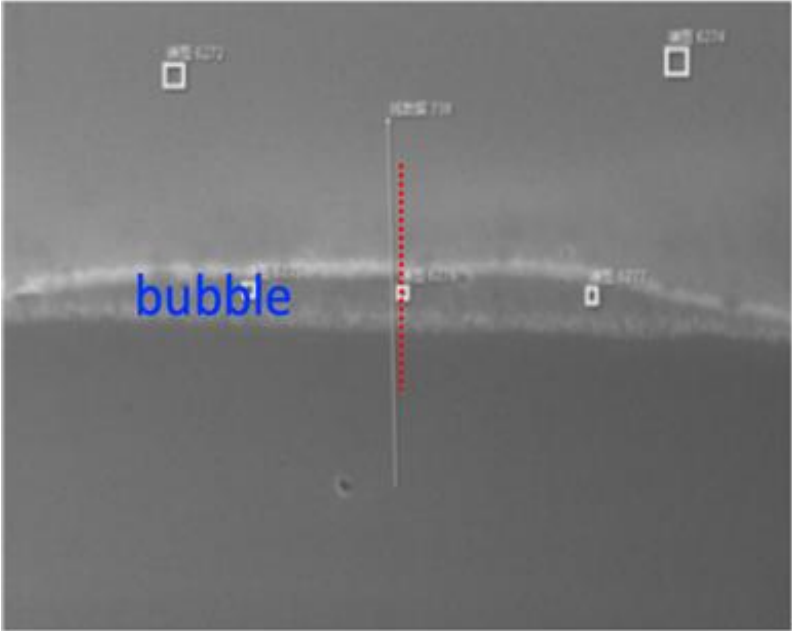


气泡出现于SRO区域

介电层气泡缺陷出现的产品类型：0.11 ~ 0.18 μ m production, with HDP FSG structure.



介电层气泡缺陷成分分析：Si/O/F

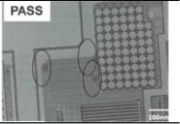
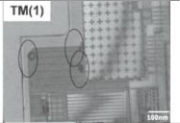
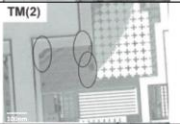

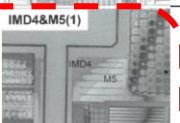
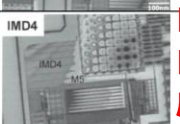


介电层气泡缺陷在产品结构中出现的时间点：高温老化工艺之后

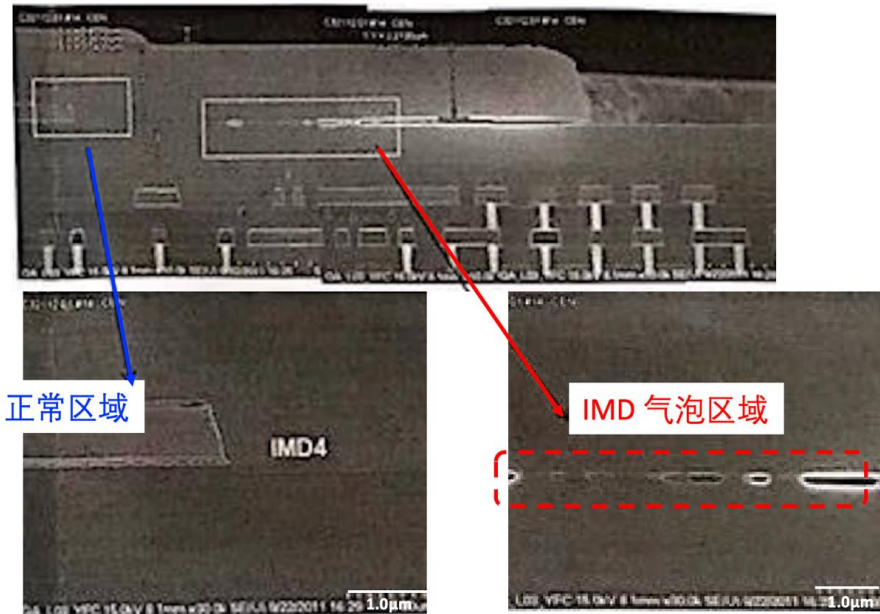
产品类型	工艺流程	外观扫描结果		是否有 IMD 气泡
		投入数量(片)	实效数量（片）	
0.18um MSRF	ILD	5000	0	否
	IMD1	5000	0	
	IMD2	5000	0	
	IMD3	5000	0	
	IMD4	5000	0	
	IMD5	5000	0	
	Passivation	5000	0	是
	Anneal	5000	12	

介电层气泡缺陷在产品结构中出现的位置：顶层介电层（缺陷产品拆解分析）

拆解的实效产品：0.18微米， 5 IMD layers

工艺站别	拆解说明 (按顺序拆解)	是否有气泡缺陷	缺陷产品图片 (电子显微镜图片)
Passivation	完整产品，外保护层存在	有	
Top Metal-1	拆除外保护层，第一层顶层金属外露	有	
Top Metal-2	拆除第一层顶层金属，第二层顶层金属外露	有	
IMD-5	拆除第二层顶层金属，顶层介电层外露	有	
Metal-5 & IMD-4	拆除顶层介电层，第五层金属层外露	无	
IMD-4	拆除第五层金属层，第四层介电层外露	无	

SEM实效产品：C016MS, 4 IMD layers



缺陷特性

什么是IMD气泡缺陷：IMD气泡缺陷特指在晶圆生产过程中产生的，在出货端被外观侦测发现的类似圆形缺陷。

什么时间点出现：IMD气泡缺陷通常出现在集成电路生产的后段工艺中高温老化之后，在出货端外观侦测时被发现。

什么产品上侦测到IMD气泡缺陷：IMD气泡缺陷仅出现在拥有HDP FSG工艺的0.11 ~ 0.18微米产品上。

什么区域出现IMD气泡缺陷：气泡缺陷出现在IMD附近的区域，但不会出现在有顶层金属的区域。

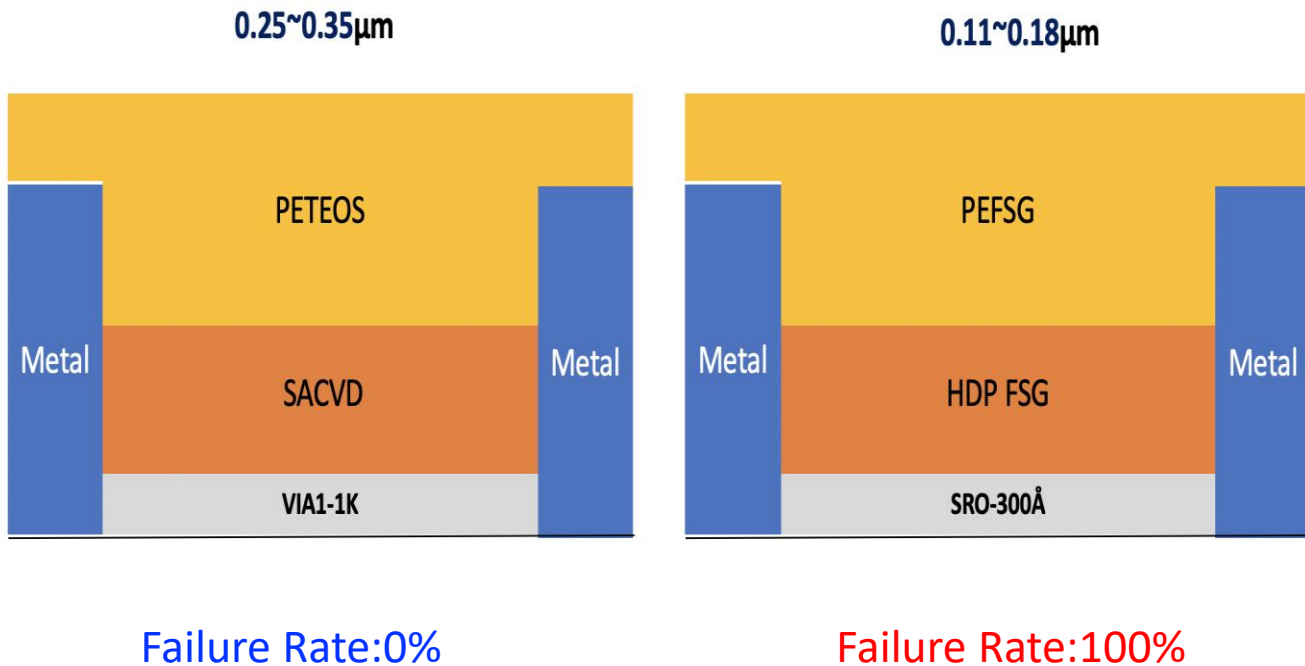
IMD气泡缺陷的物理表现形式是什么：圆形，且伴随着薄膜撕裂。

如何侦测IMD气泡缺陷：集成电路生产出货端，电子显微镜外观扫描。

IMD气泡缺陷对产品的影响程度如何：成片出现，引起相关产品的功能和可靠性失效。

介质层(IMD)结构：缺陷均呈现在0.11 ~ 0.18微米产品上，因此与0.11~0.18微米 IMD 结构工艺强相关。

缺陷的影响
因素





缺陷的影响 因素

介质层(IMD)结构(含氟工
艺)
外保护层工艺温度和物理特性

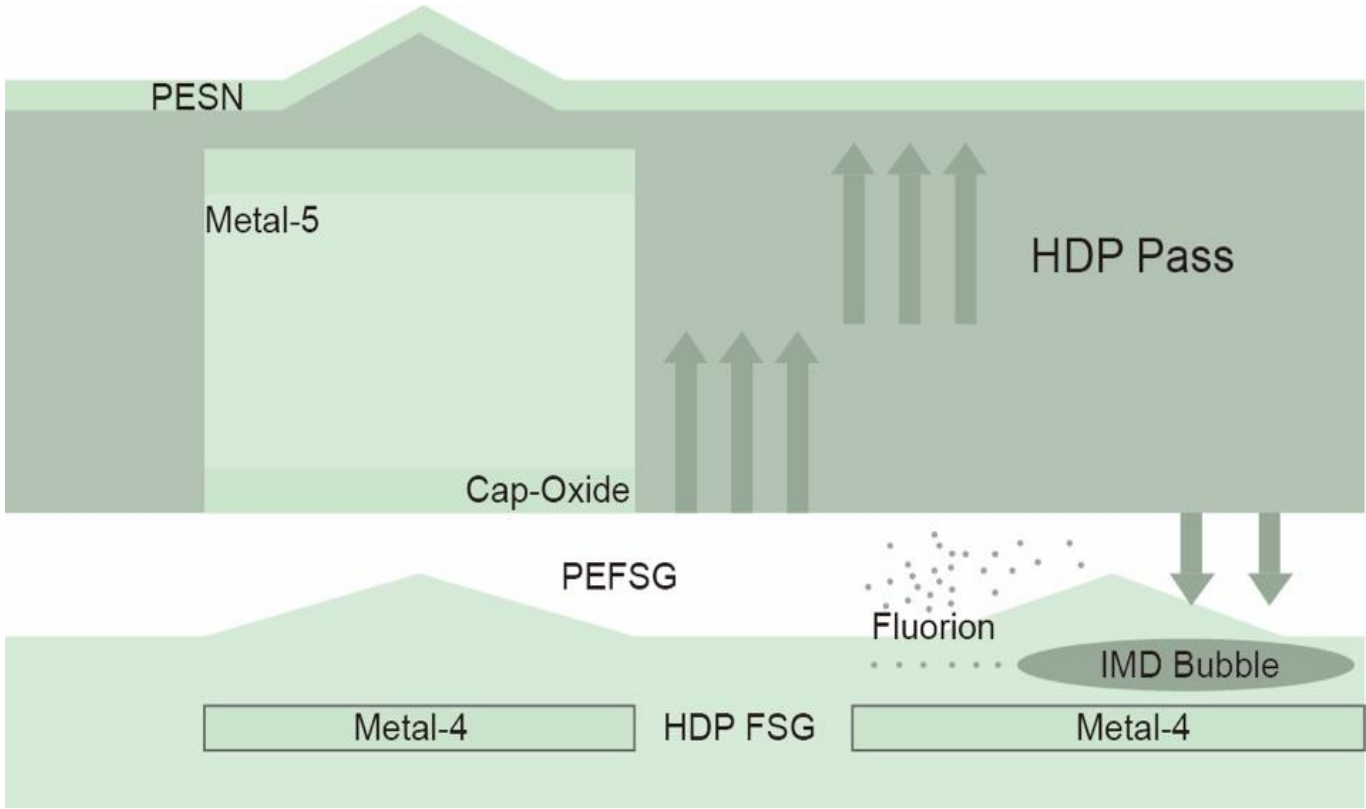
晶圆金属线路设计

材料延展性，抗撕裂能力

高温老化工艺条件：时间，温度

0.11~0.18微米产品的介电层中的掺氟硅玻璃中所蕴含的游离氟离子在后续高温制程的作用下，活性加强，在向外逃逸的过程中突破防御的薄膜氧化层的限制并将其撕裂，导致了介电层气泡缺陷产生。

失效模型



失效模型与影响因素验证

缺陷源头：

- ❖ IMD 结构中掺氟硅玻璃中蕴含的游离氟离子。

防御因素：

- ❖ 阻止游离氟离子由里向外突破的氧化层。

失效模型与影响因素验证

验证产品：

- ❖ Highest IMD Bubble Failure Rate Production

检验标准：

- ❖ 七次高温老化制程后产品端IMD气泡缺陷的发生几率和严重程度

失效模型与影响因素验证

为什么要经过七次高温老化工艺？
将产品中将爆未爆的气泡缺陷在集成电路制造端强化出来，
缩短验证流程。

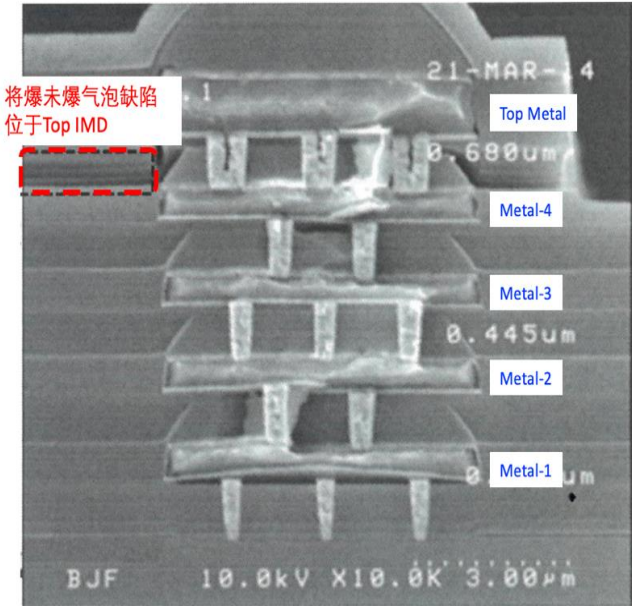


表 3-1 不同条件下产品介电层气泡缺陷与高温老化制程关系
Table 3-1 Correlation between IMD bubble and annealing on different productions

工艺站别	产品-1 已经发现介电层 气泡	产品-2 未发现气泡 同批次产品发现 气泡缺陷	产品-3 本身和同批次产品 均未发现气泡
高温老化*1			
高温老化*2			
高温老化*3			
高温老化*4			
高温老化*5			
高温老化*7			
备注	缺陷随着高温老化次数的增多而变严重，三次以后基本稳定	缺陷随着高温老化次数的增多而出现，三次以后基本稳定	健康的产品不会随着高温老化工艺的增多而出现气泡缺陷

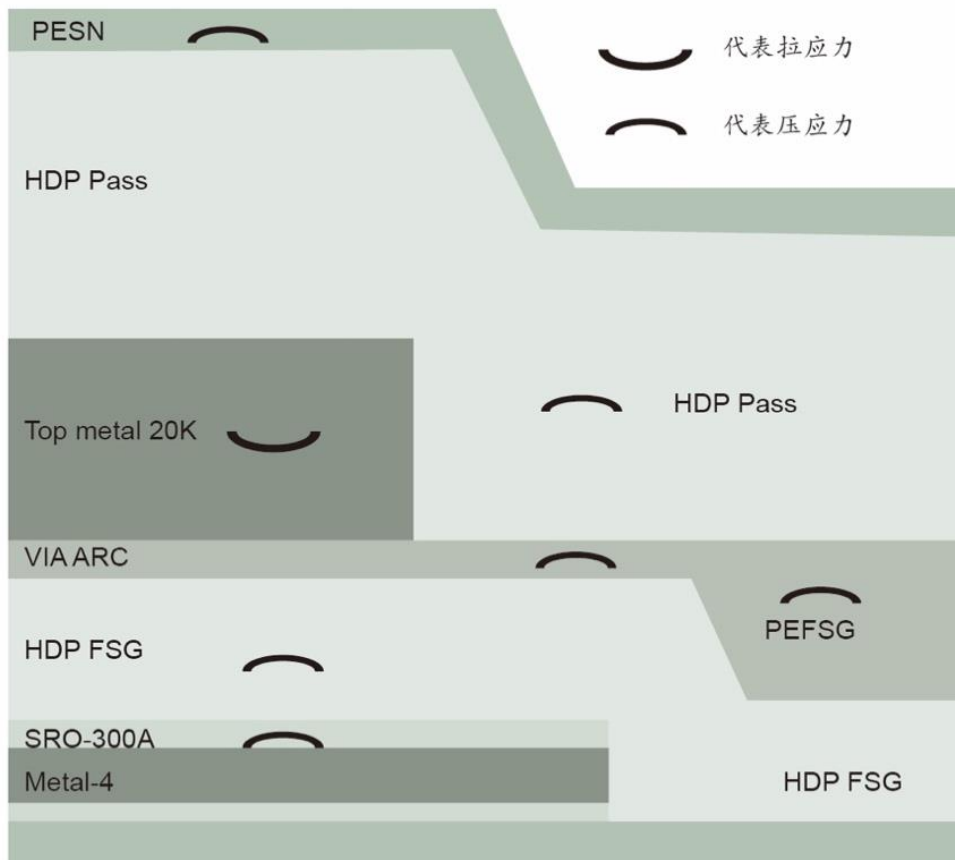
源头验证：F 离子含量控制实验

表 3-2 IMD 气泡缺陷和氟离子浓度关系

Table 3-2 The correlation between IMD bubble performance and F%

实验条件	IMD F 浓度			不同次数高温老化次数后 IMD 气泡缺陷发生几率(%)						
	SRO	FSG	PEFS G	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次
标准组		4.15	5.3	30	60	90	90	90	90	90
实验组-1		4.6	5.3	50	100	100	100	100	100	100
实验组-2		3.7	5.3	10	30	40	40	40	40	40
实验组-3		4.15	5.9	40	50	50	50	50	50	50
实验组-4	SRO	4.15	4.7	30	30	30	30	30	30	30
实验组-5		4.6	5.9	60	100	100	100	100	100	100
实验组-6		4.6	4.7	50	100	100	100	100	100	100
实验组-7		3.7	5.9	10	40	40	40	40	40	40
实验组-8		3.7	4.7	10	30	30	30	30	30	30
实验组-9	VIA	SAC VD	PETE OS	0	0	0	0	0	0	0

防御验证：防御薄膜氧化层主要集中于SRO and HDP PASS.



防御验证：薄膜氧化层实验

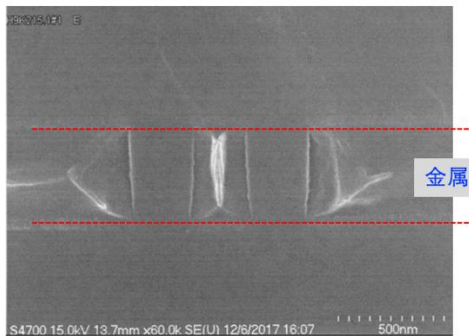
实验条件	Oxide Temp		不同次数高温老化次数后 IMD 气泡缺陷发生几率(%)						
	SRO	PASS	第一次	第二次	第三次	第四次	第五次	第六次	第七次
标准组		350	30	60	90	90	90	90	90
实验组-1	380	430	20	50	70	70	70	70	70
实验组-2		400	20	50	80	80	80	80	80
实验组-3		350	20	50	50	50	50	50	50
实验组-4	400	430	10	30	30	30	30	30	30
实验组-5		400	10	40	40	40	40	40	40
实验组-6		350	10	30	30	30	30	30	30
实验组-7	430	400	10	30	30	30	30	30	30
实验组-8		430	10	20	20	20	20	20	20
实验组-9	FSG liner	400	0	0	0	0	0	0	0

解决方案

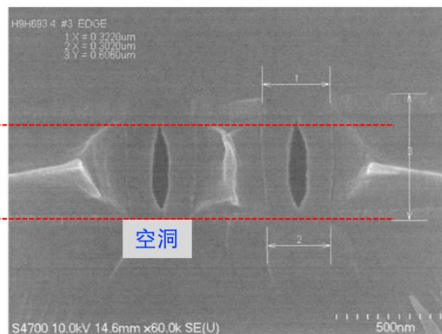
缺陷源头角度：

- ❖ 使用不含氟离子的0.25&0.35微米的IMD结构
 - 不能满足小空间填充介质层需求

0.18 μm 介电层结构填洞能力测试
没有空洞



0.25/0.35 μm 介电层填洞能力测试
非常明显的空洞



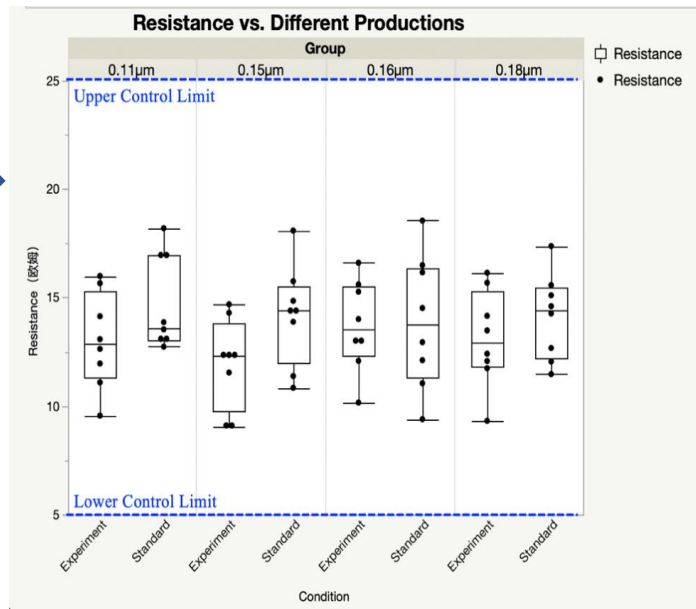
标准: 空洞高度需小于金属高度的一半

防御因素角度：

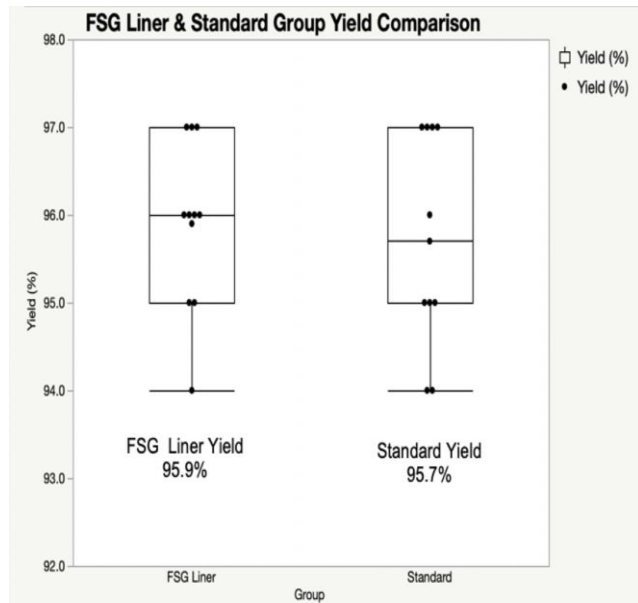
- ❖ 以FSG liner取代SRO-300A 增强抗撕裂能力

解决方案验证

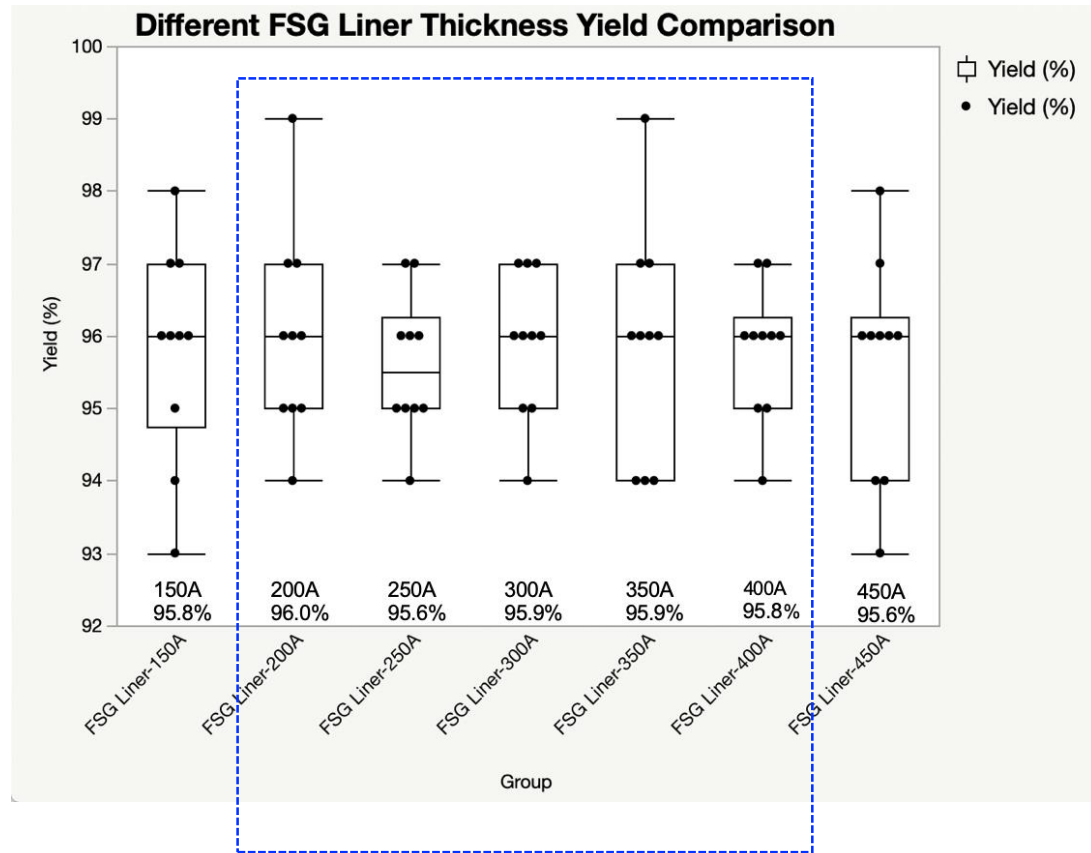
WAT



Yield



解决方案Process Window

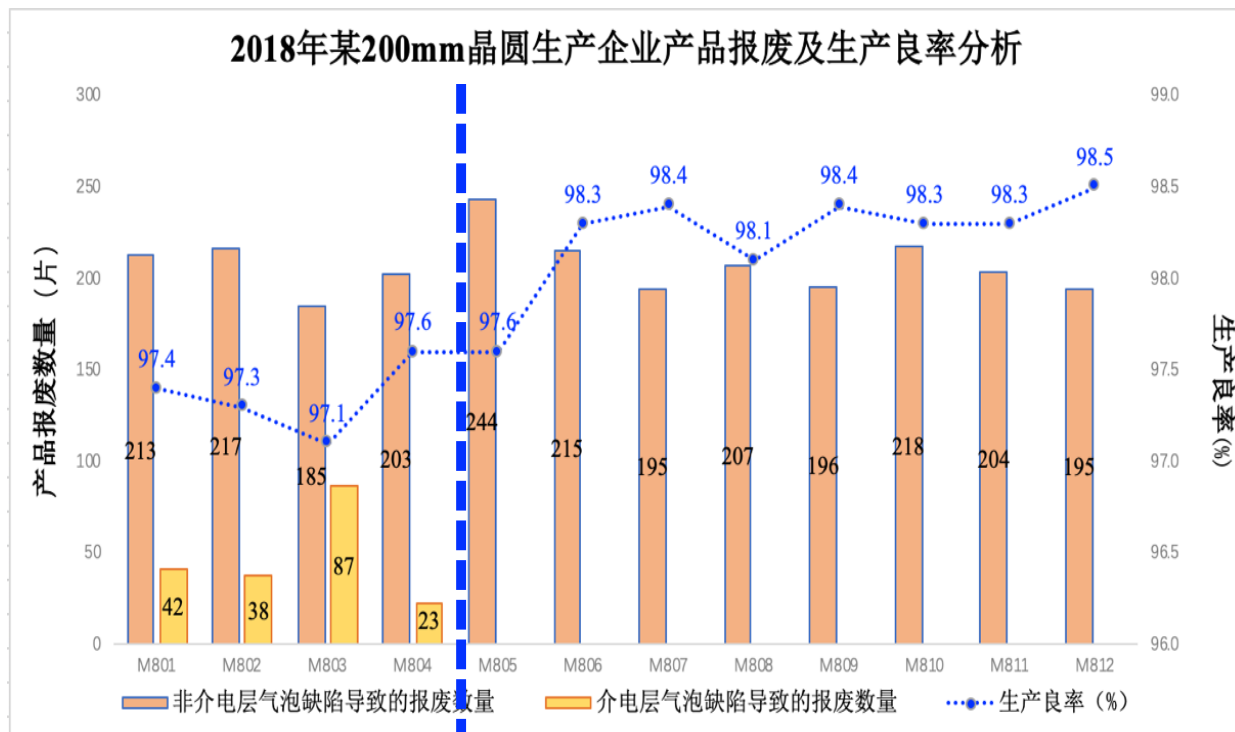


第二部分

研究成果



成果评估



Solution On line

第二部分

论文总结



总结

本文以200mm集成电路制造企业中0.11~0.18微米产品的实际情况为基础，从生产的实际出发，以困扰生产过程的实际问题：**IMD**气泡缺陷作为研究课题，就其本身而言，该课题便具有很强的现实意义。从文中的数据来看，**IMD**气泡缺陷造成的晶圆报废量已经占到了集成电路生产企业总报废量的30%。确定研究课题后，本文从生产实际中产生的大量失效样品的失效分析入手，寻找失效样品的共通性，并以5W2H的方式对问题进行描述，最大程度的认识问题，并以此为基础，推测**IMD**气泡缺陷的产生机制：0.11~0.18微米集成电路产品的**IMD**工艺中**HDP FSG** 和**PEFSG**中所包含的游离氟离子在后续高温工艺的作用下，活性加强，向外突破薄膜氧化层的束缚，将富硅含氧薄膜层撕裂向外逃逸，导致了**IMD**气泡缺陷的产生。然后此形成原理的基础上，通过对其相关的影响因子与其影响程度的分析，在验证原理的同时验证了不同因素在**IMD**气泡缺陷产生的过程中所扮演的角色，我们分清主次，抓住重点，并以此提出了可能的解决方案，同时立即着手对解决方案进行验证。依据**IMD**气泡缺陷产生的原理，为使隐藏的**IMD**气泡显现，更好的表征改善效果，本文创造了一种标准检验改善效果的方法：以连续七次正常高温老化程后产品端**IMD**气泡缺陷的发生几率和单体的严重程度来验证相关解决方案对**IMD**气泡缺陷的效果。并通过实验和原理分析，我们将解决问题的最终方案定义在改善防御措施上，选用更为致密，压应力更高的**FSG liner** 薄膜层替代相关产品结构中最薄弱的富硅氧化层，并取得了积极的效果。透过这一方案的实验产品在电性，终端良率和可靠性测试方面进行验证，得到了令人满意的结果。

最后需要指出的是，本文自始至终以解决**IMD**气泡缺陷为最高目标，同时兼顾解决方案在大规模生产中应用的可行性。在解决方案通过验证后，立即着手应用到大规模生产中，充分运用已有闲置的生产潜能，解决问题并提高生产效益。生产线导入解决方案后，对改善效果进行持续追踪，确保实验结果和大规模生产中的实际表现相吻合，可以有效的解决**IMD**气泡缺陷问题。



致谢

感谢学校导师**段力副教授**和企业导师**张洪志**对论文的指导！

感谢所有**授课老师**以及**刘刚老师**对我的教育和帮助！

感谢**各位专家**对本论文进行的各项评阅以及建议！

感谢**学校**和**公司**对本人的栽培！

2019-12-15