



上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



0.11~0.18 μm 集成电路制造当中 介电层气泡缺陷研究

答辩人：曹琛

导师：段力

专业：集成电路工程

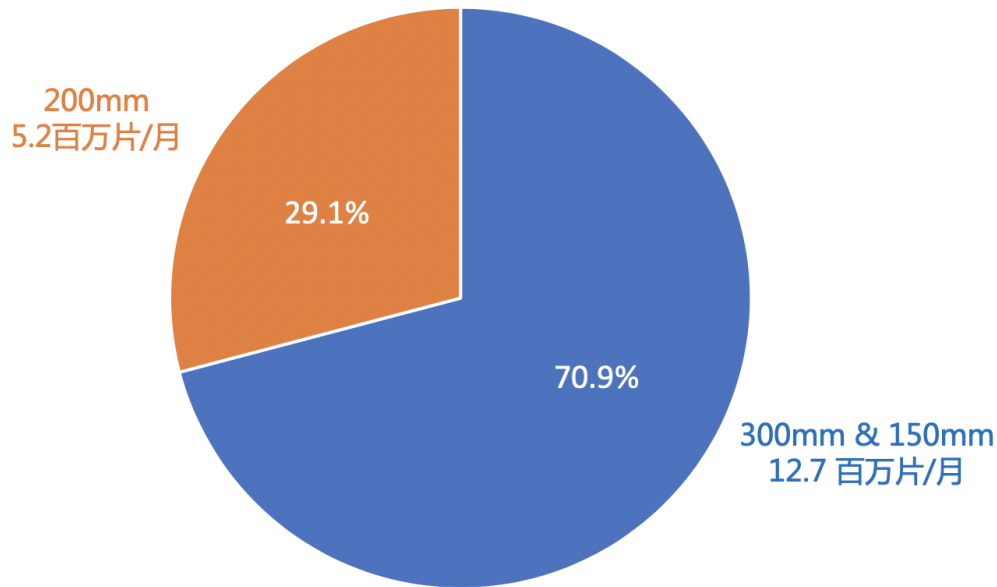
日期：2019.12.15





- 背景介绍
- 研究目的与意义
- 介电层气泡缺陷的特征
- 介电层气泡缺陷的失效机制以及解决方案
- 总结与展望

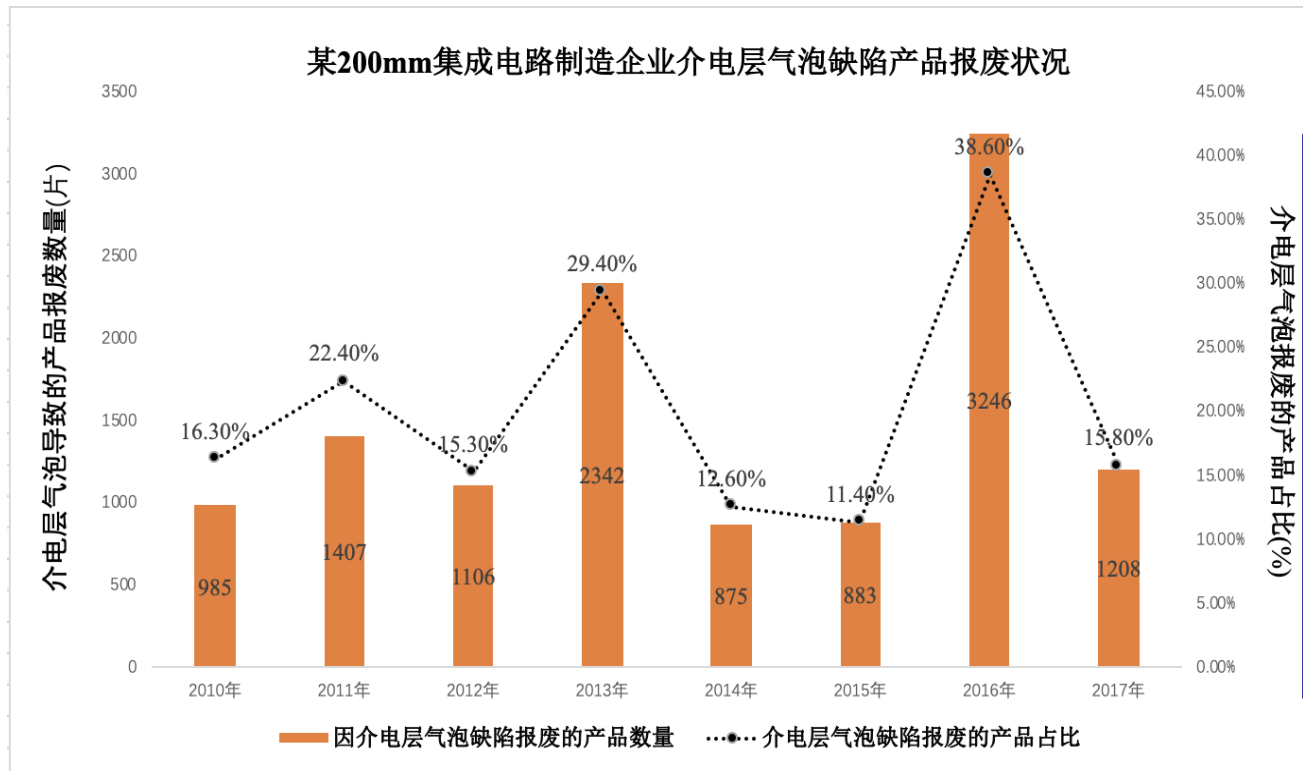




2017 年全球晶圆产品分布

以0.11~0.18微米
为主的200mm晶
圆生产在集成电路
生产链中具有非常
重要的地位





❖ 200mm 晶圆生产制造面临的主要问题之一：介电层气泡缺陷





- 背景介绍
- ➡ ● 研究目的与意义
- 介电层气泡缺陷的特征
- 介电层气泡缺陷的失效机制以及解决方案
- 总结与展望





- ① 认识介电层气泡缺陷特性
- ② 探索介电层气泡缺陷的失效机制
- ③ 寻求易于在大规模生产中应用的介电层气泡缺陷的解决方案





- ① 解决200mm集成电路生产中的顽疾：介电层气泡缺陷问题
- ② 提高产品质量和相关企业的生产良率
- ③ 在探索介电层气泡缺陷失效机制和解决方案过程中加深对工艺特性以及整合需求的理解





- 背景介绍
- 研究目的与意义
- ➔ ● 介电层气泡缺陷的特征
- 介电层气泡缺陷的失效机制以及解决方案
- 总结与展望





介电层气泡缺陷的特征

集成电路生产链

原料端-晶圆来料



集成电路制造



封装测试

IMD 气泡发生几率

0%

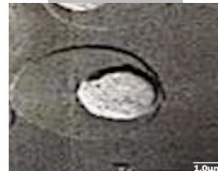
0.05%

0.0002%

重点怀疑环节



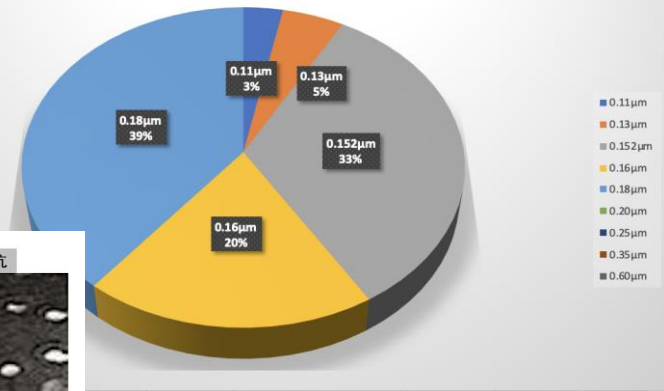
缺陷形态-凸起



缺陷形态-凹坑



Year 2012~2018 IMD bubble Production Analysis



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	
	Anneal	5000	12	是

	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	PASS
Top Metal-1	拆除外保护层, 第一层顶层金属外露	有	TM(1)
Top Metal-2	拆除第一层顶层金属, 第二层顶层金属外露	有	TM(2)
IMD-5	拆除第二层顶层金属, 顶层介电层外露	有	IMD5
Metal-5 & IMD-4	拆除顶层介电层, 第五层金属层外露	无	IMD4&M5(1)
IMD-4	拆除第五层金属层, 第四层介电层外露	无	IMD4

集成电路生产端

0.11~0.18微米产品

顶层介电层

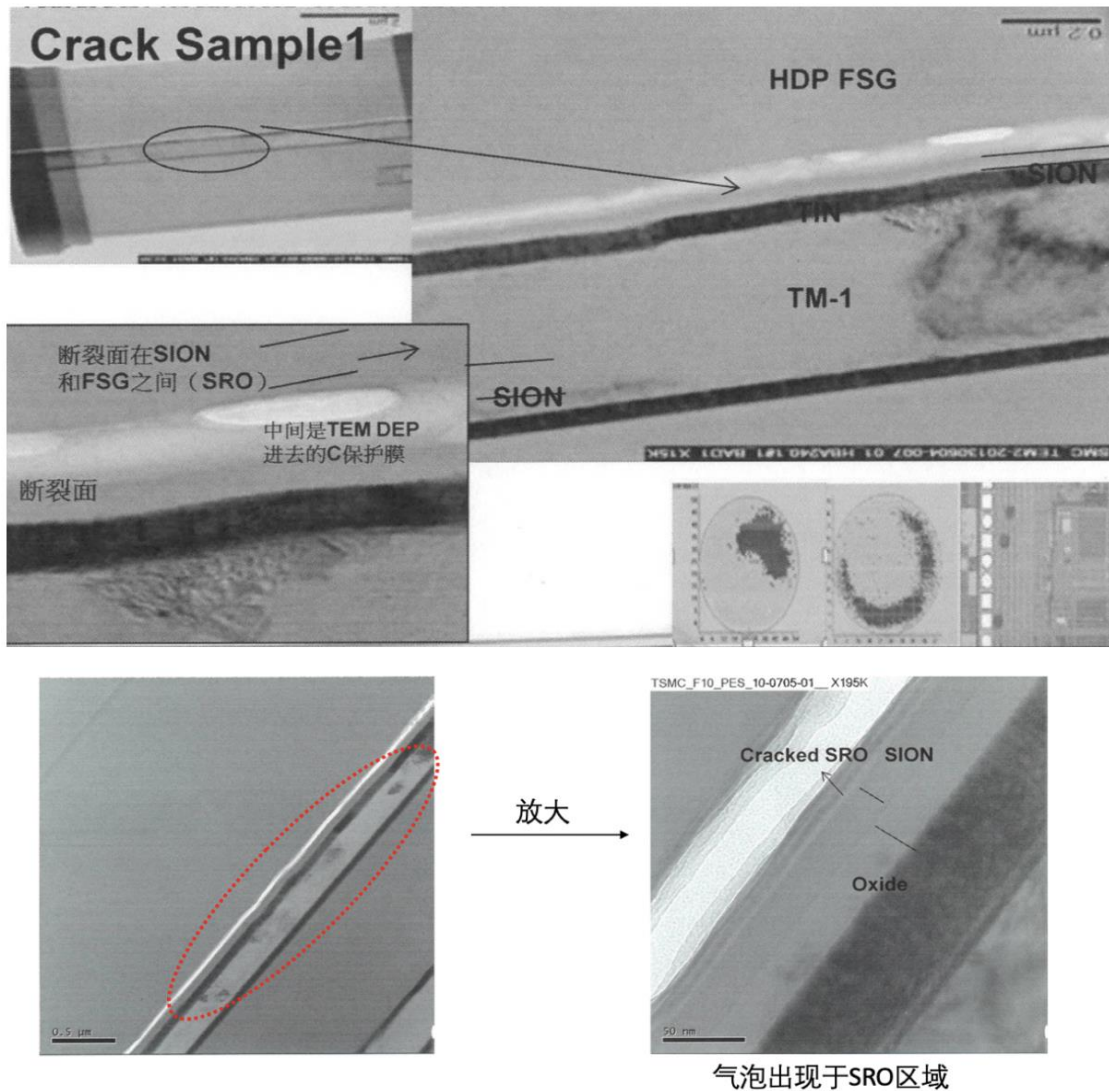
高温老化工艺后

圆形



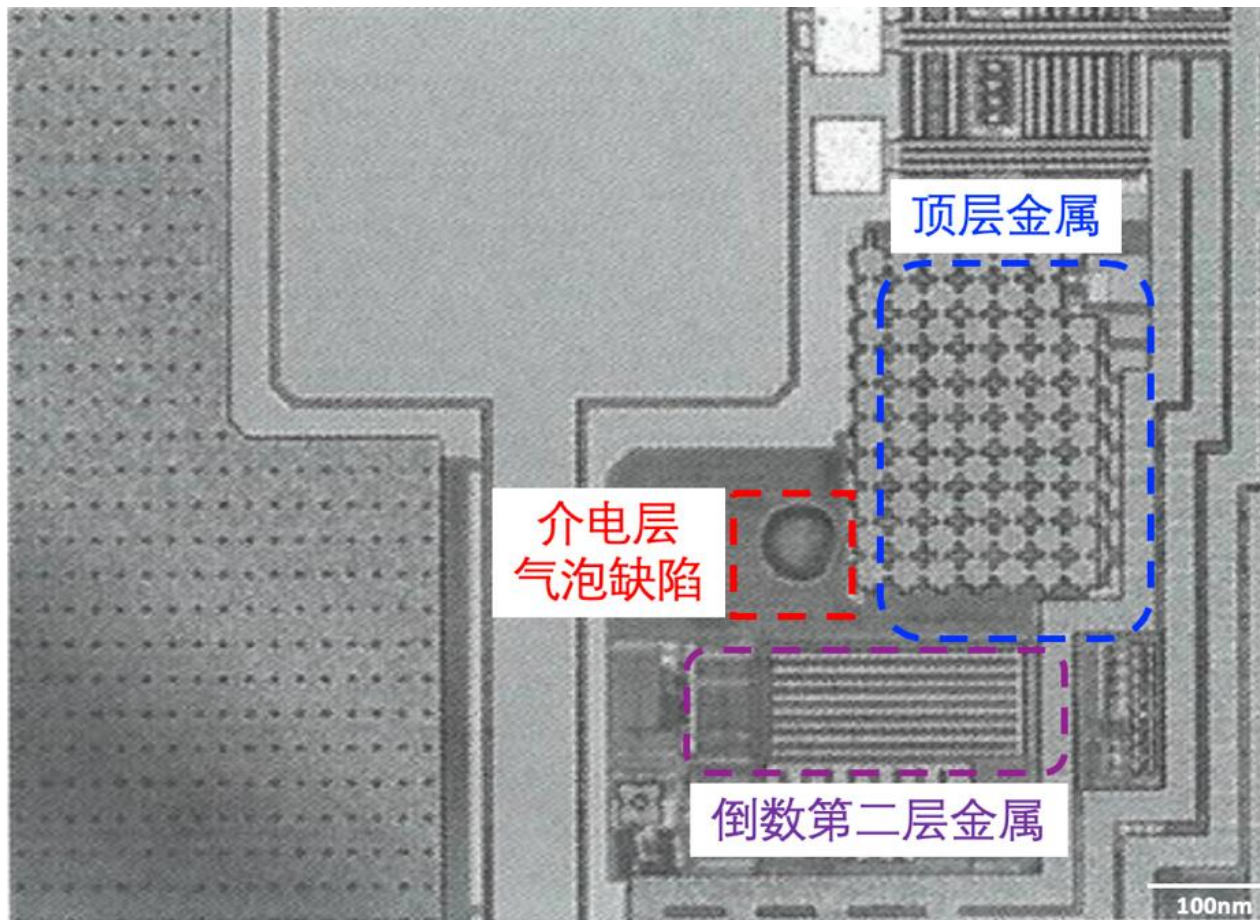


介电层气泡起始位置：富硅氧化层



气泡缺陷→顶层介电层→富硅氧化层





介电层气泡缺陷→缺陷上方无顶层金属导线





- 背景介绍
- 研究目的与意义
- 介电层气泡缺陷的特征
- ➡ ● 介电层气泡缺陷的失效机制以及解决方案
- 总结与展望





缺陷和产品的介电层结构相关

0.25~0.35μm

0.20 μm

0.11~0.18μm

PESN	PESN	PESN
VIA Oxide	HDP PASS	HDP PASS or VIA Oxide
Cap Oxide 320	Cap Oxide 320	Cap Oxide 320
PETEOS	PETEOS	PEFSG
SACVD	IMD3260	HDP FSG
VIA1-1K	VIA1-1K	SRO-300Å
Metal AlCu-4K	Metal AlCu-4K	Metal AlCu-4K

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	PASS
Top Metal-1	拆除外保护层，第一层顶层金属外露	有	TM(1)
Top Metal-2	拆除第一层顶层金属，第二层顶层金属外露	有	TM(2)
IMD-5	拆除第二层顶层金属，顶层介电层外露	有	IMD5
Metal-5 & IMD-4	拆除顶层介电层，第五层金属层外露	无	IMD4&M5(1)
IMD-4	拆除第五层金属层，第四层介电层外露	无	IMD4

仅发生于顶层介电层无金属导线覆盖的区域

→工艺对比差异存在于介电层结构

→缺陷于介电层结构相关





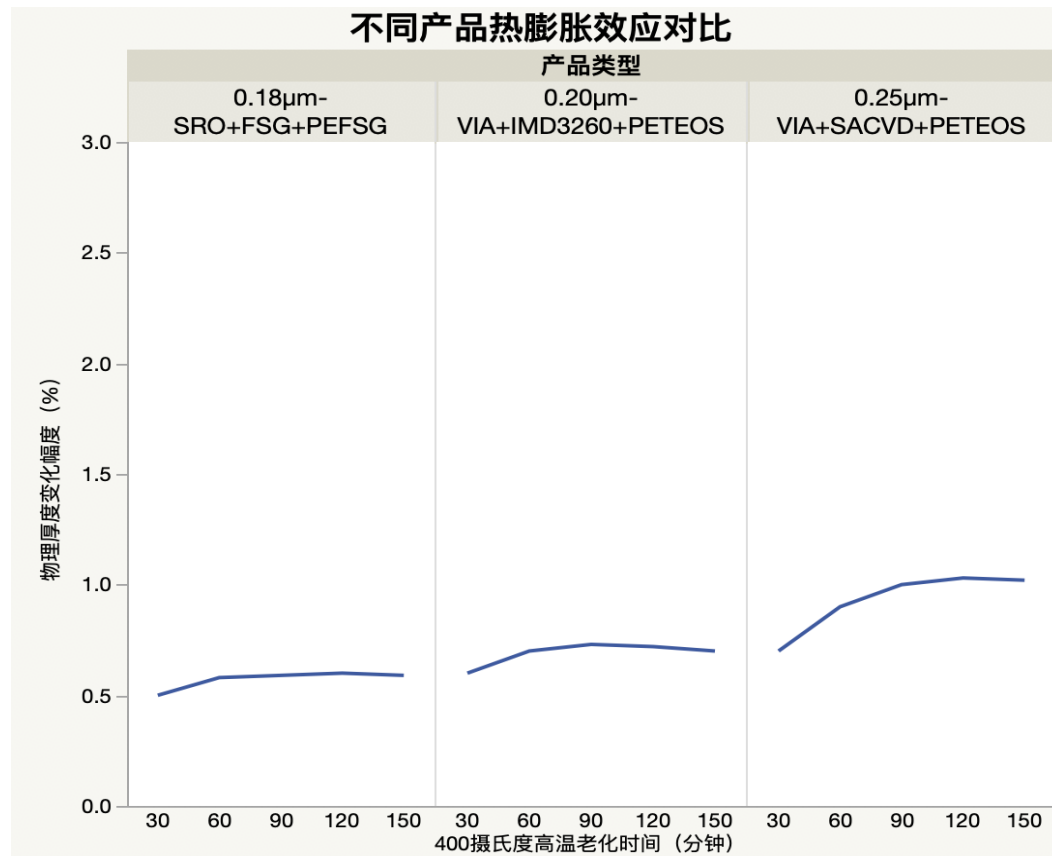
晶圆结构位置	薄膜氧化层类型	应用产品类型 (μm)	应力 (Mpa)	蚀刻速率 ($\text{\AA}/\text{S}$)	氟浓度 (F%)	Remark
介电层 第一层	VIA-1K	0.25~0.35	27~33	141~154	0	物理特性类似
	SRO-300 \AA	0.11~0.18	26~35	151~159	0	
介电层 第二层	SACVD	0.25~0.35	178~195	179~181	0	除氟含量外, IMD 和 FSG 物理特性类似
	IMD3260	0.20	84~93	50~64	0	
	HDP FSG	0.11~0.18	81~99	51~63	4.13~4.33	
介电层 第三层	PETEOS	0.25~0.35	116~129	119~127	0	除氟含量外, 两者物理特性类似
	PEFSG	0.11~0.18	118~130	107~123	5.11~5.42	

物理特性类似，差异点仅存在于介电层
结构工艺中是否含有氟元素





差异薄膜氧化层热膨胀效果测试

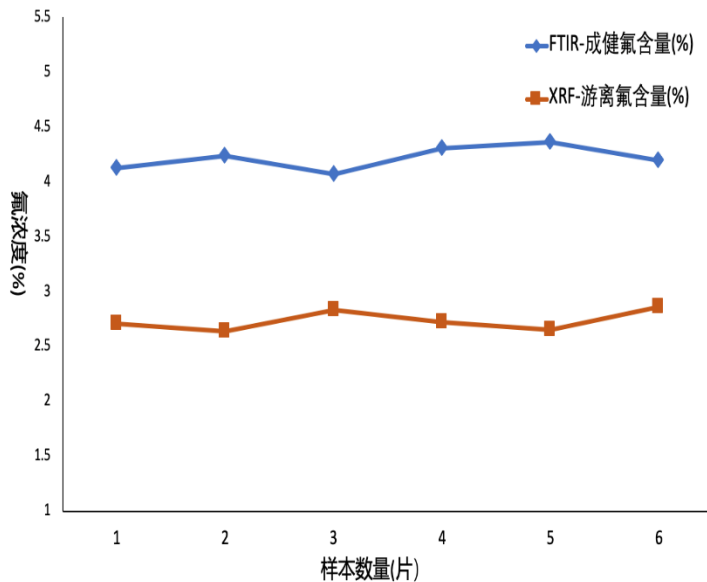


0.18微米与0.20微米产品热膨胀效果类似-非气泡缺陷的主要推动者



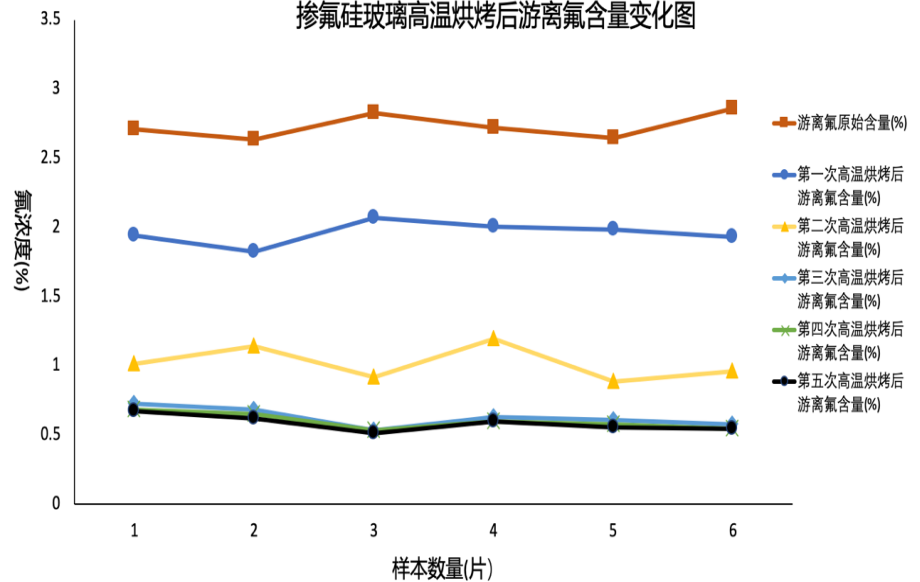


掺氟硅玻璃氟元素形态对比



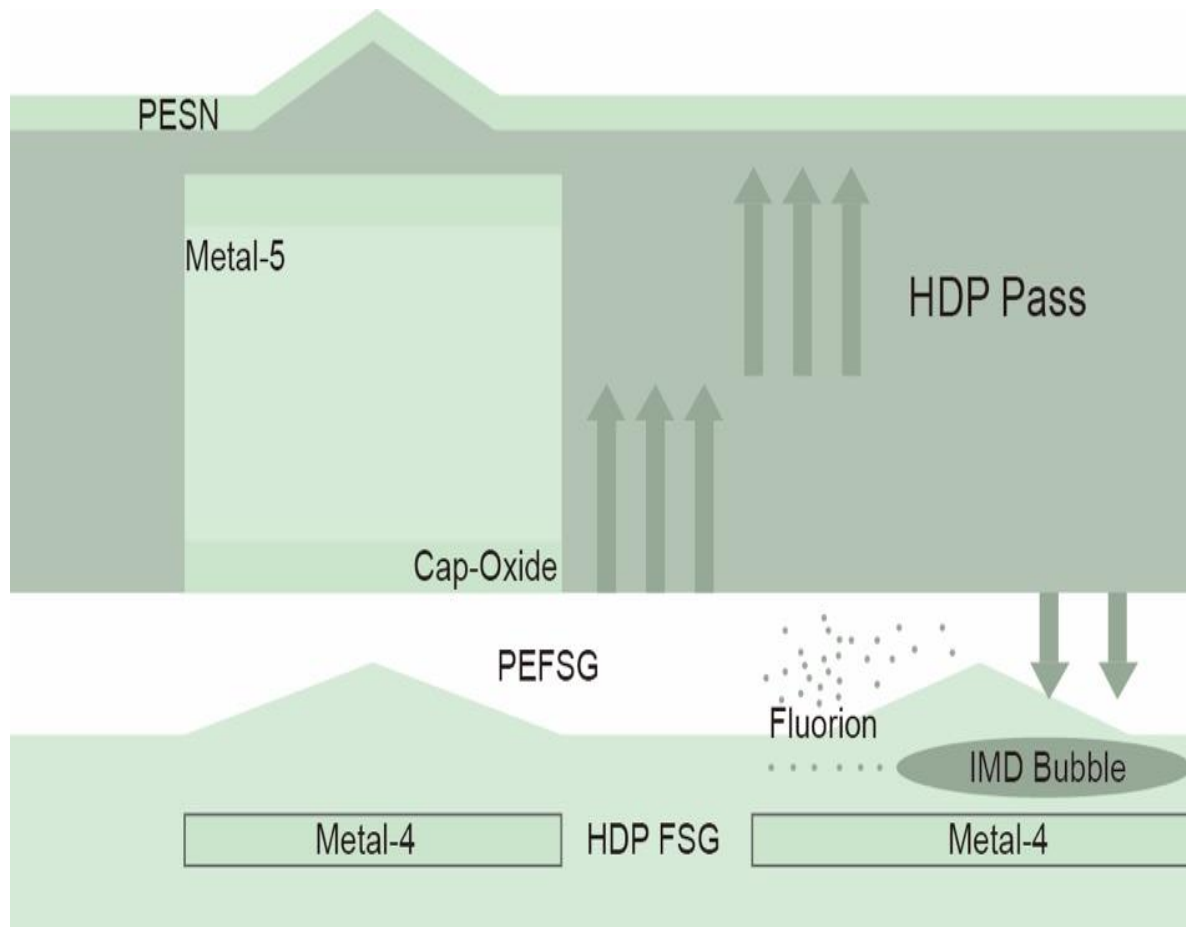
两种形态-成键氟化物和游离氟离子

掺氟硅玻璃高温烘烤后游离氟含量变化图



游离氟离子在高温环境中急速向外逸出



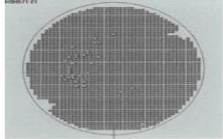
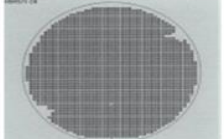

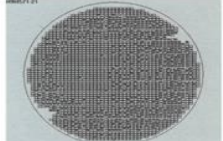




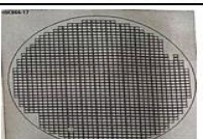
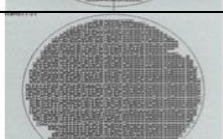





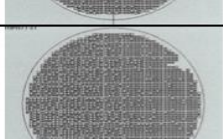

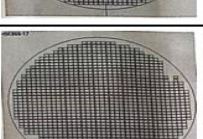


游离氟离子逸出→聚集于顶层金属导线和富硅氧化层之间→突破并撕裂薄膜氧化层





解决方案效果检验方法-七次高温老化

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

七次高温老化工艺可以有效涵盖下游封装测试环节高温环境，缩短验证流程：

- 潜在的缺陷产品可以被有效强化而显现。
- 健康产品不会因此收到影响。



表 3-2 IMD 气泡缺陷和氟离子浓度关系

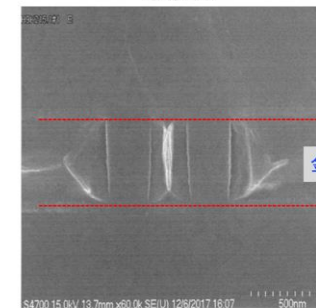
Table 3-2 The correlation between IMD bubble performance and F%

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

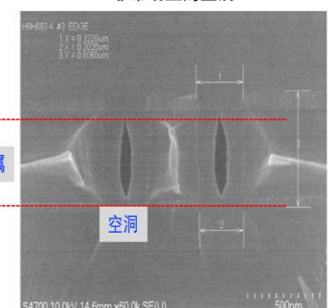
氟元素含量降低可以减小介电层气泡缺陷的发生几率，但不能完全消除介电层气泡缺陷：

- 使用不含氟元素的介电层可以让介电层气泡缺陷消失。
- 现有工艺不能满足介电层之间的隔离需求。

0.18 μ m 介电层结构填洞能力测试
没有空洞



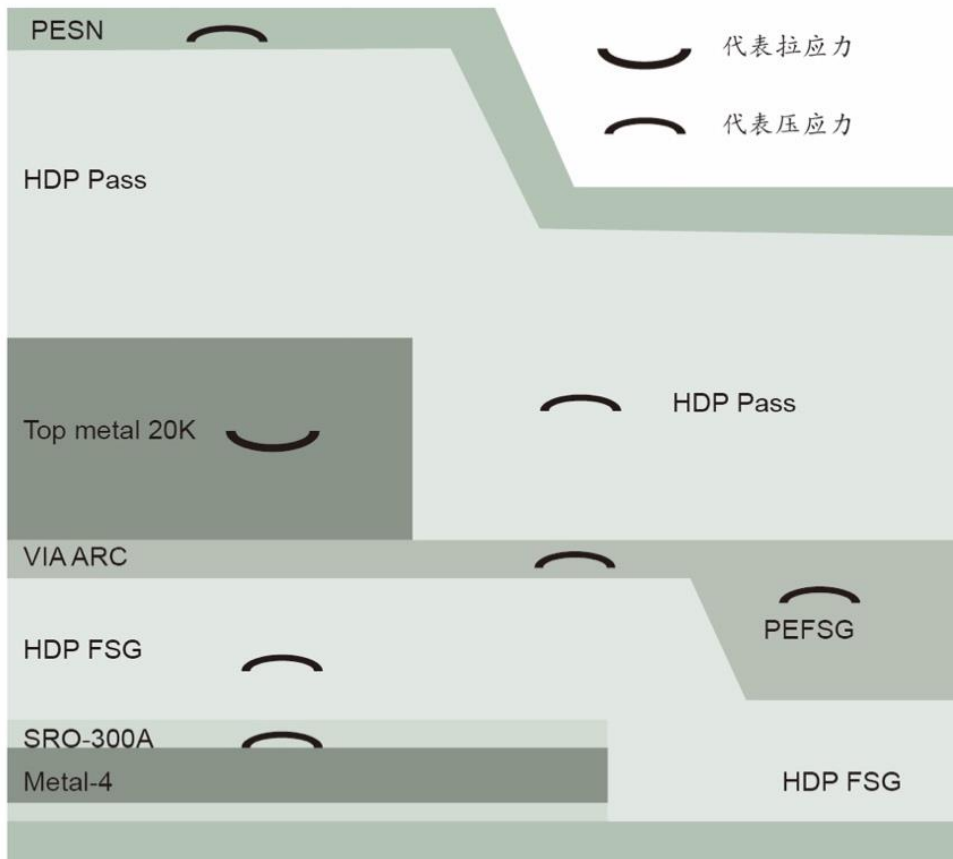
0.25/0.35 μ m 介电层填洞能力测试
非常明显的空洞



标准：空洞高度需小于金属高度的一半



解决方案：增强防御能力



从晶圆结构中薄膜氧化层的性质来看，主要防御的薄膜氧化层为：

- 富硅氧化层。
- 外保护层：与可靠性强相关，调整影响较大。





解决方案：增强防御能力

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

- 以FSG liner 替代富硅氧化层可以消除介电层气泡缺陷。
- 改变外保护层反应方式无法完全消除介电层气泡缺陷。





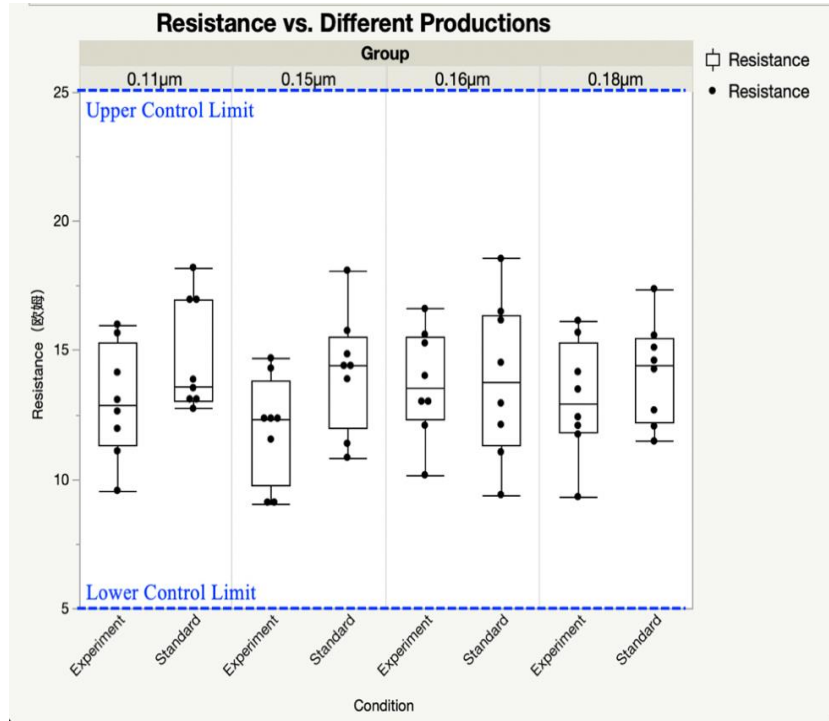
解决方案：增强防御能力效果确认

条件	标准组		一般恶化组		极度恶化组	
	标准氟含量		氟含量上限		氟含量超规	
氟元素含量	HDP FSG F%: 4.15% PEFSG F%: 5.3%		HDP FSG F%: 4.6% PEFSG F%: 5.9%		HDP FSG F%: 5.1% PEFSG F%: 6.5%	
高温老化次数	外观检查结果	AOI扫描图	外观检查结果	AOI扫描图	外观检查结果	AOI扫描图
第一次高温老化	OK		OK		OK	
第二次高温老化	OK		OK		OK	
第三次高温老化	OK		OK		OK	
第四次高温老化	OK		OK		OK	
第五次高温老化	OK		OK		OK	
第六次高温老化	OK		OK		OK	
第七次高温老化	OK		OK		OK	

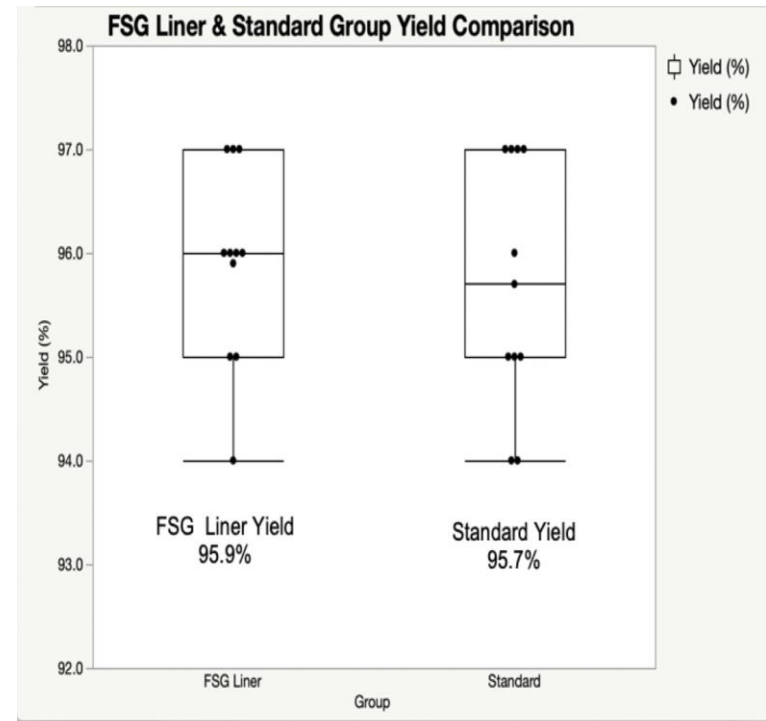
以FSG liner 替代富硅氧化层可以使缺陷产品在恶化条件下依然没有介电层气泡缺陷出现：

- 高氟浓度。
- 额外七次高温老化。





不同实验产品的电性与标准组处在同一个水准上，没有特别明显的差异

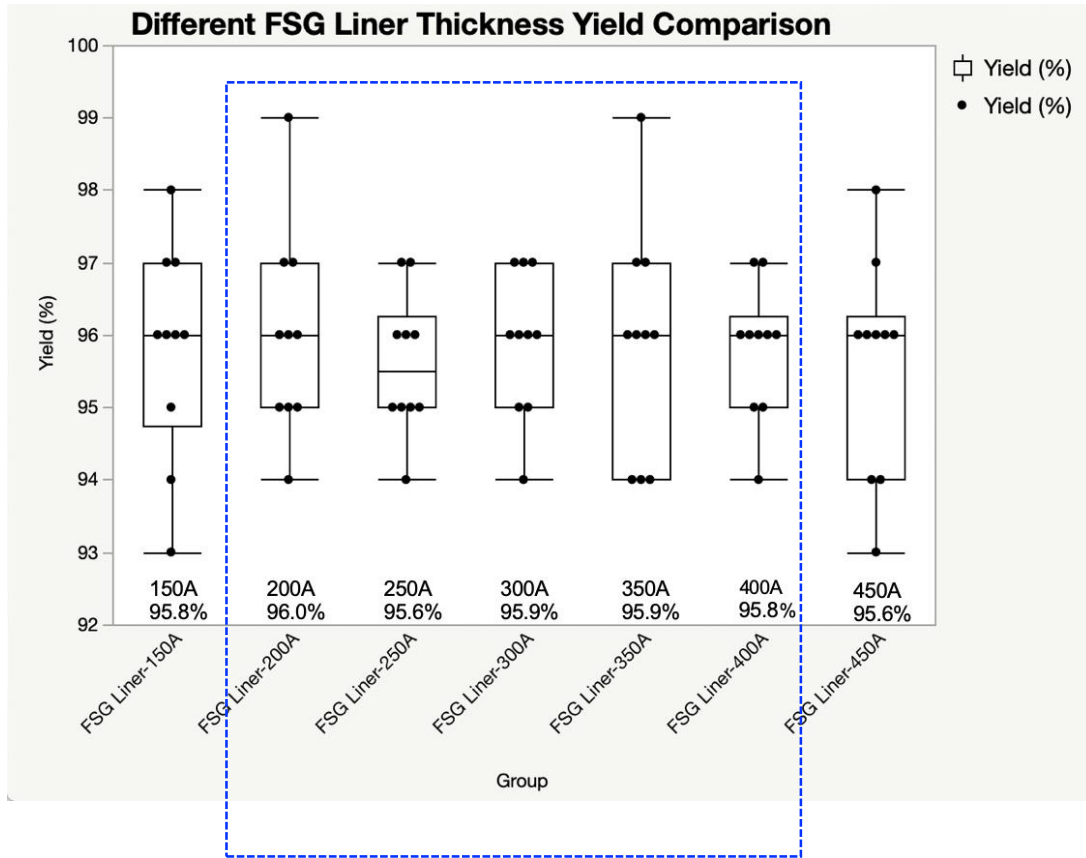


实验产品的良率与标准组处在同一个水准上，没有特别明显的差异





解决方案的安全制程管控范围



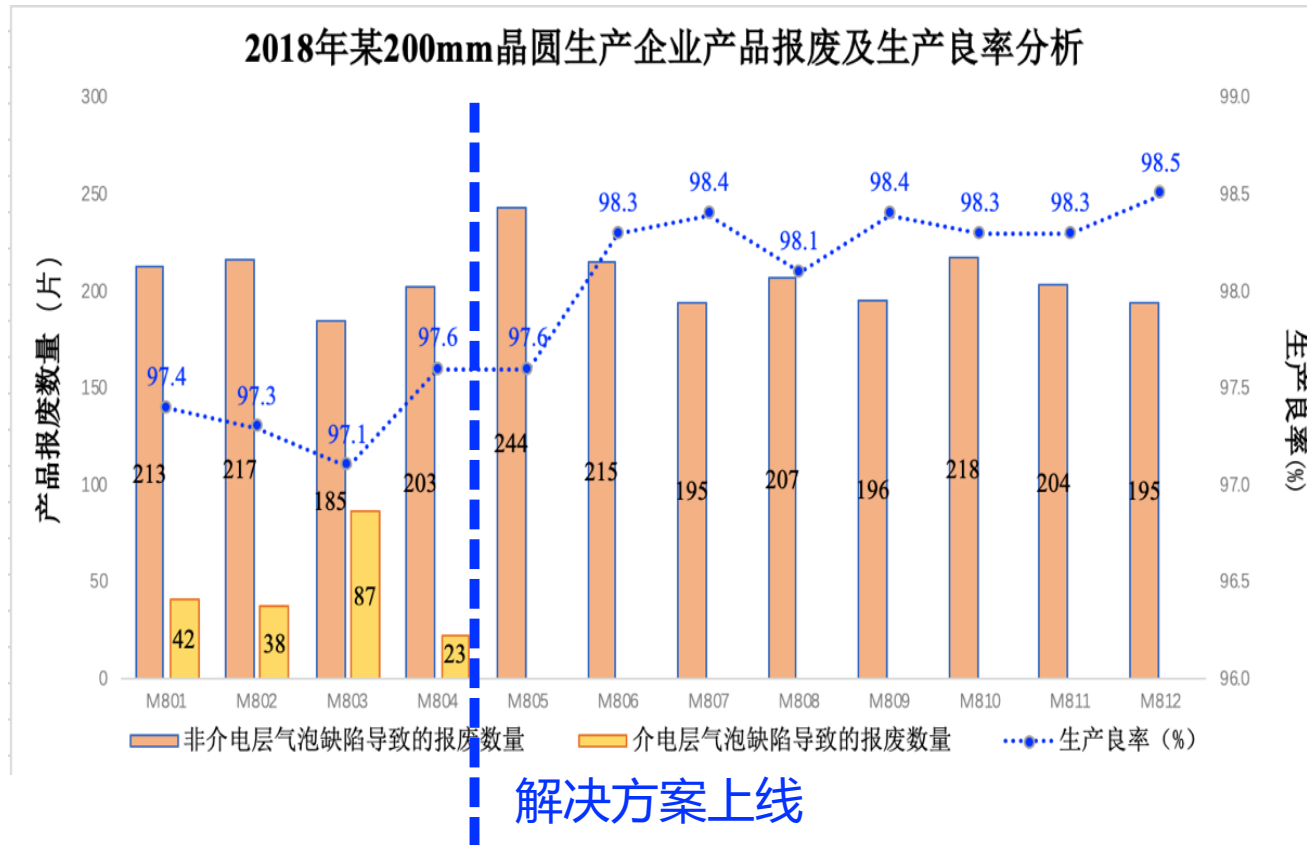
以FSG Liner 取代富硅氧化层的解决方案拥有足够的安全制程管控范围

- 300+/- 150A 范围内对产品没有明显差异。





解决方案大规模应用效果确认



解决方案大规模应用效果确认：介电层气泡缺陷消失，生产良率提升0.8%。





- 背景介绍
- 研究目的与意义
- 介电层气泡缺陷的特征
- 介电层气泡缺陷的失效机制以及解决方案
- ➡ ● 总结与展望





结论

- ✓ 准确的认识了介电层气泡缺陷的特征，并在此基础上认识到介电层气泡缺陷与0.11~0.18微米产品的介电层结构工艺相关。
- ✓ 通过将存在介电层缺陷的0.11~0.18微米产品与正常产品进行工艺物理特性的对比，澄清了介电层缺陷形成的主要推动者为掺氟硅玻璃工艺中的游离氟离子，排除了仅仅依靠薄膜氧化层本声的应力，热膨胀特性等特性导致缺陷产生的可能性。
- ✓ 提出并验证了在集成电路生产端运用多次高温老化的方法作为检验介电层气泡缺陷改善效果的标准，有效的缩短了验证周期。
- ✓ 提出并验证了介电层气泡缺陷的失效模型：掺氟硅玻璃工艺中的游离氟离子在高温环境中活性加强，突破外围薄膜氧化层的限制并将其撕裂，导致气泡缺陷的产生。
- ✓ 提供了便于在大规模生产中应用的介电层气泡缺陷的解决方案：以FSG liner 取代富硅氧化层，改善生产良率0.8%。





- ① 在集成电路生产企业中建立科学规范的工艺改善流程。
- ② 研究持续提升集成电路生产企业生产良率的方向和机遇点。
- ③ 建立并打通集成电路生产，封装测试相关企业之间的沟通路径，相互学习，共同成长。





致谢

- ◆ 感谢我的导师段力教授，段老师为人师表的工作作风、实事求是的处事原则、严谨治学的科研精神、诲人不倦的育人态度让我终身受益。
- ◆ 感谢我的企业导师张洪志同志在科研和生活中给予的帮助。感谢台积电的兄弟姐妹们在实验和学习中给予的帮助。
- ◆ 感谢我的家人和朋友给予我的关怀和照顾，以及一如既往的支持与鼓励。





上海交通大学
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY



**谢谢！
敬请批评指正**

