

微电子与电路基础

黄如 陈江

北京大学信息科学技术学院

《微电子与电路基础》

课程简介

分立电路 集成电路

- ※ 课程目的
- ※ 课程内容(课程提纲)
- ※ 讲授方式
- ※ 参考书
- ※ 考核方法

课程目的

※ 电路方面

- ☞ 初步掌握与电路相关的基础知识、数字电路、模拟电路、数模混合电路等基础知识

※ 微电子方面

- ☞ 了解什么是微电子学、历史、现状和未来;
 - ☞ 初步掌握
 - 半导体物理
 - 半导体器件物理
 - 集成电路工艺集成电路设计及设计自动化(EDA)技术
 - 微机电系统技术等
- 对微电子学有一个比较全面的初步认识

课程内容

- 绪论
- 半导体物理、半导体器件基础
半导体, 晶体管, 简单集成电路
- 集成电路制造工艺
- 集成电路设计及其设计自动化
- 系统芯片和微机电系统MEMS
- 微电子技术发展的规律和趋势

• 线性电路

- 模拟电路
- 数字电路
- 数模混合电路

课程进度

✱ ch1 绪论 (1)

✱ ch2 半导体物理、半导体器件基础 (3)

✱ ch3 线性电路 (2)

☞ 无源元件：电阻、电容、电感、变压器

☞ 有源元件：电源和信号源、受控源等

☞ 基本分析方法

✱ ch4 模拟电路(3)

☞ 基本概念

☞ 运算放大器

☞ 收音机的原理框图

✱ch5 数字电路(3)

☞ 基本概念

☞ 电子钟、计算器的原理框图

✱ ch6 数模混合电路(1)

☞ 基本概念、手机的原理框图

集成电路

✱ ch7 集成电路制造工艺 (3)

✱ ch8 集成电路设计及其设计自动化系统 (4)

✱ ch9 系统芯片和微机电系统MEMS (1)

✱ ch10 微电子技术发展的规律和趋势 (1)

授课、学生成绩评定方法

- ※ 课堂讲授为主

- ※ 学生成绩评定方法：期末考试占70%，作业占30%。

- ※ 授课教师

黄如：理科2号楼2717室， Tel: 62757761

huangr@ime.pku.edu.cn

陈江： chenj@ele.pku.edu.cn

✱ 助教

☞ 殷俊: yinjun@ime.pku.edu.cn, 62752546

☞ 吴大可: wudk@ime.pku.edu.cn, 62752546

✱ 课程主页

☞ <http://ee.pku.edu.cn/iMac>

✱ 参考书

☞ 《微电子学概论》，张兴/黄如/刘晓彦，北京大学出版社，2000年1月

☞ 《电路基础》，陈江，讲义，网上下载

绪 论

绪 论

- ✱ 电子学、微电子学、集成电路的基本概念

- ✱ 集成电路的分类

- ✱ 微电子学的基本特点

- ✱ 电子技术、微电子技术的战略地位

- ✱ 微电子技术的发展历史

- ✱ 微电子技术的发展现状

- ☞ 我国微电子发展概况

✱ 电子学(electronics): 研究用电子传输、存储、处理信息的学科
核心是电路

✱ 分立电路: 将晶体管、二极管等有源器件和电阻、电容等无源器件在电路板上连接起来, 实现一定的电路功能

*微电子学: Microelectronics

☞ 微电子学——微型电子学

电子学

微电子学



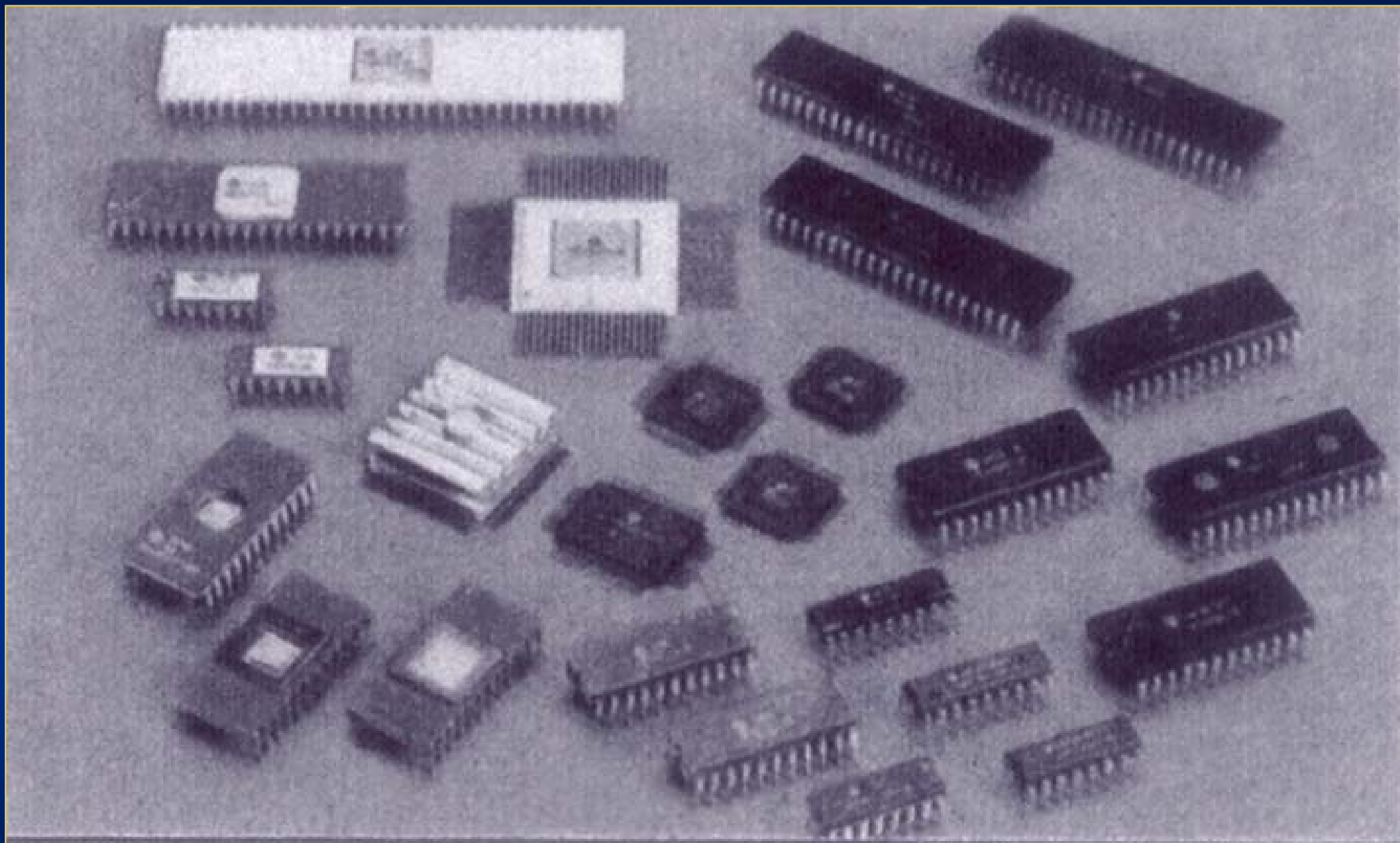
✱微电子学

核心——集成电路

✱集成电路:

✱Integrated Circuit, 缩写IC

- ☞ 将晶体管、二极管等有源器件和电阻、电容等无源器件，按照一定的电路互连，“集成”在一块半导体单晶片（如硅或砷化镓）上
- ☞ 通过一系列特定的加工工艺来集成
- ☞ 封装在一个外壳内
- ☞ 执行特定电路功能



封装好的集成电路

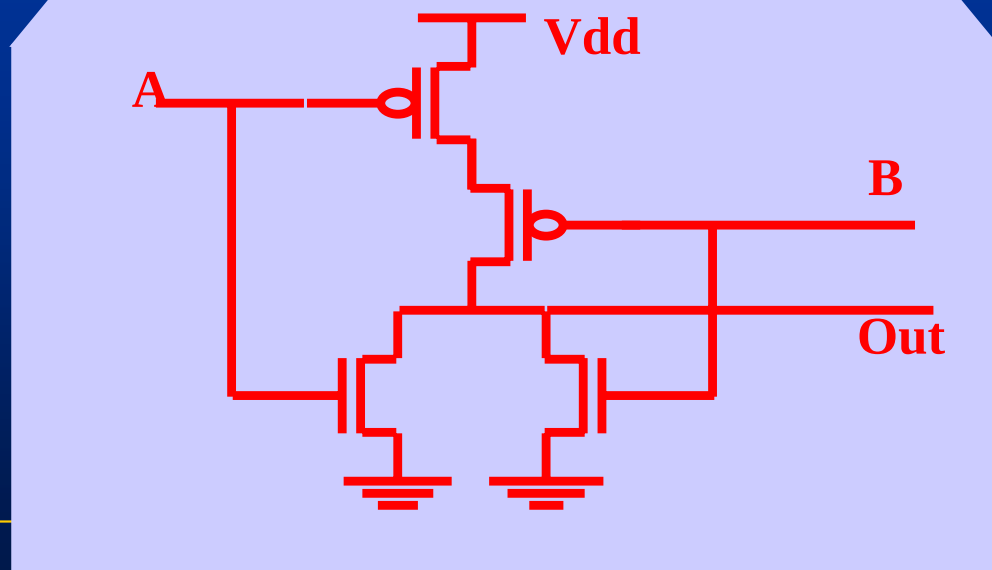
*微电子学

- ☞ 研究在固体（主要是半导体）材料上构成的微小型化器件、电路及系统的电子学分支学科
- ☞ 脱胎于电子学和固体物理学的边缘性的技术学科

集成电路

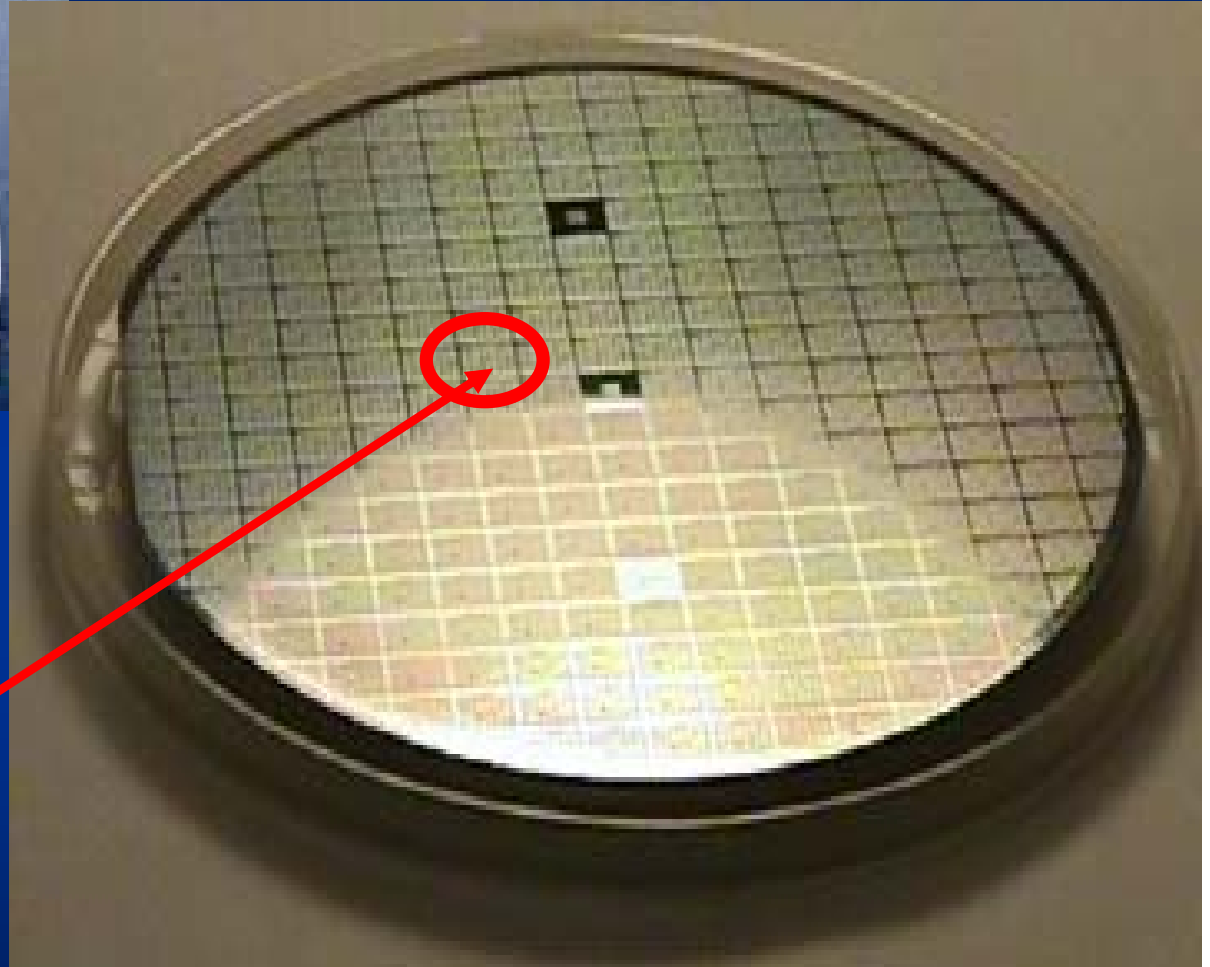


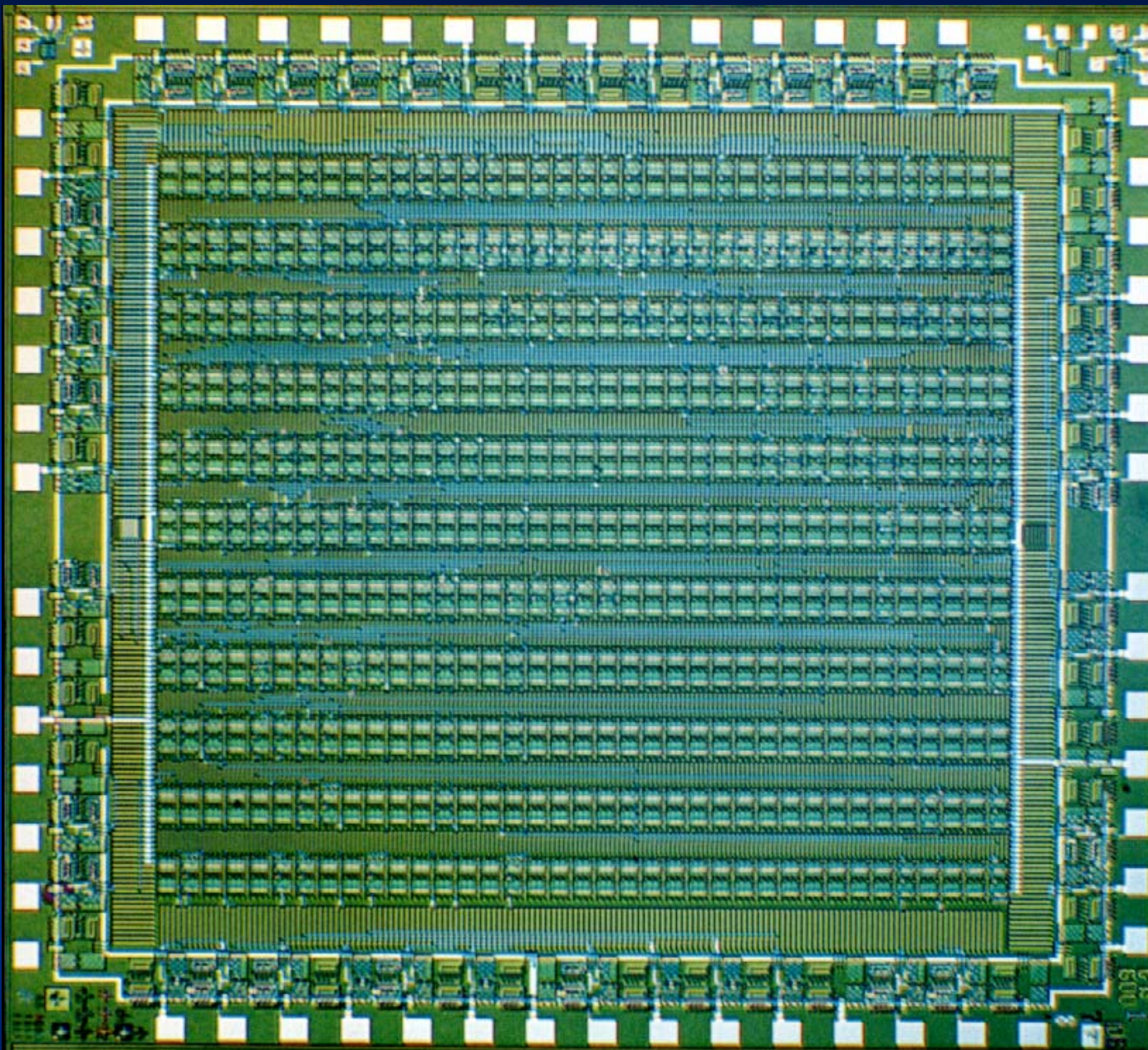
• 集成电路的内部电路



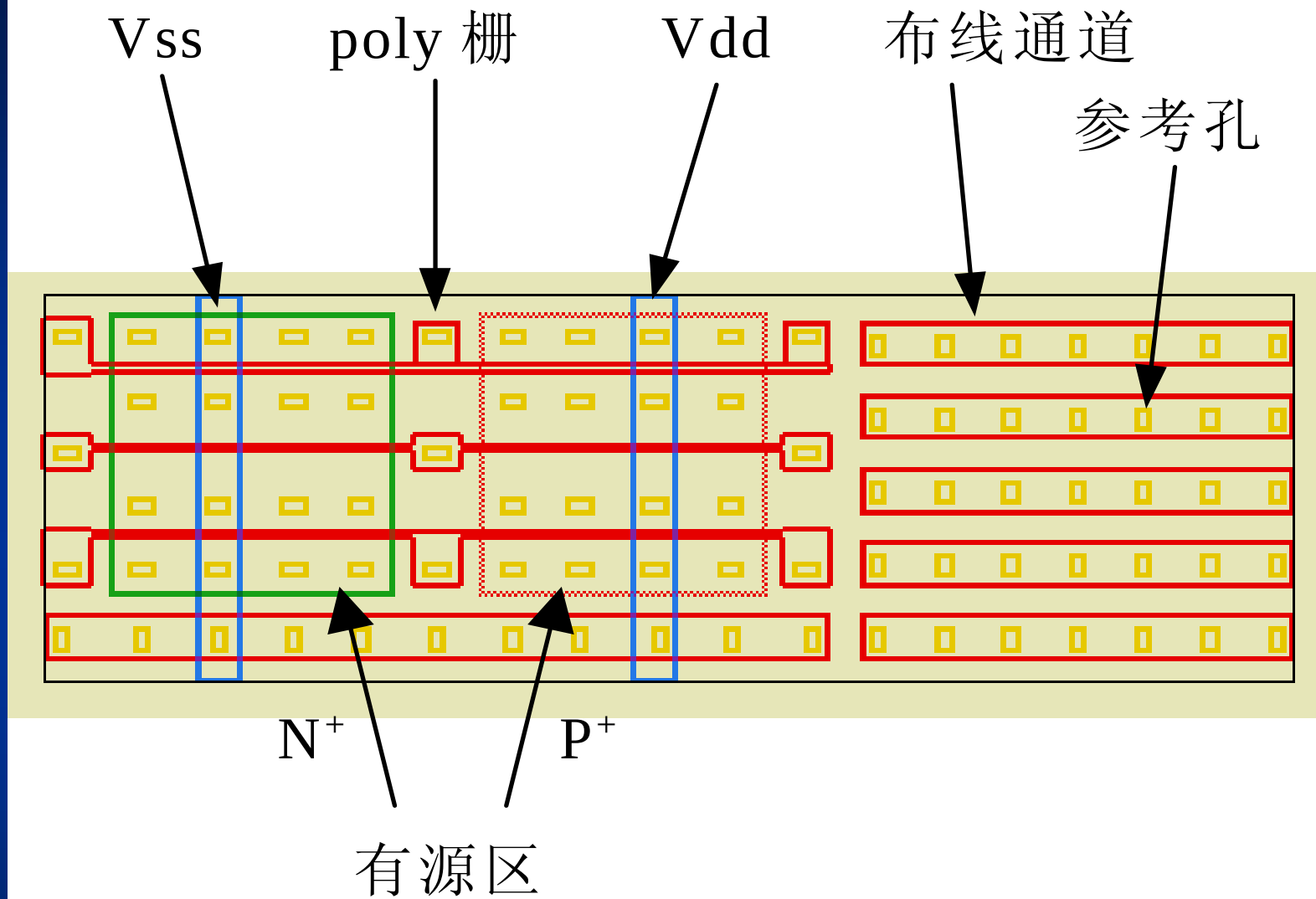


硅单晶片与加工好的硅片
硅片: wafer
芯片: chip, die

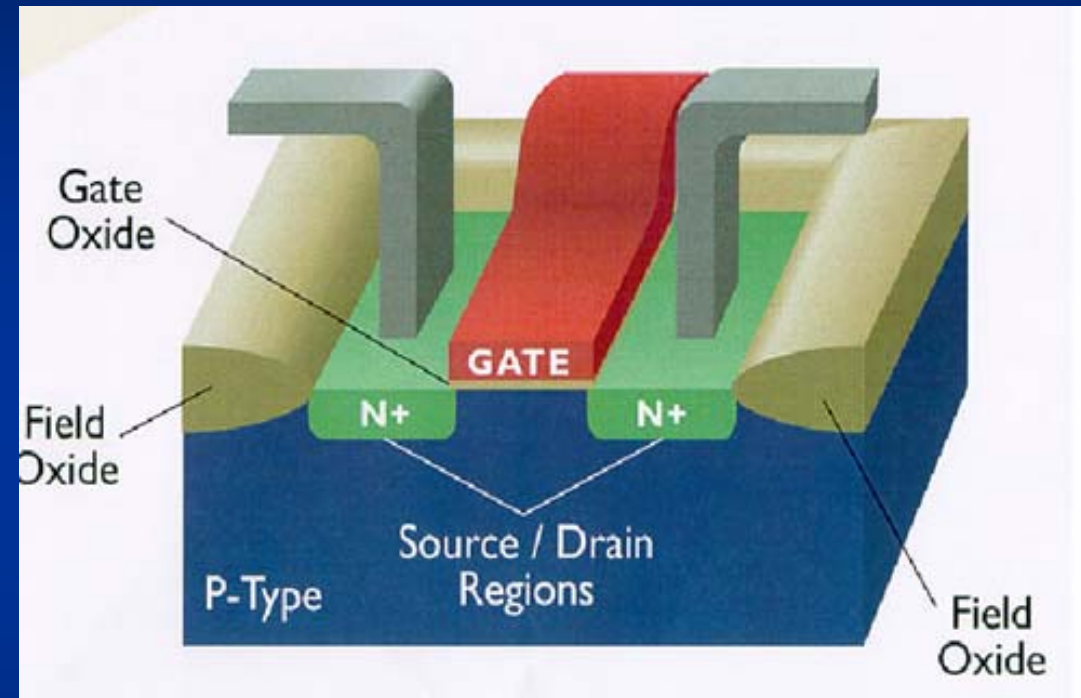
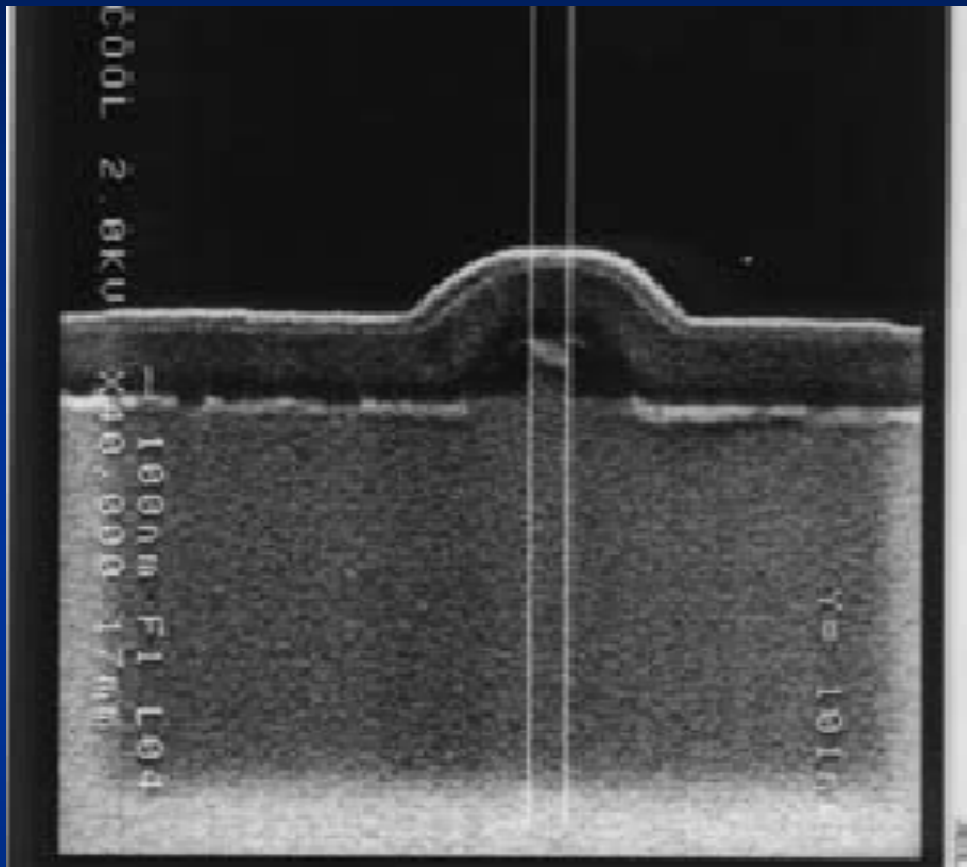




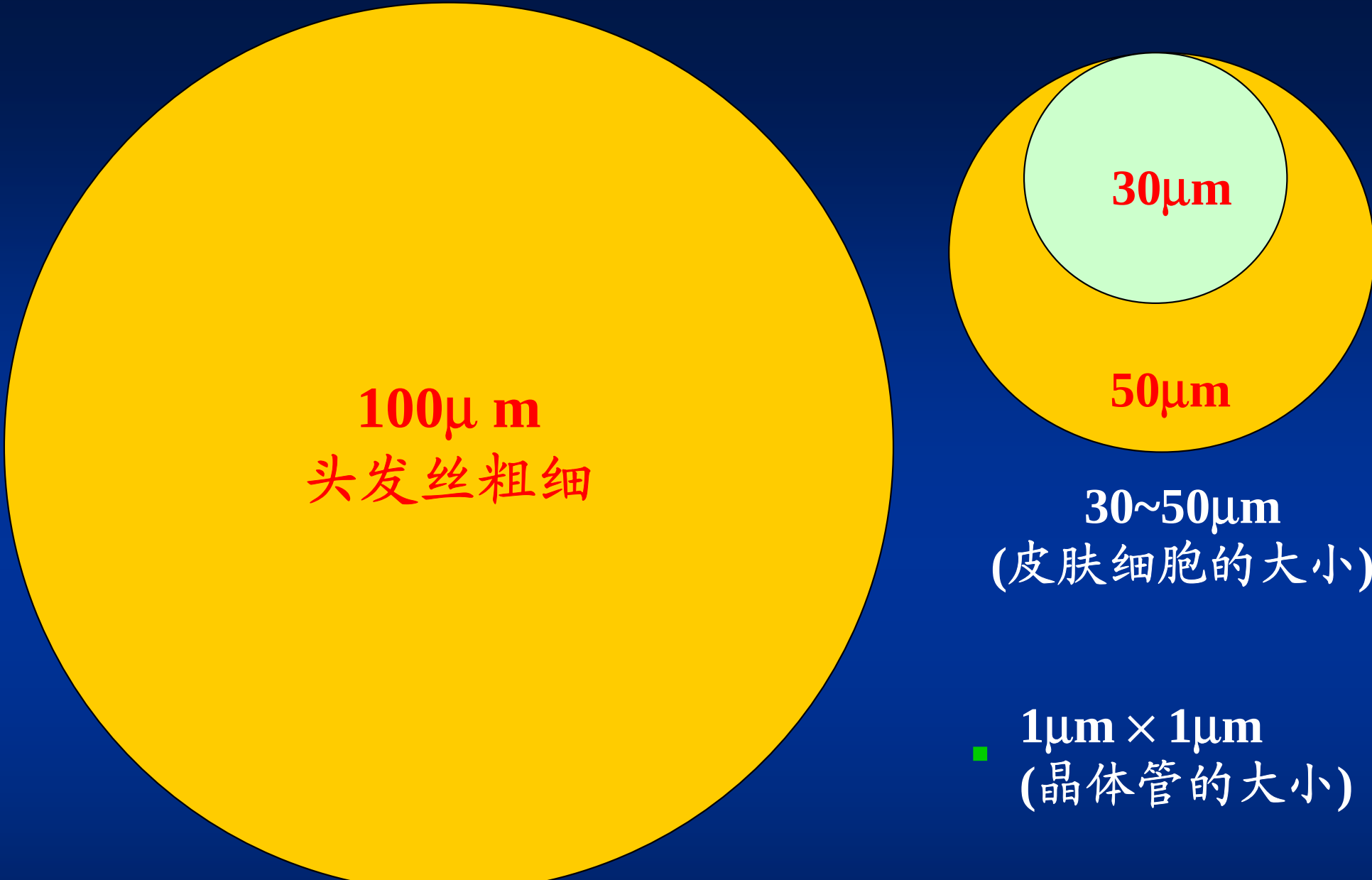
集成电路芯片的显微照片



集成电路的内部单元



微电子学中的空间尺度通常是以微米和纳米为单位的



The diagram consists of three concentric circles on a dark blue background. The largest circle is yellow and contains the text '100μ m' and '头发丝粗细'. Inside this circle is a smaller yellow circle containing the text '50μm'. Inside the 50μm circle is a small light green circle containing the text '30μm'. Below the 50μm circle is the text '30~50μm (皮肤细胞的大小)'. To the right of the 30μm circle is a small green square followed by the text '1μm × 1μm (晶体管的大小)'.

100μ m
头发丝粗细

30μm

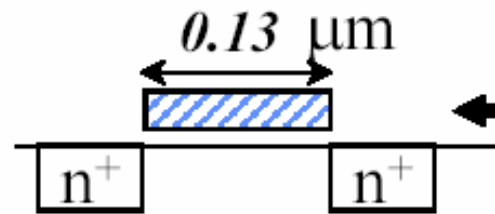
50μm

30~50μm
(皮肤细胞的大小)

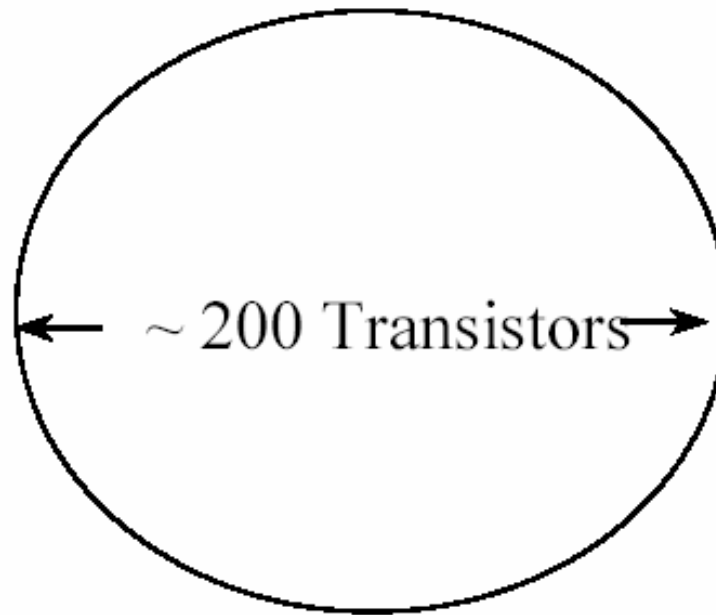
■ **1μm × 1μm**
(晶体管的大小)

90年代生产的集成电路中晶体管大小与人类头发丝粗细、皮肤细胞大小的比较

$$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{m} = 10^{-4} \text{cm} = 1000 \text{nm}$$
$$1 \text{nm} = 10 \text{\AA}$$

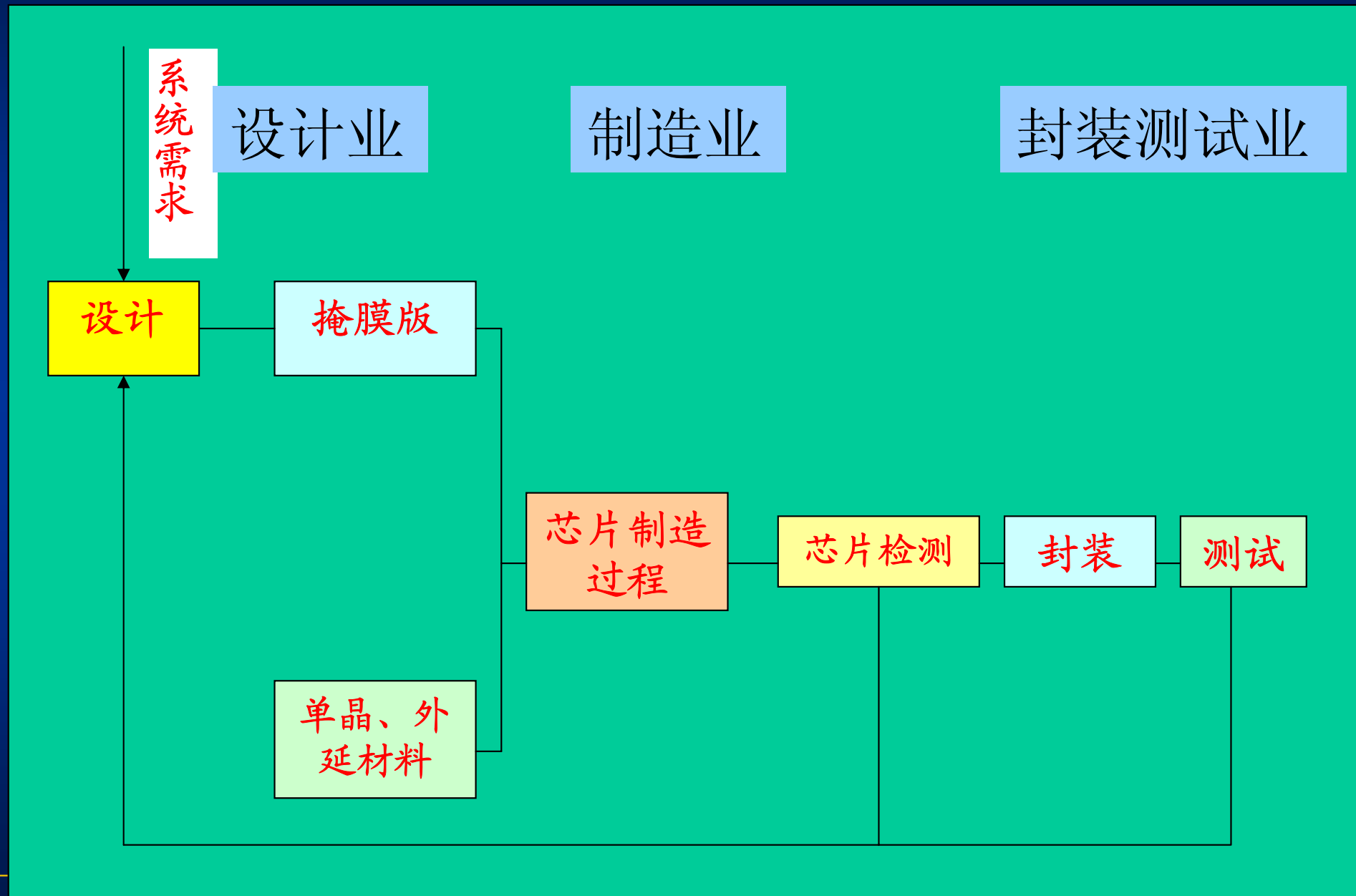


← Mass Production IC



*Diameter of human hair $\sim 50 \mu\text{m}$

✳集成电路设计与制造的主要流程框架



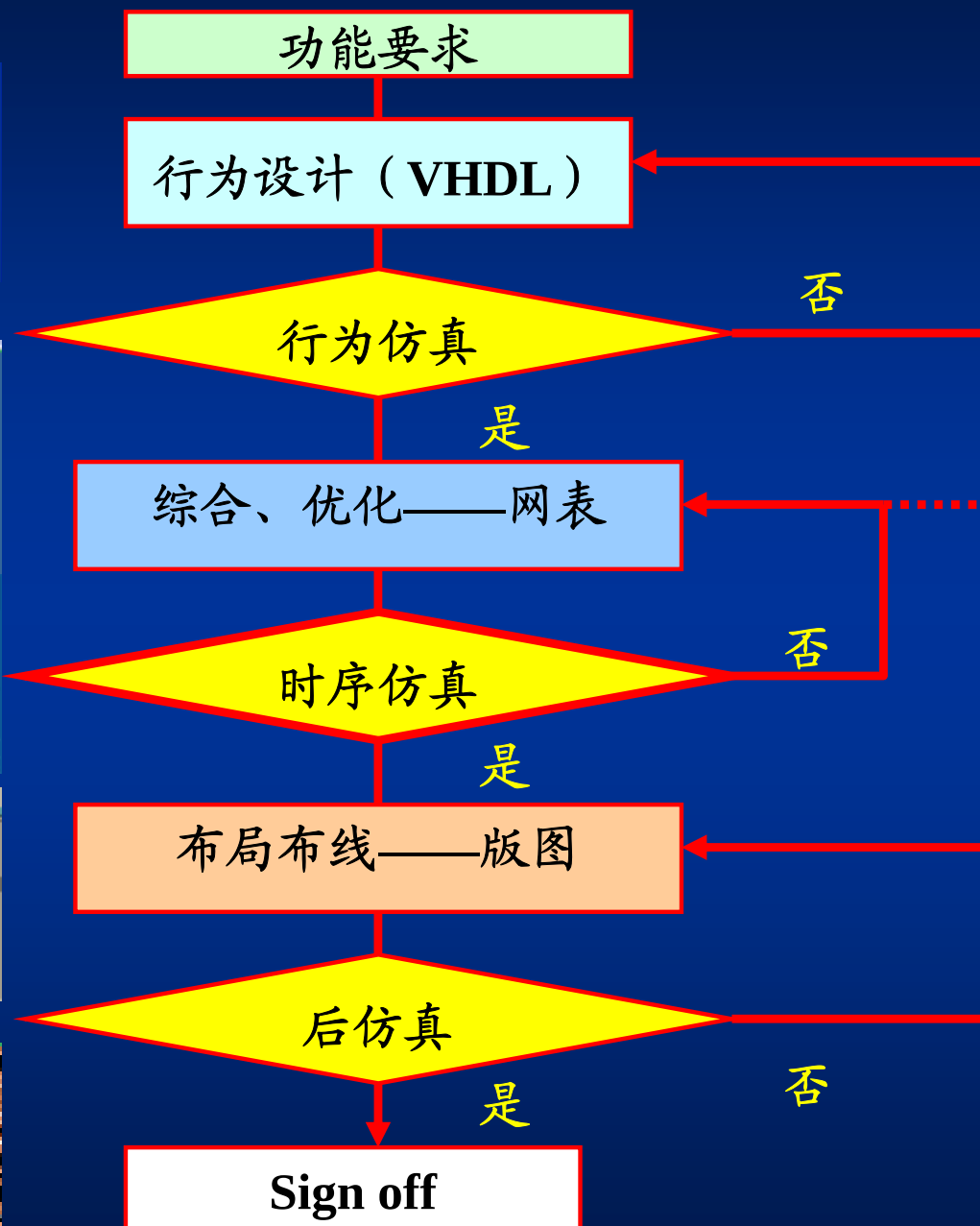
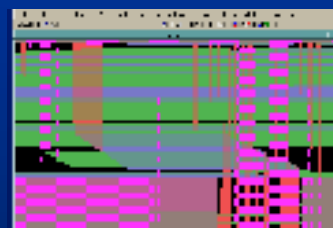
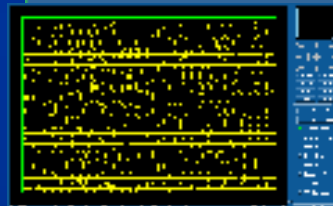
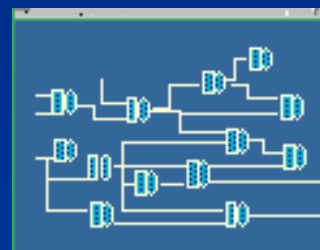
集成电路的设计过程:

设计创意
+
仿真验证

电路知识
系统知识

—设计业—

```
process begin  
wait until rise  
of CLK; enable  
and CLK = 1;  
if (enable = 1) then  
TOGGLE = not  
TOGGLE;  
end if;  
end process;
```

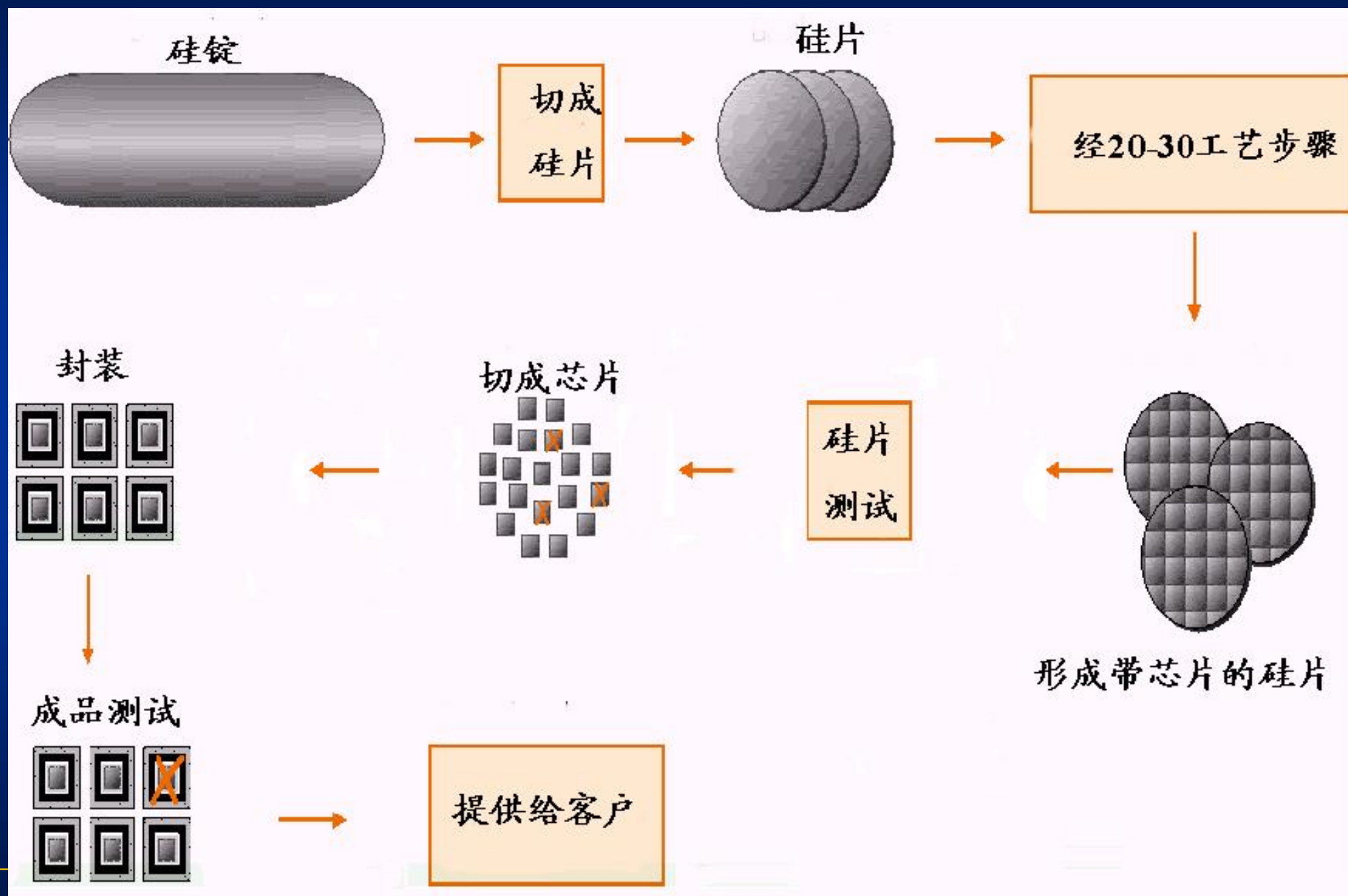


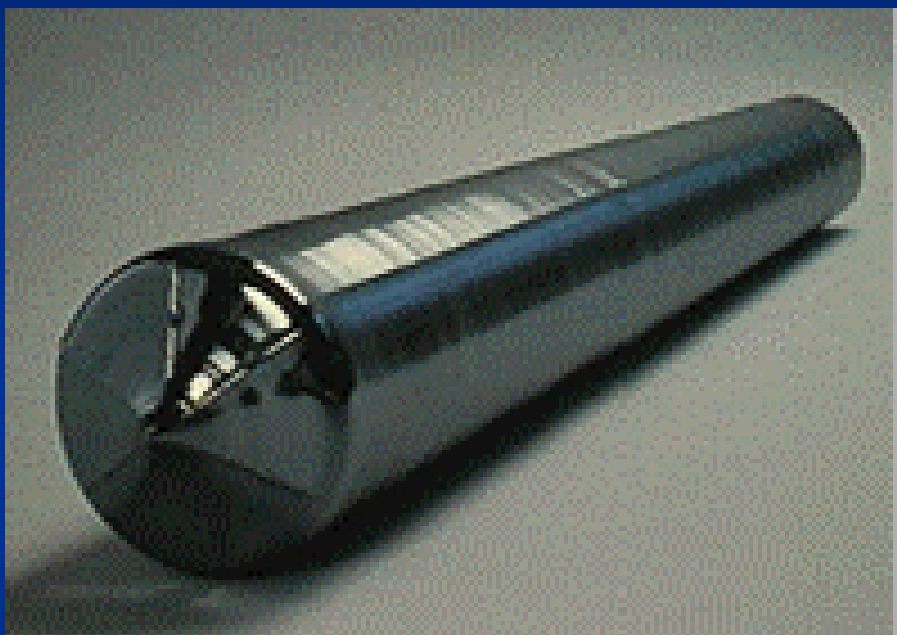
集成电路芯片设计过程框架

Ru Huang, IME, PKU

芯片制造过程

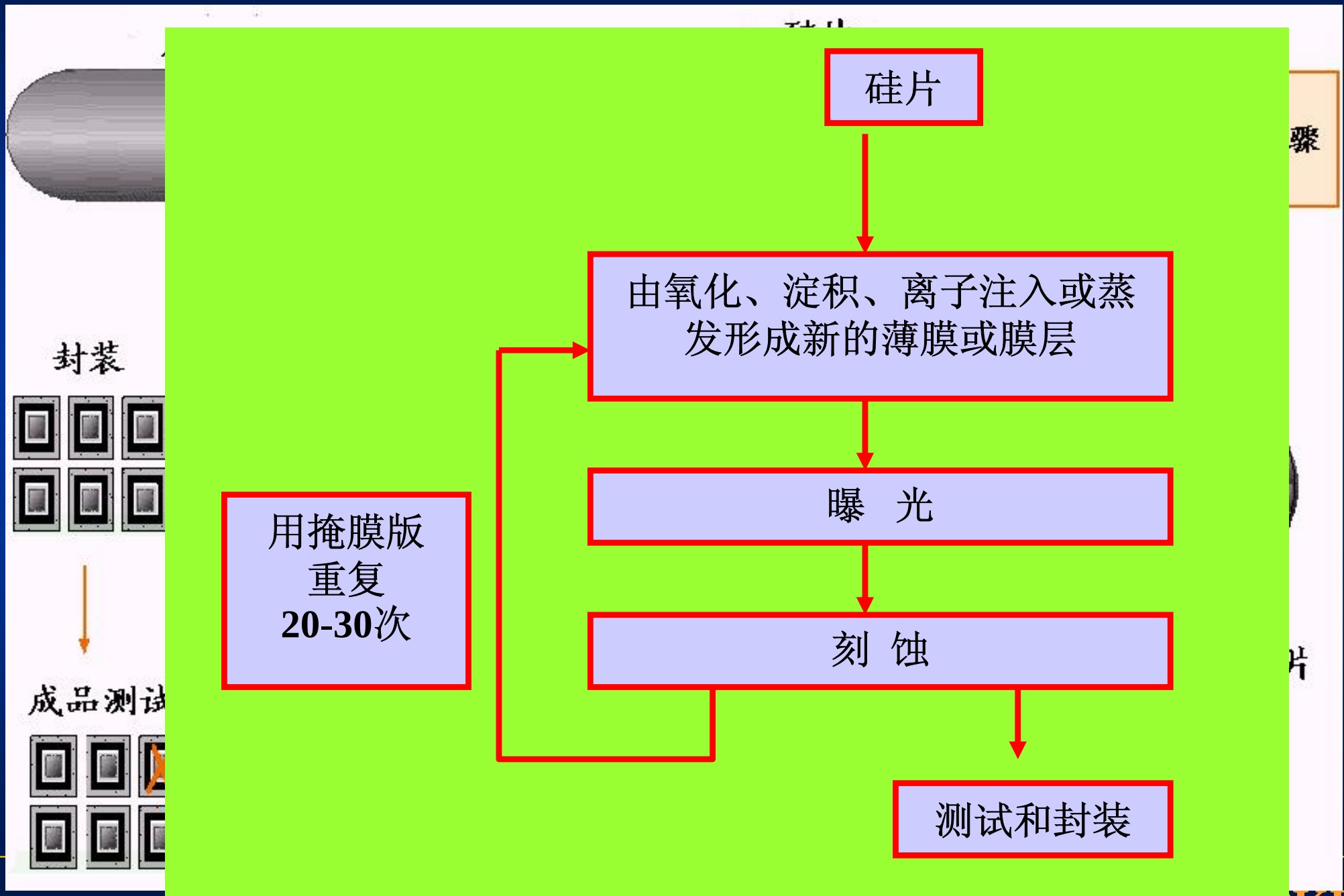
—制造业—





芯片制造过程

—制造业—



Fab: clean room



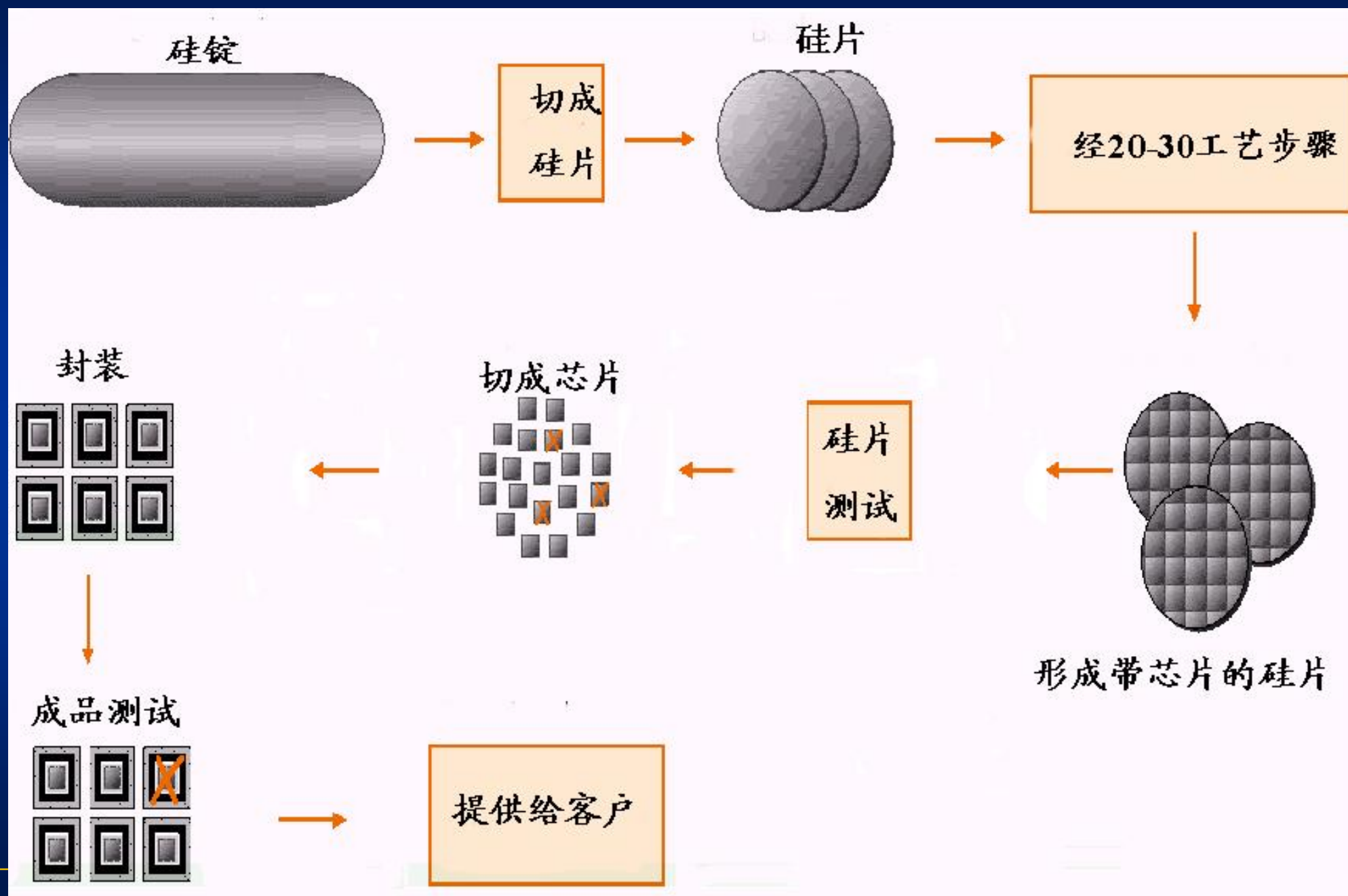
Ru Huang, IME, PKU

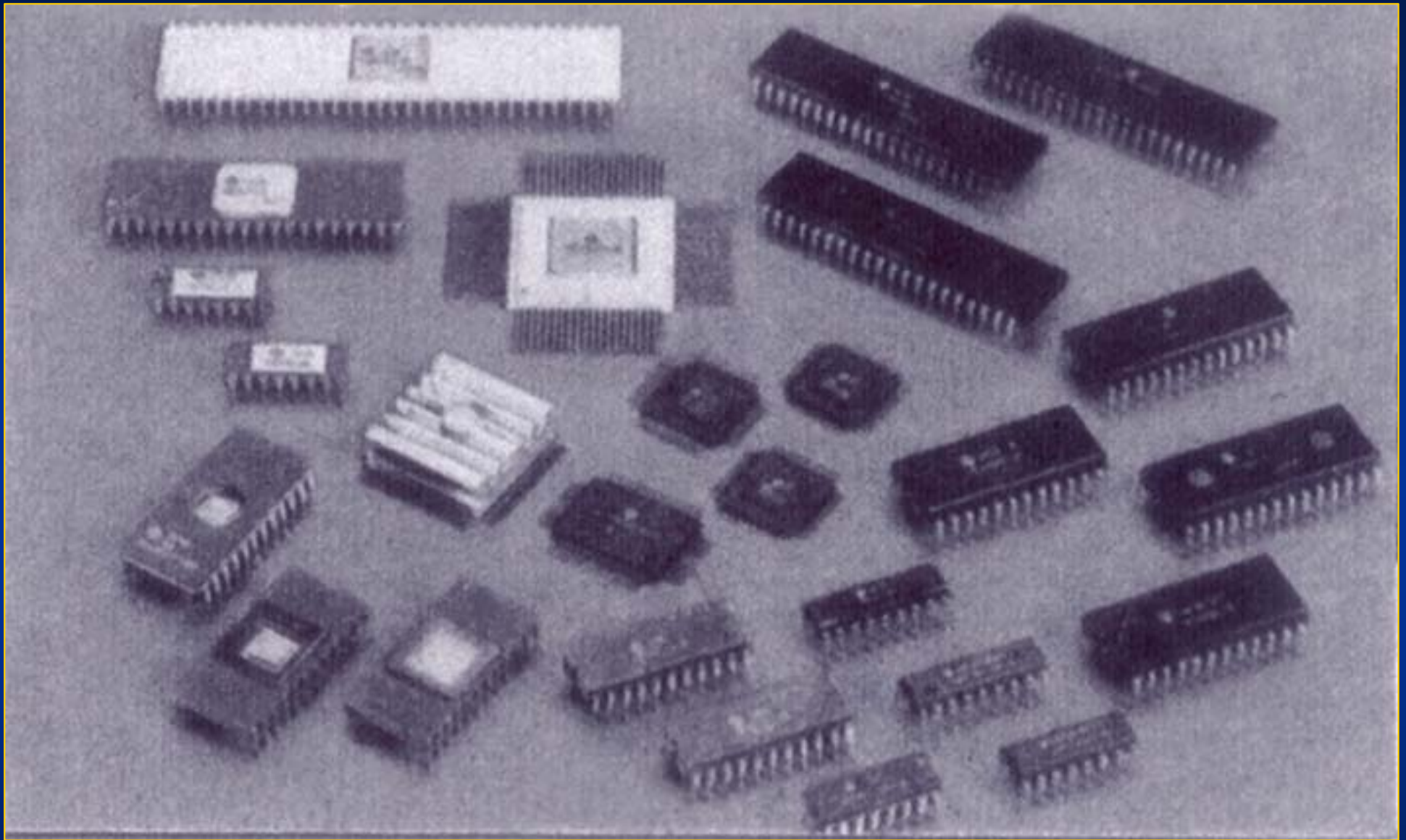
ICP刻蚀机



芯片制造过程

—制造业—





封装好的集成电路

—封装与测试业—

Ru Huang, IME, PKU

集成电路的分类

按器件结构类型分类

按有源器件结构和工艺技术分类

✱ 双极集成电路：双极晶体管构成

✱ 金属-氧化物-半导体 (MOS) 集成电路：MOS晶体管 (单极晶体管) 构成

☞ NMOS

☞ PMOS

☞ CMOS(互补MOS)

✱ 双极-MOS (BiMOS) 集成电路：同时包括双极和MOS晶体管的集成电路为BiMOS集成电路，综合了双极和MOS器件两者的优点，但制作工艺复杂

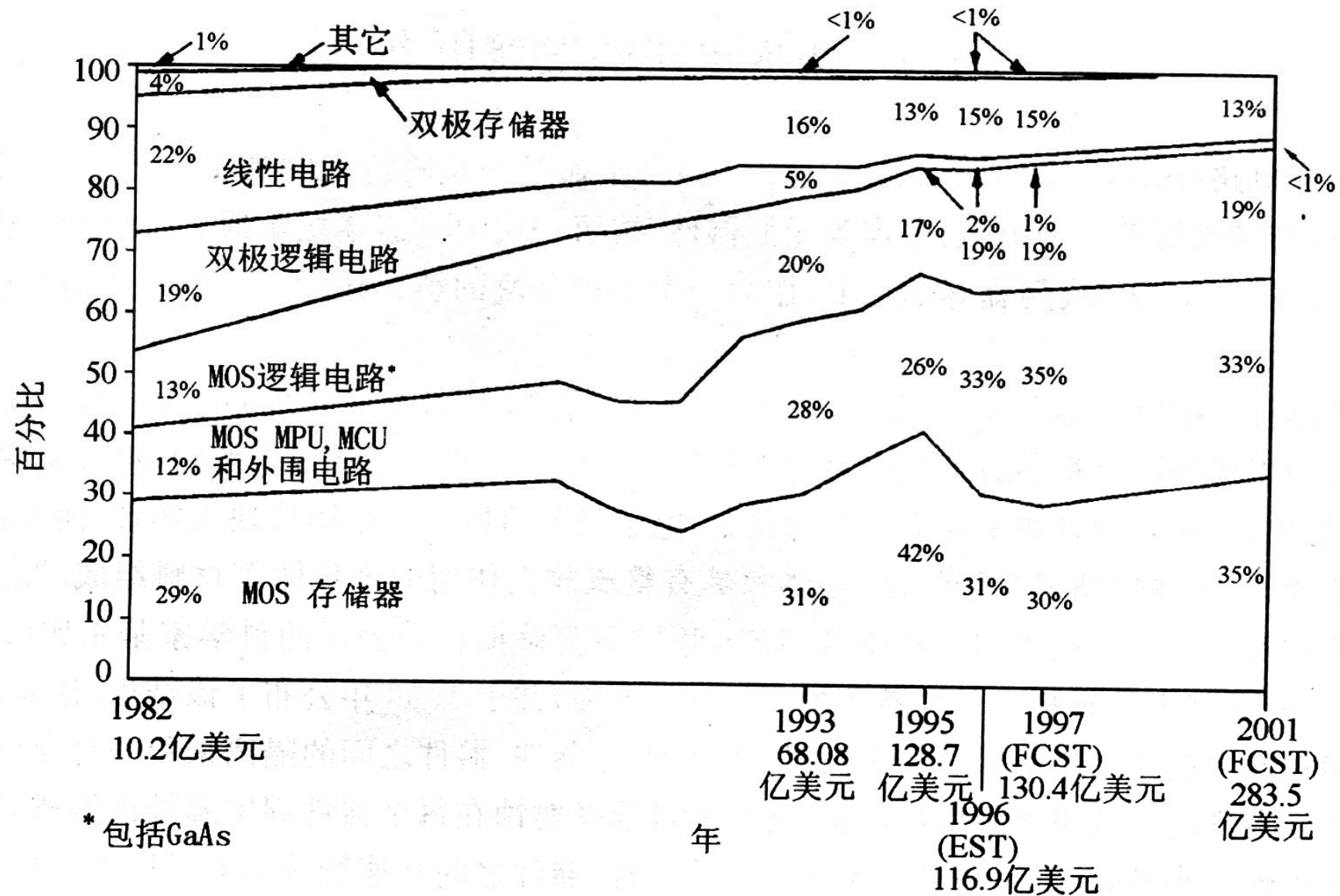


图 1.4 各种集成电路在总的微电子市场份额中所占的比例

按集成电路规模分类

- ✱ 小规模集成电路(Small Scale IC, SSI)
- ✱ 中规模集成电路(Medium Scale IC, MSI)
- ✱ 大规模集成电路(Large Scale IC, LSI)
- ✱ 超大规模集成电路(Very Large Scale IC, VLSI)
- ✱ 特大规模集成电路(Ultra Large Scale IC, ULSI)
- ✱ 巨大规模集成电路(Gigantic Scale IC, GSI)

划分集成电路规模的标准

类 别	数字集成电路		模拟集成电路
	MOS IC	双极IC	
SSI	$< 10^2$	< 100	< 30
MSI	$10^2 \sim 10^3$	$100 \sim 500$	$30 \sim 100$
LSI	$10^3 \sim 10^5$	$500 \sim 2000$	$100 \sim 300$
VLSI	$10^5 \sim 10^7$	> 2000	> 300
ULSI	$10^7 \sim 10^9$		
GSI	$> 10^9$		

按结构形式的分类

✱单片集成电路:

- ☞ 电路中所有的元器件都制作在同一块半导体基片上的集成电路
- ☞ 在半导体集成电路中最常用的半导体材料是硅，除此之外还有GaAs等

✱混合集成电路（二次集成IC）

半导体芯片(集成电路、晶体管等)、片式无源元件(电阻、电容、电感、电位器等)集成在带有互连金属化层的绝缘基板(玻璃、陶瓷等)，构成更复杂的功能器件，封装在管壳中，作为整体使用

- ☞ 厚膜集成电路：用丝网印刷方法涂敷浆料，形成电阻、互连线等
- ☞ 薄膜集成电路：用蒸发、溅射方法

按电路功能分类

✱数字集成电路(Digital IC)

- ☞ 处理数字信号的集成电路
 - 采用二进制方式进行信息处理

✱模拟集成电路(Analog IC)

- ☞ 处理模拟信号的集成电路
 - 信号连续变化

✱数模混合集成电路(Digital - Analog IC)

按电路应用范围分

✱ 通用集成电路

☞ CPU, 存储器

✱ 专用集成电路

☞ 针对特殊应用

✱集成电路芯片生产厂大致上可分为三类

- ☞通用电路生产厂，典型——生产存储器和CPU，如韩国的厂家和INTEL
- ☞集成器件制造商(IDM—Integrated Device Manufactory Co.)，产品主要用于自己的整机和系统，如MOTOROLA、NEC
- ☞标准工艺加工厂或称代客加工厂，即Foundry
 - Foundry名词来源于加工厂的铸造车间，无自己产品
 - 优良的加工技术及优质的服务为客户提供加工服务
 - 客户群初期多为没有生产线的设计公司，但是随着技术的发展，现在许多IDM公司也将相当多的业务交给Foundry加工
 - Foundry做的最好是华人：TSMC、UMC、SMIC、CHARTER

微电子学的特点

✱微电子学是一门综合性很强的边缘学科

- ☞ 涉及了固体物理学、量子力学、热力学与统计物理学
- ☞ 电子线路、信号处理
- ☞ 计算机辅助设计、图论
- ☞ 材料科学
- ☞ 测试与加工
- ☞ 化学等多个学科

✱微电子学以实现电路和系统的集成为目的，实用性强。

微电子学研究领域

- 半导体材料
- 半导体器件
- 集成电路工艺
- 集成电路设计：电路
- 集成电路测试
- ...

微电子学发展的特点

向高集成度、低功耗、高性能、高可靠电路方向发展

与其它学科互相渗透，形成新的学科领域：
光电集成、微机电系统(MEMS)、生物芯片

系统芯片的发展

纳电子学的发展

电子技术、微电子 技术的战略地位

- (1) 信息社会经济发展的基石
- (2) 微电子技术对传统产业的渗透与带动作用
- (3) 微电子技术对国家安全与国防建设的关键作用

信息社会发展的基石

✱ 社会信息化、网络化和数字化

✱ 实现社会信息化的网络及其关键部件，不管是各种计算机和/或通讯机，它们的基础都是电子技术（系统）和微电子技术（微型化）

✱美国工程技术界评出的20世纪最伟大20项工程技术成就中第五项电子技术谈到，“从真空管到半导体、集成电路已成为当代各行各业智能工作的基石”

✱集成电路大大改变了人类生产、生活、工作方式

✱知识经济的支柱产业——微电子产业和科学技术对经济发展有着重要作用，成为一个国家和地区实力的重要标志

☞对国民经济的贡献率：集成电路对国民经济的贡献率远高于其他门类的产品

➤以单位质量钢筋对GDP的贡献为1计算

小汽车为5，彩电为30，计算机为1000，集成电路的贡献率高达2000

☞有人认为谁控制了超大规模集成电路技术，谁就控制了世界产业

集成电路对产业本身的影响

很多IT企业利润率较低

- ✱ 没有微电子的电子工业只能是劳动密集型的组装业
- ✱ 在国际分工中只能处于低附加值的低端
- ✱ “中关村是硅谷，但是一个无“芯”的硅谷，产品不可能有竞争力。”
- ✱ 龙芯等自主知识产权的芯片的诞生改写了我们“无芯”的历史，有着重要意义
- ✱ 集成电路芯片不是最终产品，必须与整机结合，与电子系统结合
- ✱ IC芯片是整机高附加值的倍增器

微电子技术的发展历史

里程碑式的重大事件（1）

晶体管的发明

✱1946年1月，Bell实验室正式成立半导体研究小组，**W. Schokley, J. Bardeen、W. H. Brattain**

✱Bardeen提出了表面态理论，Schokley给出了实现放大器的基本设想，Brattain设计了实验

✱1947年12月23日，第一次观测到了具有放大作用的晶体管

获得1956年
Nobel物理奖

1947年12月23日

第一个晶体管

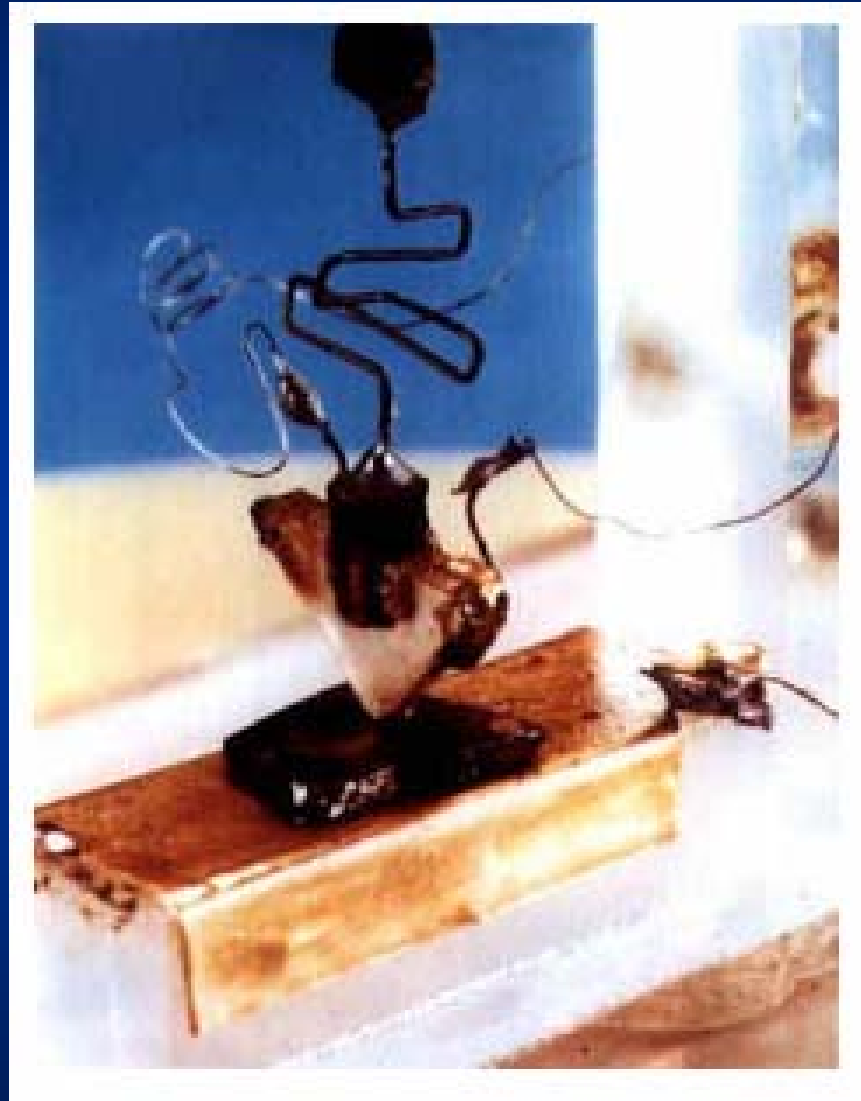
NPN Ge晶体管

W. Shockley

J. Bardeen

W. Brattain

获1956年诺贝尔
物理奖

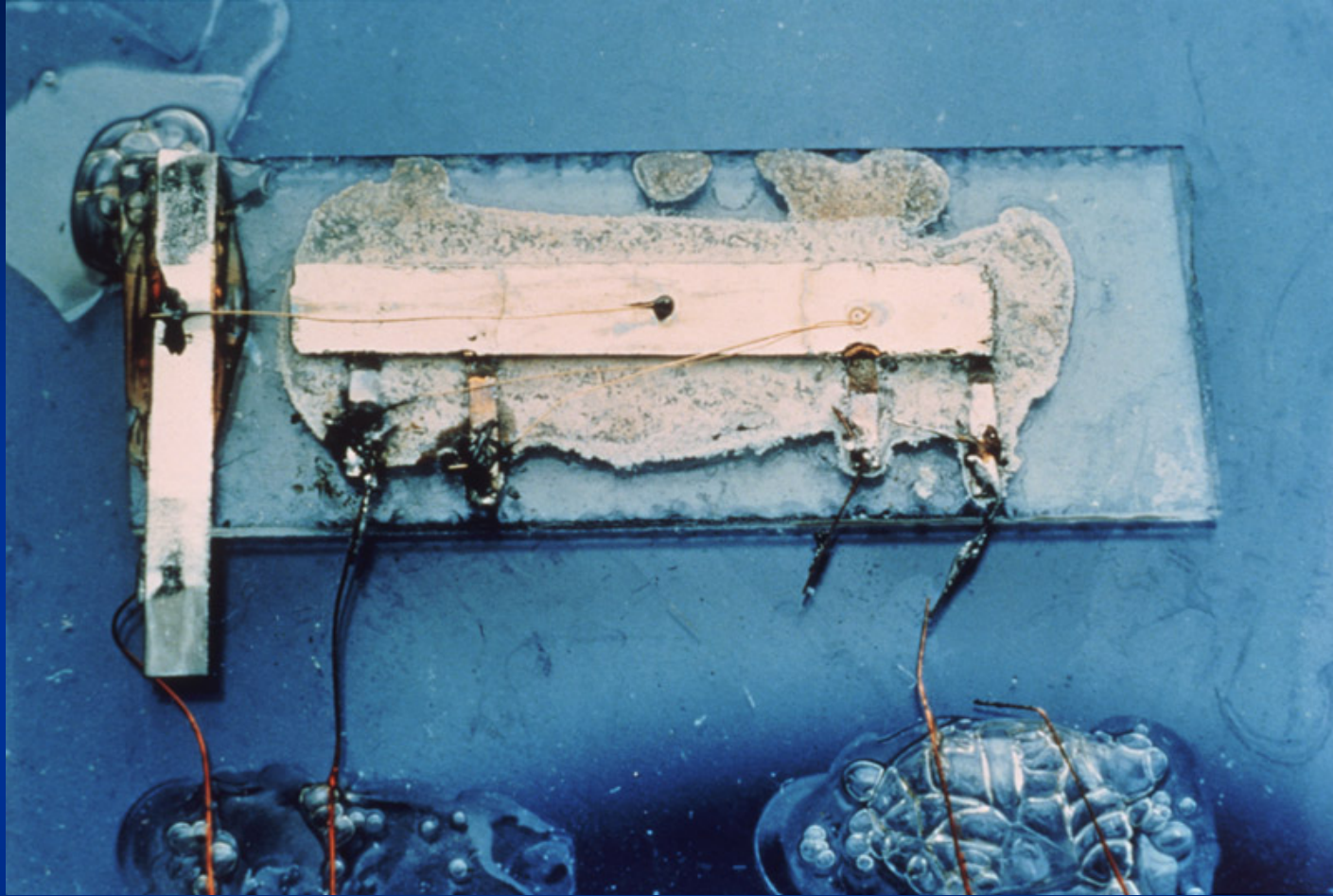


里程碑式的重大事件（2）

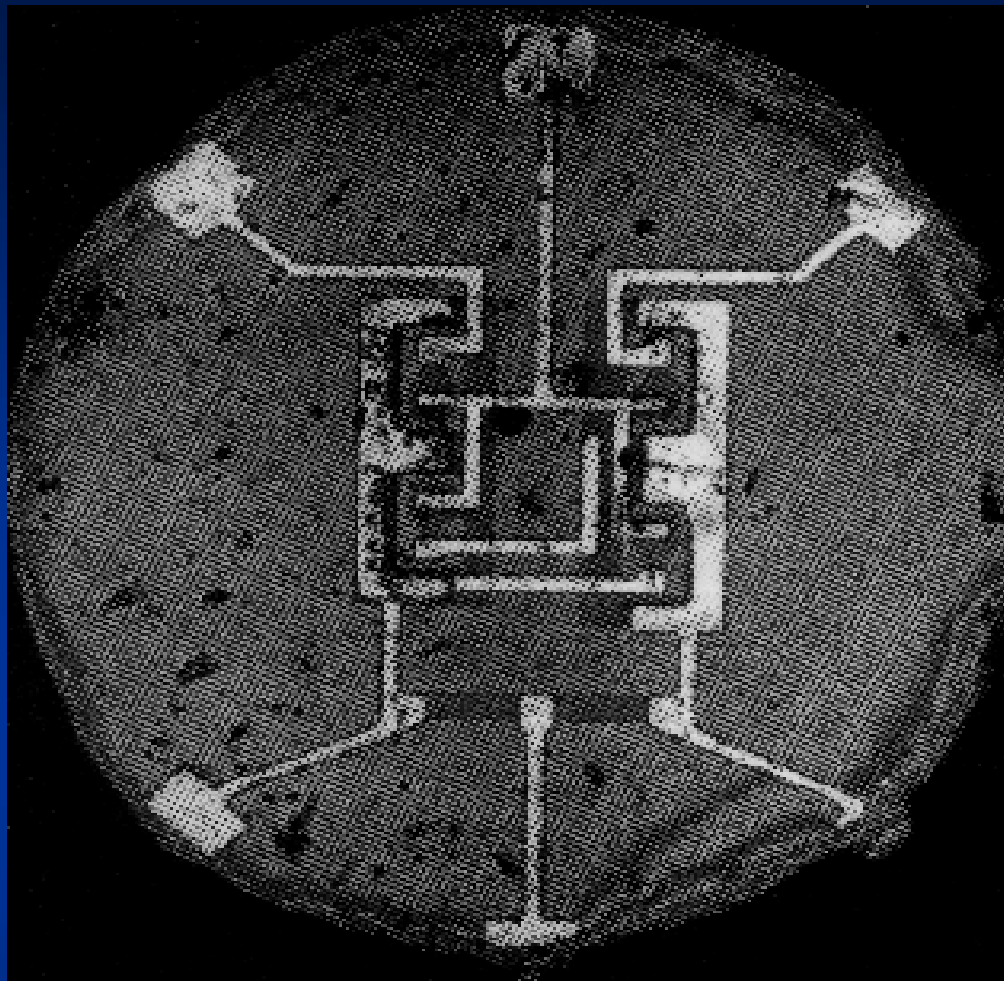
集成电路的发明

- ✱1952年5月，英国科学家G. W. A. Dummer第一次提出了集成电路的设想：电子设备可以在一个固体块上实现，不需外部引线
- ✱1958年以德克萨斯仪器公司的科学家基尔比(Clair Kilby)为首的研究小组研制出了世界上第一块集成电路，并于1959年公布了该结果

获得2000年Nobel物理奖



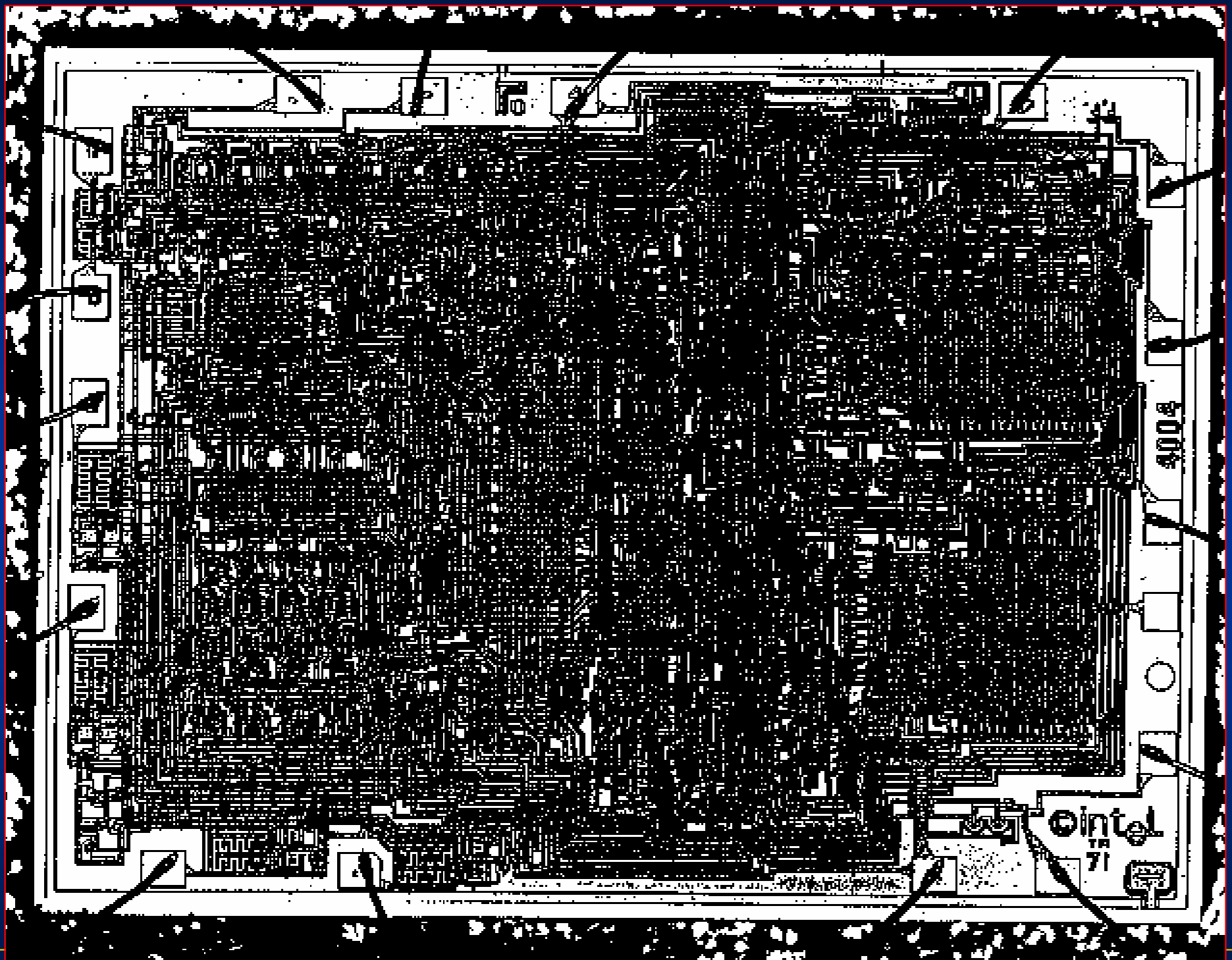
1958年第一块集成电路：TI公司的Kilby，12个器件，Ge晶片
相移振荡和触发器



1959年第一块单片集成电路, Noyce
在Si衬底制备了真正的集成电路, 氧化物隔离, Al互联

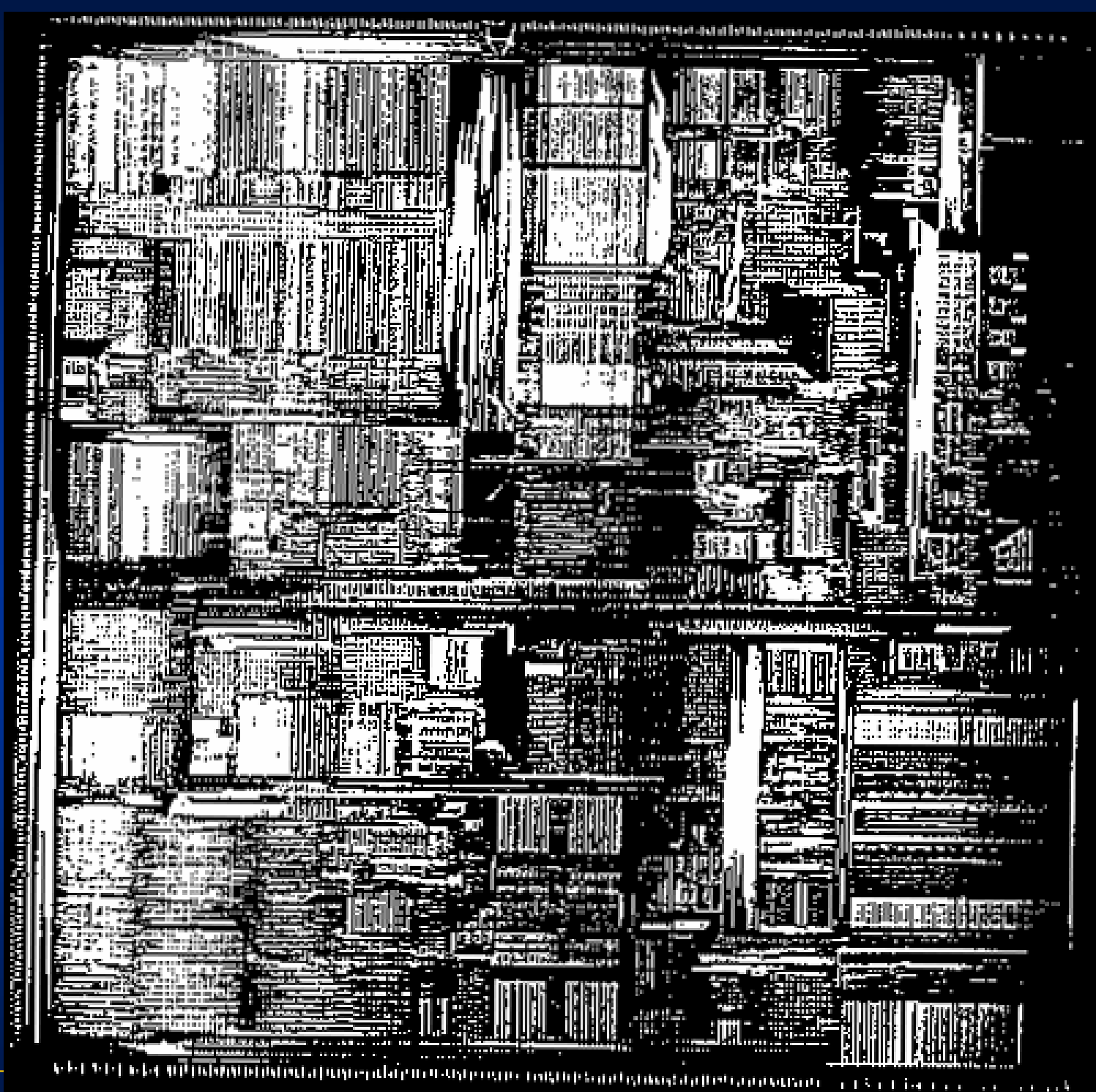
微电子发展史上的几个里程碑

- ✱ 平面加工工艺（光刻）的发明
- ✱ 1960年 Bell实验室的Kahng, Atalla——增强型MOSFET
- ✱ 1962年 Wanlass、C. T. Sah——CMOS技术
现在集成电路产业中占95%以上
- ✱ 1967年 Kahng、S. Sze ——非挥发存储器
- ✱ 1968年 Dennard——单晶体管DRAM
- ✱ 1971年 Intel公司微处理器——计算机的心脏
- ✱ 20世纪90年代铜互连技术的发明（IBM）



第一个CPU: 4004

Ru Huang, IME, PKU



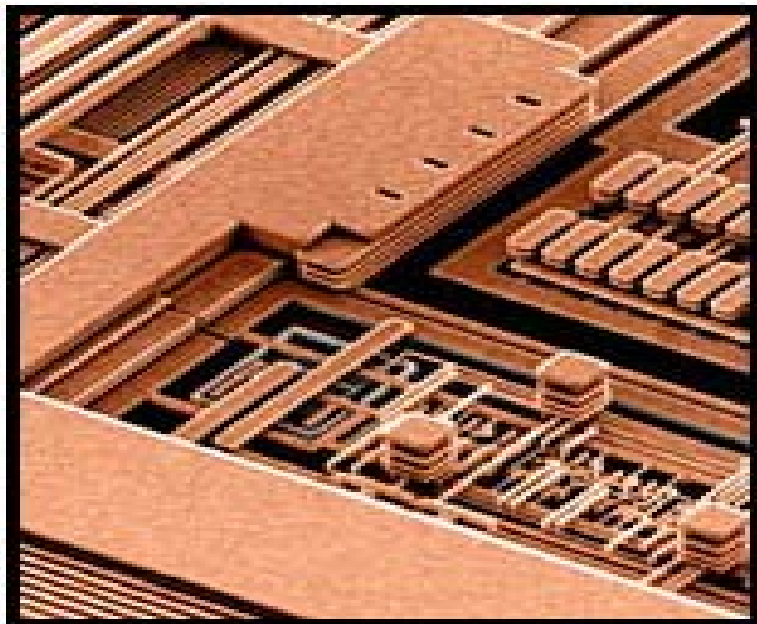
Pentium III CPU芯片

Ru Huang, IME, PKU

微电子发展史上的几个里程碑

- ✱ 平面加工工艺（光刻）的发明
- ✱ 1960年 Kahng, Atalla——增强型MOSFET
- ✱ 1962年 Wanlass、C. T. Sah——CMOS技术
现在集成电路产业中占95%以上
- ✱ 1967年 Kahng、S. Sze ——非挥发存储器
- ✱ 1968年 Dennard——单晶体管DRAM
- ✱ 1971年 Intel公司微处理器——计算机的心脏
- ✱ 20世纪90年代铜互连技术的发明（IBM）

铜互连技术的发明 (IBM)



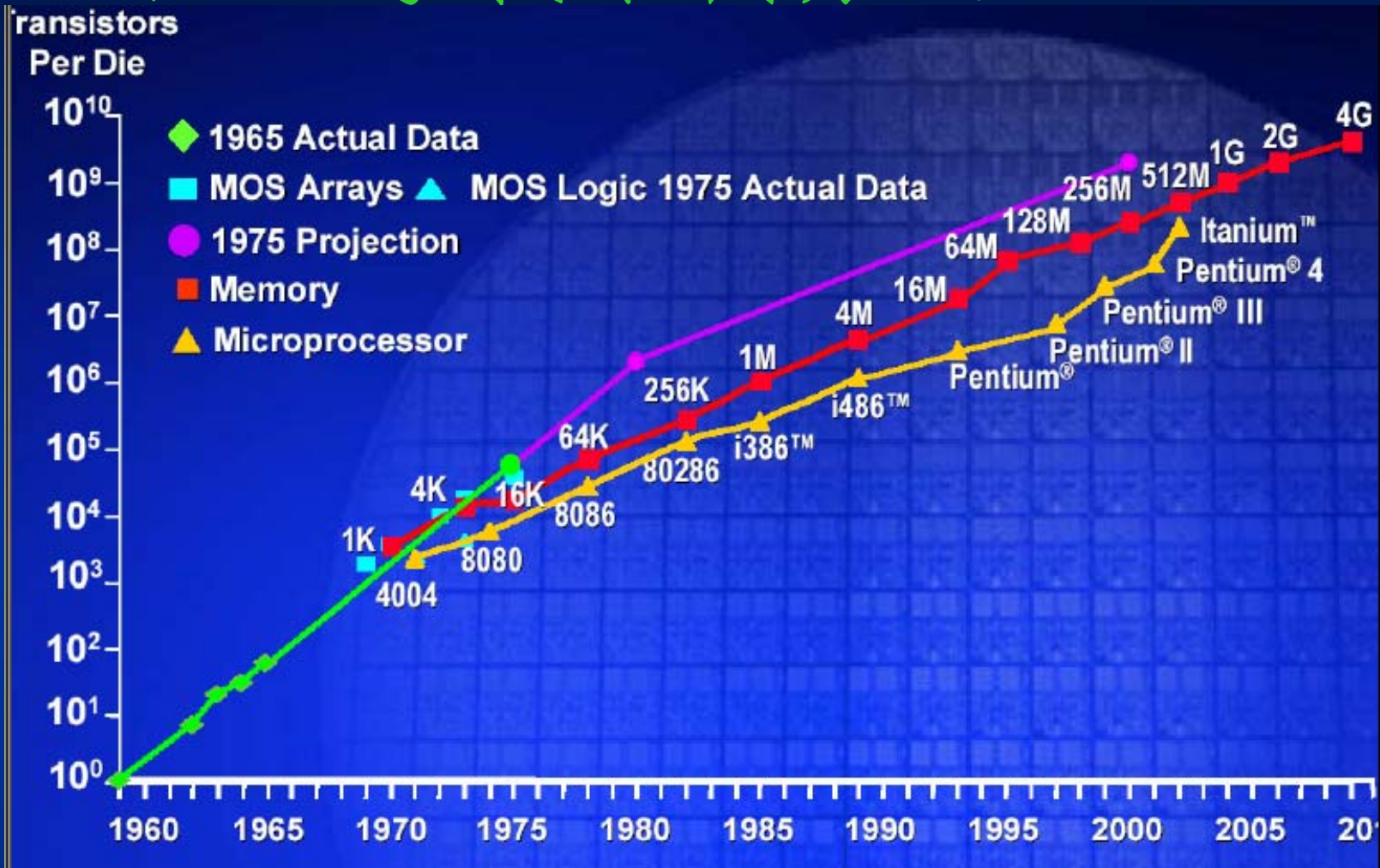
集成电路技术是近50年来发展最快的技术

年 份 特征参数	1959	1970-1971	2000	比率
设计规则 μm	25	8	0.18	140 ↓
电源电压 V_{DD} (伏)	5	5	1.5	3 ↓
硅片直径尺寸 (mm)	5	30	300	60 ↑
集成度	6	2×10^3	2×10^9	3×10^8 ↑
DRAM密度 (bit)		1K	1G	10^6 ↑
微处理器时钟频率(Hz)		750K	1G	$> 10^3$ ↑
平均晶体管价格\$	10	0.3	10^{-6}	10^7 ↓

按此比率下降，小汽车价格不到1美分

集成度：每个芯片上集成的晶体管数目

微电子技术发展的ROADMAP

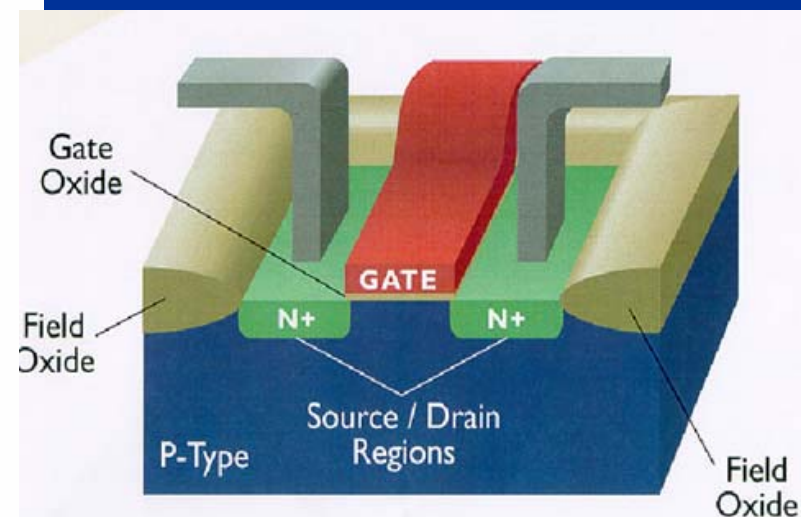
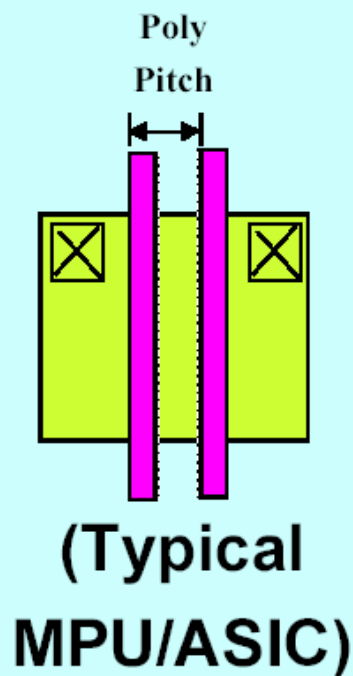
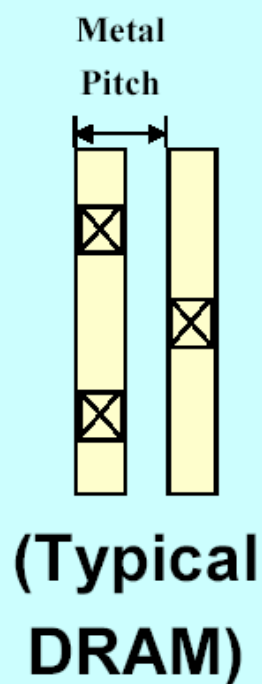


Intel 公司创始人之一
Gordon E. Moore 博士
1965 年总结的规律

被称为摩尔定律

集成电路芯片的集成度每三年提高4倍，而加工特征尺寸缩小 $\sqrt{2}$ 倍。

工艺技术水平表征：特征尺寸



- * MPU/ASIC: 栅长，多晶硅条pitch的一半
- * DRAM: 金属线pitch的一半

微电子技术发展现状

- ✱ 0.18um, 0.13um的工艺：主流工艺
- ✱ 研究工作已经进入到50纳米量级

$$S=0.7$$

ITRS: ORTC DRAM and MPU/ASIC Technology Nodes

Table 1a Product Generations and Chip Size Model Technology Nodes—Near Term Years*

Year of Production	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
DRAM ½ Pitch (Sc. 2.0)	130	115	100	90	80	70	65
MPU/ASIC ½ Pitch (Sc. 3.7)	150	130	107	90	80	70	65
MPU Pr Gate Length (Sc. 3.7)*	90	75	65	53	45	40	35
MPU Ph Gate Length (Sc. 3.7)	65	53	45	37	32	28	25

Table 1b Product Generations and Chip Size Model Technology Nodes—Long Term Years*

Year of Production	2010	2013	2016
DRAM ½ Pitch (Sc. 2.0)	45	32	22
MPU/ASIC ½ Pitch (Sc. 3.7)	45	32	22
MPU Printed Gate Length (Sc. 3.7) *	25	18	13
MPU Physical Gate Length (Sc. 3.7)	18	13	9

Pr=Printed

Ph=Physical

* 集成电路发展趋势：特征尺寸缩小、硅片尺寸增大

☞ 特征尺寸的缩小

- 器件速度提高
- 集成电路性能提高
- 芯片上集成器件数目增大，集成电路的功能提高

☞ 硅片尺寸增大

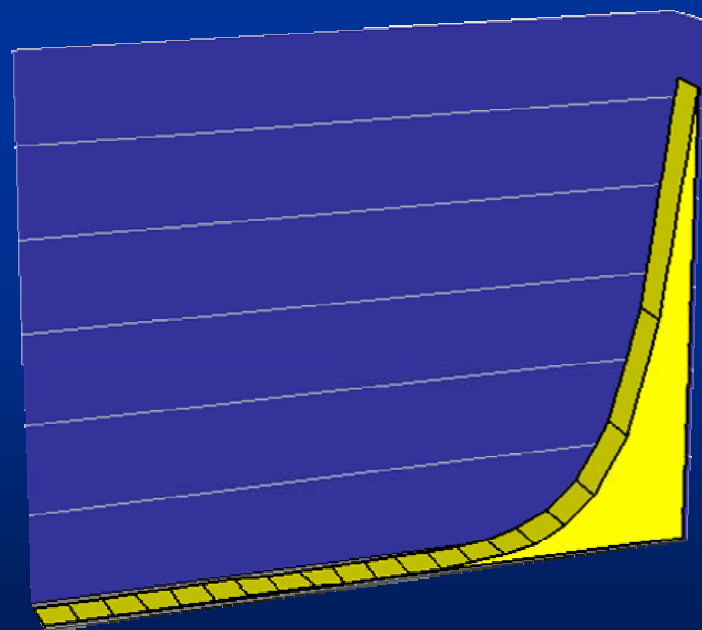
- 硅片上的芯片数目增大
- 成本降低

提高集成电路的性能价格比



Moore定律

—— 性能价格比

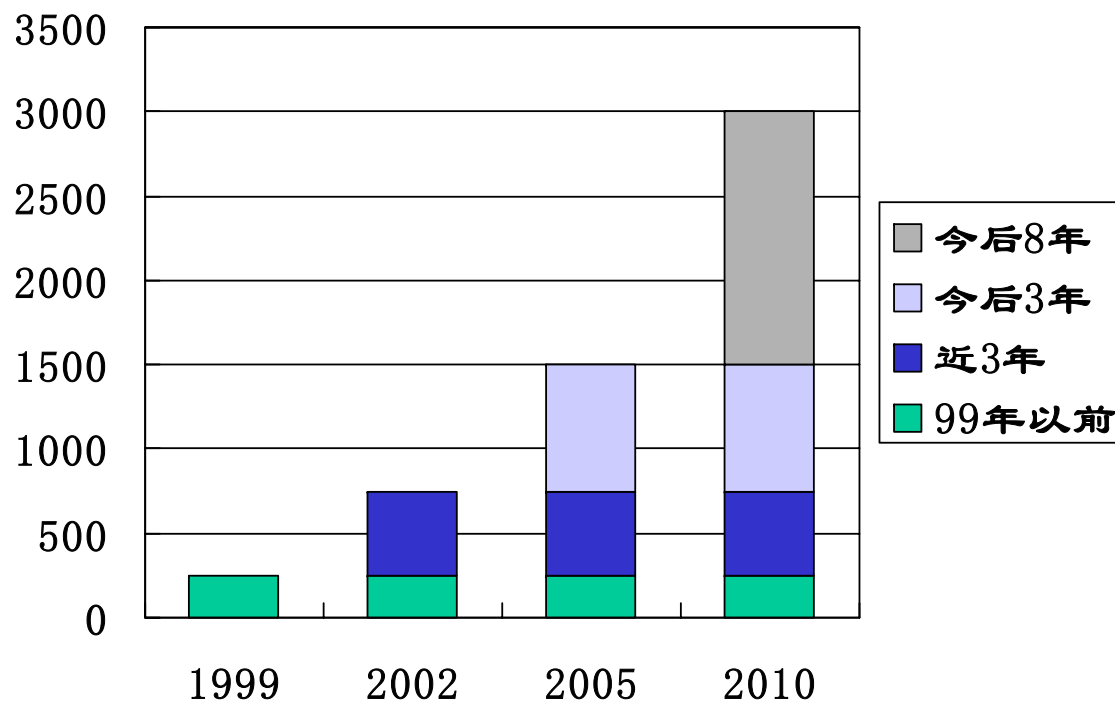


- ✱ 在过去的20年中，改进了1,000,000倍
- ✱ 在今后的20年中，还将改进1,000,000倍

我国微电子发展现状

我国微电子发展现状

- ✱ 2001年，国务院18号文和51号文《关于鼓励软件产业和集成电路产业的若干政策》
- ✱ 建立了7个IC产业化基地：北京、上海、深圳、西安、成都、无锡等
- ✱ 建立5+4个IC人才培养基地
- ✱



中国集成电路产业的累计投资额

数据来源：徐小田

✱我国IC骨干企业目前分布情况

☞ 上海

☞ 北京

☞ 深圳

☞ 成都

☞ 西安

☞

我国微电子发展现状（制造业）

*上海中芯国际（SMIC: Semiconductor Manufacturing International Corporation）:

- ☞ 14.76亿美元，8英寸，4.2万片/月
- ☞ 提供加工服务（Foundry）
- ☞ 2000年成立，2001年6月投产
- ☞ 国内第一个掌握0.13um 至0.18 μm CMOS制造技术、实现8寸硅片量产的芯片公司
- ☞ 2003年进入世界前五大Foundry之一

* 上海宏力

☞ 16.37亿美元, 8英寸, 0.25微米, 4万片/月

* 上海贝岭

☞ 6英寸, 7.88亿元, 0.5 ~ 0.35微米数模混合集成电路, 1.5万片/月

* 华虹NEC: 上海

* TSMC: 上海嵩江

* UMC: 苏州

* 封装、测试公司

* SMIC天津 (原Motorola MOS17)

☞ 14.75亿美元, 8英寸, 0.25微米, 6000片/周

✱中芯国际（北京）公司，总投资为12.5亿美元

☞8英寸、线宽为0.35-0.18 μm 、月投片量为3万片的芯片生产线

☞12英寸、线宽为0.13 μm - 90nm、月投片量为3000片的先导线。

☞2004年9月25日开始投产

✱ 大量的设计公司

中国2003年10大IC设计企业(人民币万元)

大 唐 微 电 子	杭 州 士 兰	苏 州 意 源	绍 兴 芯 谷	无 锡 矽 科	北 京 中 星 微	北 京 格 码 晶 华	上 海 虹 集 成 电 路	中 国 华 大	深 圳 国 微
62308	535 21	465 15	239 32	162 88	16000	15000	13513	1300 0	120 00

我国微电子发展展望

※上海IC产业发展战略目标

年份	2000	2005	2010	2015	15年合计
销售收入(亿美元)	7	30	165	500	2300
5年平均年增长率(%)		34	41	25	33
国内IC应用市场占有率	2%	9%	30%	50%	
国际市场占有率	0.43%	1%	3%	5%	
生产线技术水平	8"/0.35	8"/0.18	12"/0.10	12"/0.05	

- 到2010年总投资量600亿美元，建成20~40条生产线，200个设计公司及20家封装/测试厂
- 带动上海700亿美元相关产业发展，成为第一大产业
- 自主发展的技术与世界同期水平相当

我国微电子发展展望

✱未来十年将是我国微电子产业的黄金时期

作业

- ✱列举出你见到的、想到的不同类型的集成电路及其主要作用
- ✱用你自己的话解释微电子学、集成电路的概念，说明集成电路与分立电路的区别。