



北京大學  
PEKING UNIVERSITY

# 智能硬件体系结构

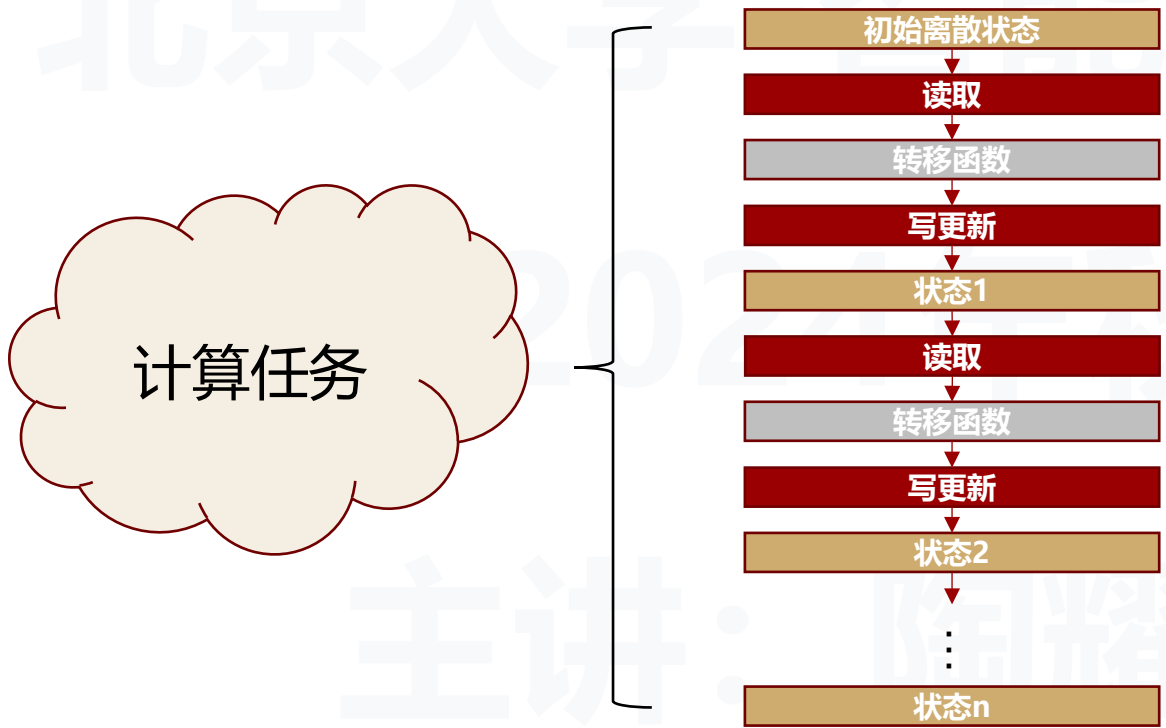
## 第一讲：智能硬件体系结构简介

主讲：陶耀宇、李萌

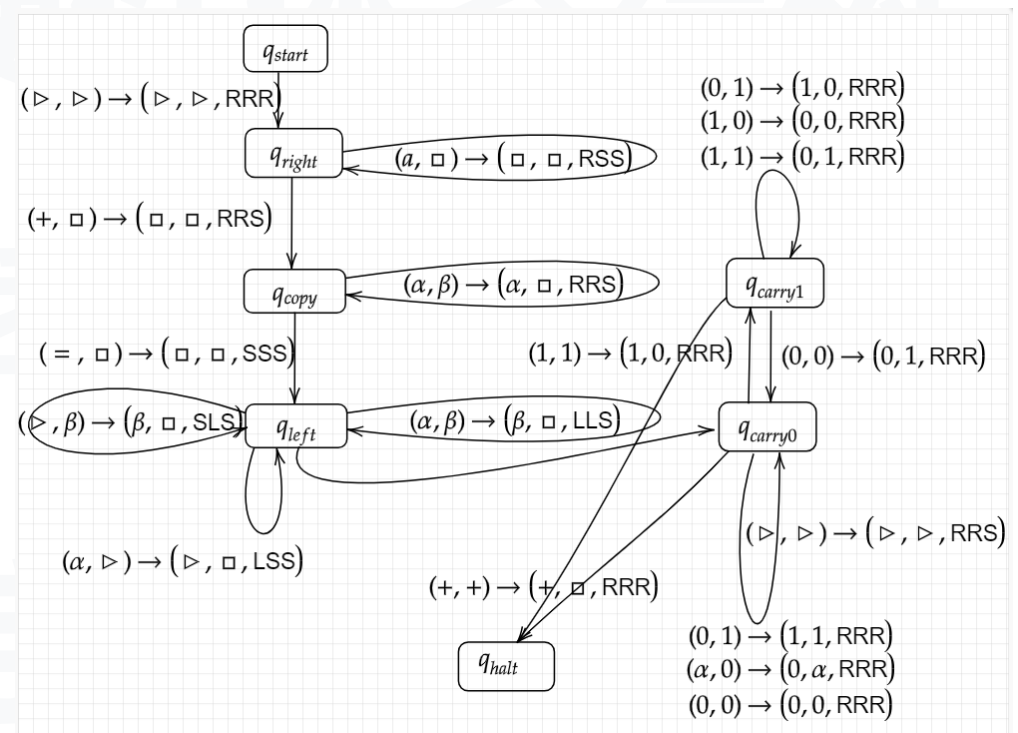
2024年秋季

• 图灵机计算范式的典型特征 ① – 计算过程离散性

$T = \{Q, \Sigma, \Gamma, q_0, q_{accept}, q_{reject}, \delta(q,s)\}$  离散的状态、符号与转移函数



计算任务在图灵机上的离散映射



离散图灵计算过程示例

## • 图灵机计算范式的典型特征 ② – 时间复杂度

$$T = \{Q, \Sigma, \Gamma, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}, \delta(q,s)\} \quad \text{状态切换操作次数定义时间复杂度}$$

• **图灵机T的时间复杂度  $T(n)$**  = 计算输入规模为n的所有实例中，所需操作的最多次数

•  $O(T(n)) = \text{Max}\{\text{Ops}(T)\}, \forall q_0$  和  $\text{size}(q_0) = n$

•  $O(T(n))_{\text{上限}} = \text{Max}\{O(T(n))\} = O(n^c) < 2^{O(\log n)}$

## • 计算任务：P任务和NP任务

• **P**: 在多项式可确定表达的执行次数下完成，例如 $O(\log n)$ 、 $O(n)$ 、 $O(n^k)$ 等

• **NP**: 无法在确定多项式执行次数下完成，但在多项式时间内验证一个解

• T能在有限时间和资源内有效的完成P问题的计算，或验证某个NP问题的解

• *对无法找到P复杂度的解法或验证算法的问题，图灵机无法在有限计算时间和资源内支持*

- 图灵机计算范式的典型特征 ③ – 计算可约性

$$T = \{Q, \Sigma, \Gamma, q_0, q_{\text{accept}}, q_{\text{reject}}, \delta(q, s)\}$$

- **图灵机计算任务**

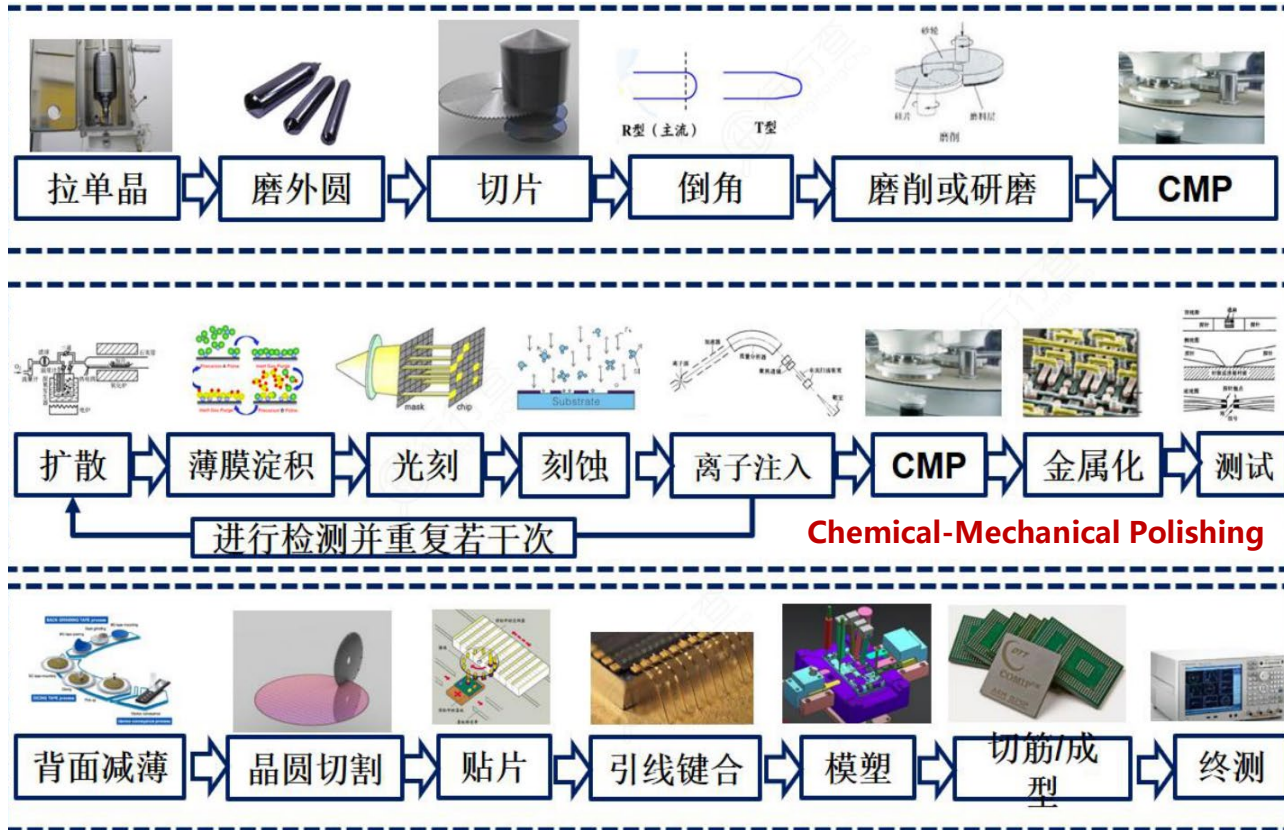
- 图灵可计算是指一类可证明在非无穷时间复杂度  $O(T(n)) < \infty$  可由图灵机准确计算的任务
  - 依据邱奇-图灵论题，一个函数  $f: N^n \rightarrow N$  是一个图灵可计算函数，当且仅当存在一个图灵机  $T$ ，在每一个输入  $\omega$  上能够在有限时间内停机并输出  $f(\omega)$  在纸带上

- **计算的可约性**

- 使用可约性将问题  $A$  归约为问题  $B$ ：记作  $A \leq_m B$ 
  - 若存在一个可计算函数  $f: N^n \rightarrow N$ ，对于每一个  $\omega$ ， $\omega \in A \Leftrightarrow f(\omega) \in B$ ，则可将  $A$  的实例转换为  $B$  的实例并进行图灵计算， $f$  称为  $A$  到  $B$  的归约 (reduction)

# 智能芯片产业之晶圆加工

- 晶圆加工制造行业目前被**台积电**、**三星**、**英特尔**、**格罗方德**等公司占据主导地位



单晶硅片制造流程



晶圆加工前道工艺



晶圆加工后道工艺

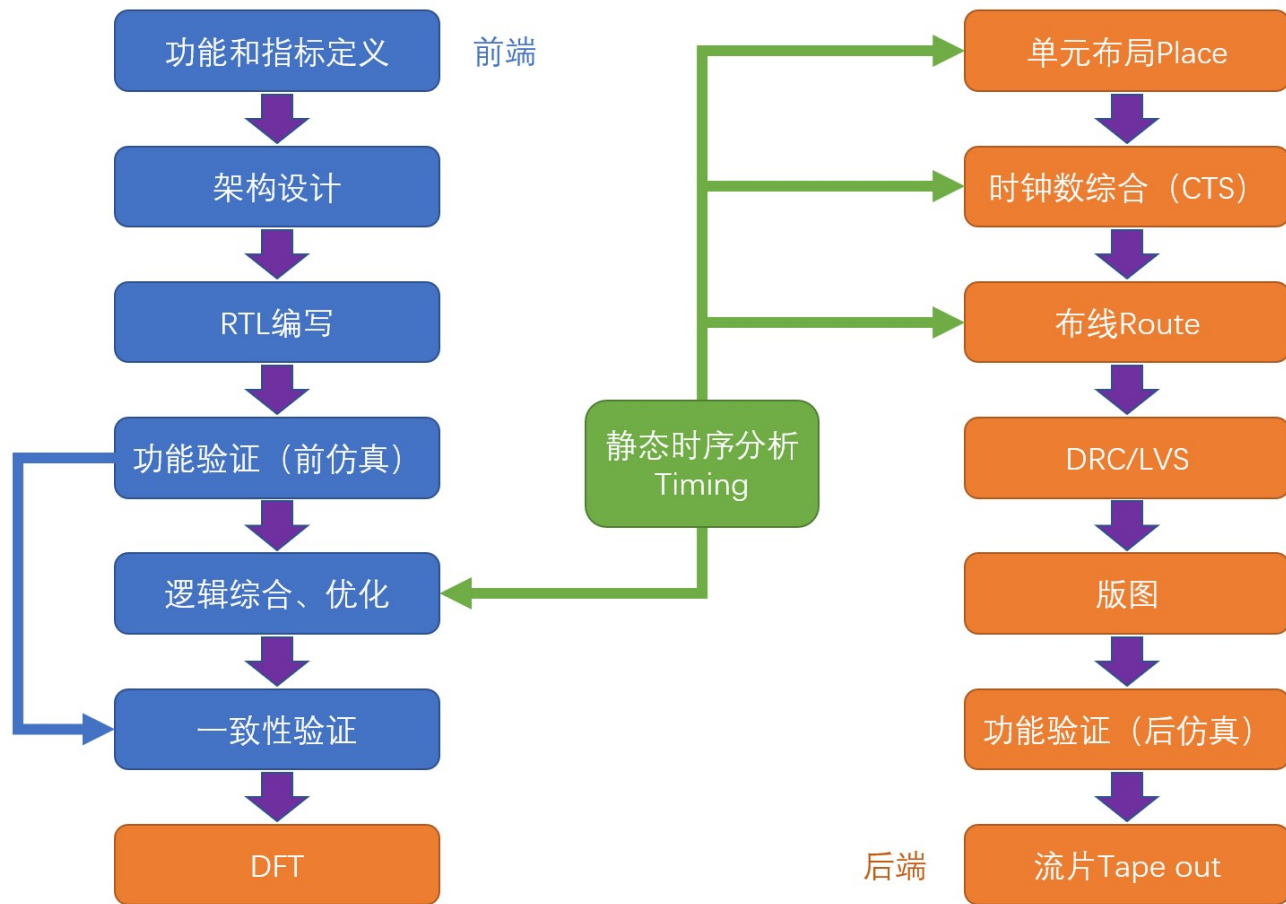


建设一条先进的晶圆线投资量级上百亿元，需要十几大类、几百种多种细分设备、数千多台各种高精尖设备，其中以光刻技术、刻蚀技术、薄膜沉积三大类为主要生产技术



# 智能芯片产业之芯片设计 – 第一梯队均为美国公司

- 目前IC设计的重要产业公司 – 美国英特尔公司、高通公司、英伟达公司



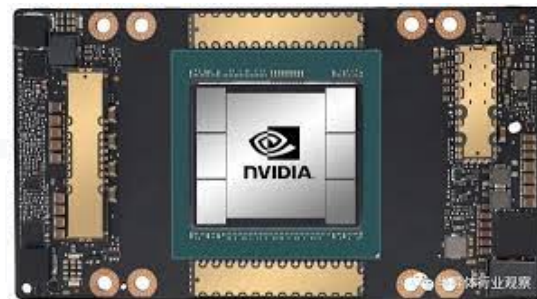
大型数字芯片设计基本流程



PC处理器CPU芯片



手机SOC芯片

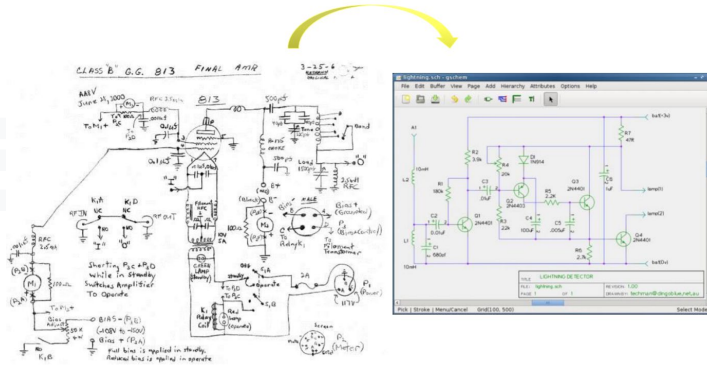


图形处理芯片GPU

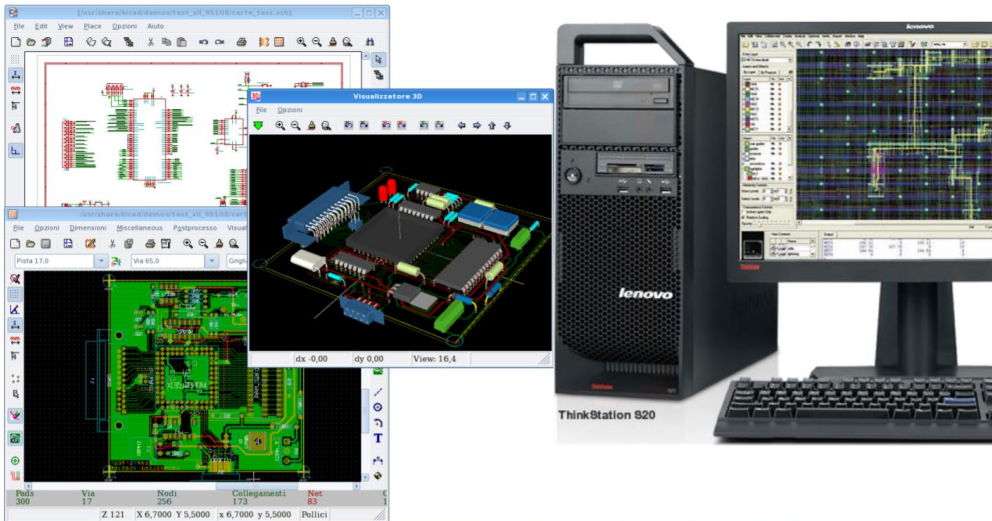
# 智能芯片产业之芯片设计 – 设计自动化软件产业

- 设计自动化软件 (EDA) 是提升芯片设计效率的关键因素, 目前由美国公司占主导地位

## 电路设计软件 与仿真工具



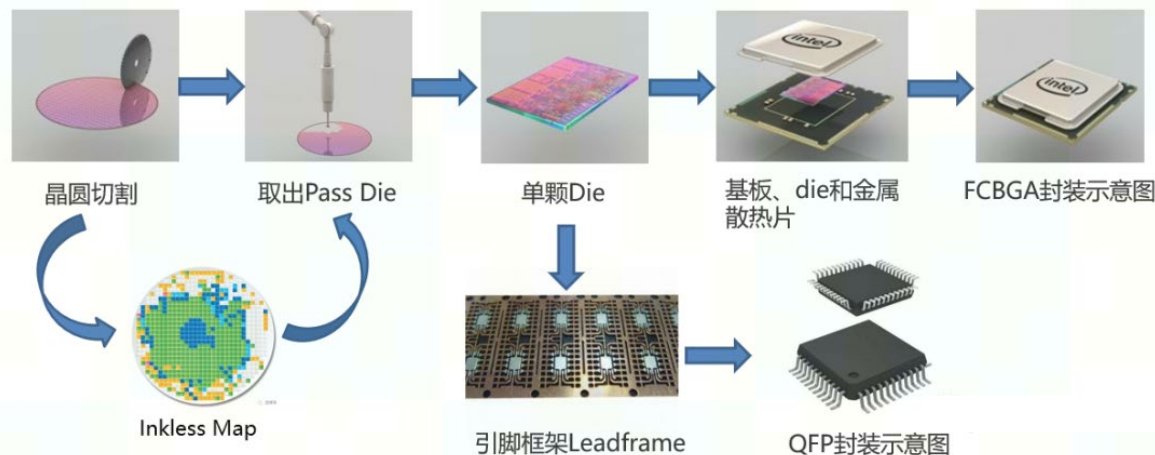
- Electronic Design Automation



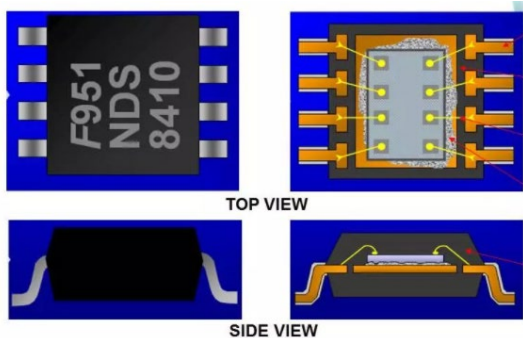


- IC封测直接关系到芯片的使用可靠性，目前由**日月光**、**安靠**、**长电**占据领先地位

## 芯片封装



## FT测试 Final Test



典型的芯片封装



引线焊接



※为了防止外部环境的冲击，利用EMC把Wire Bonding完成后的产品封装起来的过程，并需要加热硬化。

注塑



电镀退火

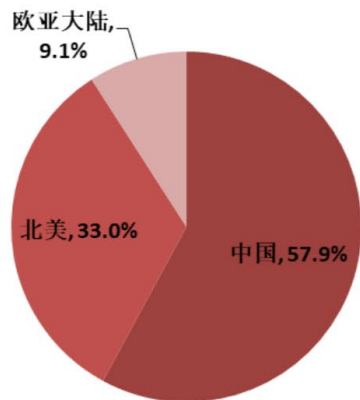


# 中国晶圆加工产业现状 – 中芯国际公司

- 中芯国际是大陆最大的晶圆加工和智能芯片制造商，目前成熟制程为40nm/28nm

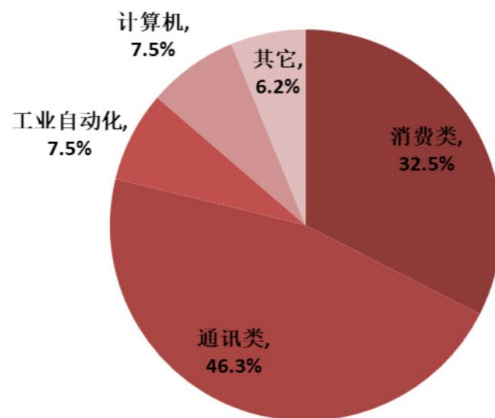


营收按地区划分

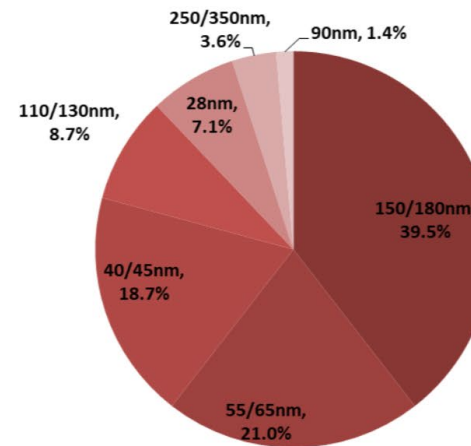


■ 中国 ■ 北美 ■ 欧亚大陆

营收按下游应用划分



营收按工艺制程划分



# 中国晶圆加工产业现状 – 华虹半导体公司/长江存储

- 华虹半导体、长江存储是我国智能芯片制造的重要企业，尤其是存储器领域

H-Grace | 华虹宏力

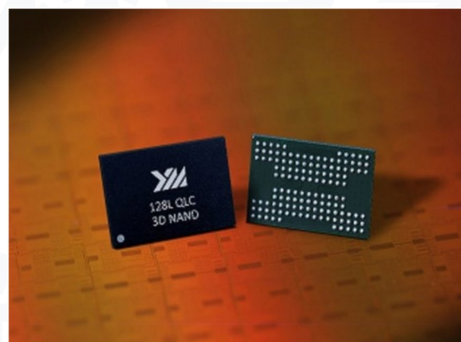
华虹半导体

华虹半导体晶圆厂房

上海一厂	上海二厂	上海三厂
		
工艺与产能	工艺与产能	工艺与产能
95nm 63千片晶圆/月 (200mm)	0.35um 57千片晶圆/月 (200mm)	90um 48千片晶圆/月 (200mm)

总产能168千片/月

长江存储科技有限责任公司  
Yangtze Memory Technology Corp



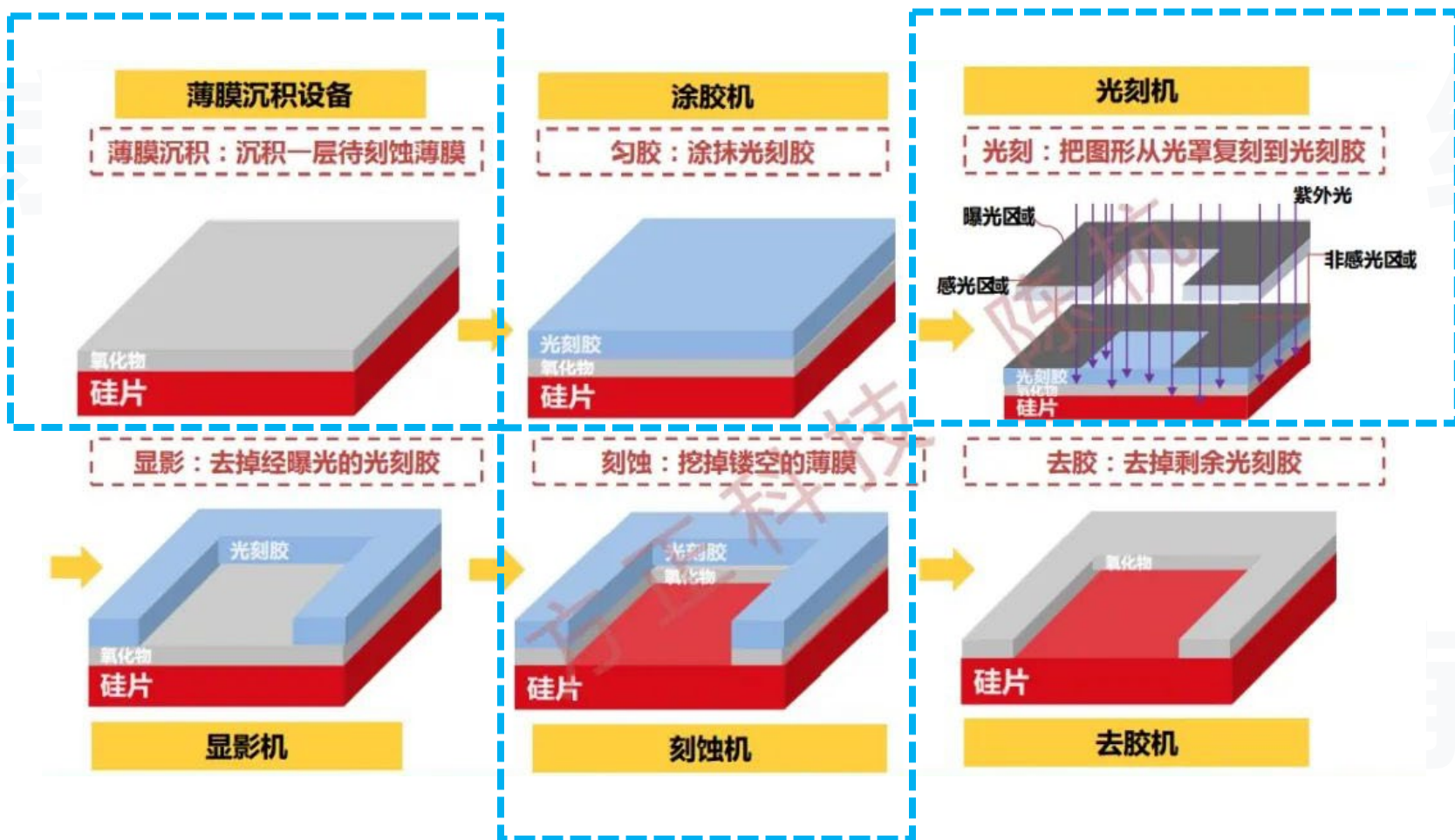
长存128层Nand Flash芯片



长存SSD固态硬盘芯片 (535元)

# 中国的“卡脖子”领域之一：晶圆加工产业

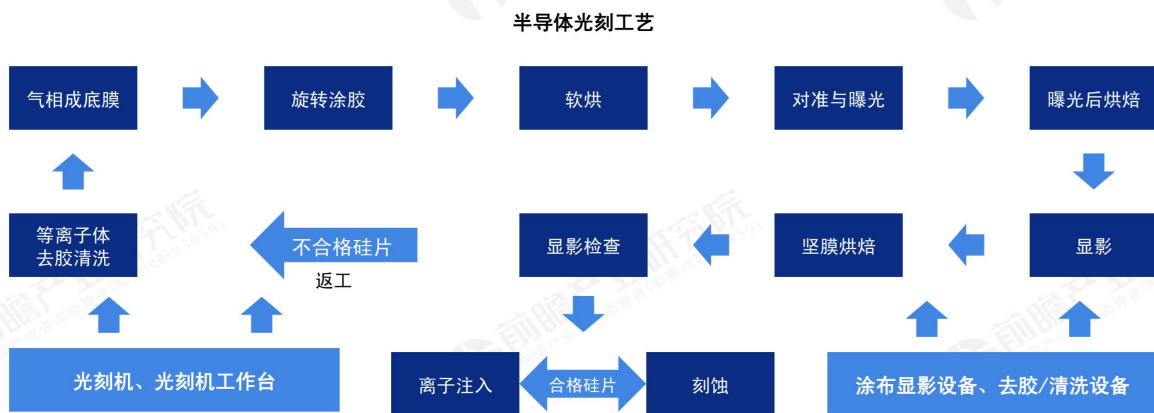
- 更高精度、更高可靠性的**光刻**、**刻蚀**、**薄膜沉积**技术是亟待解决的三大瓶颈



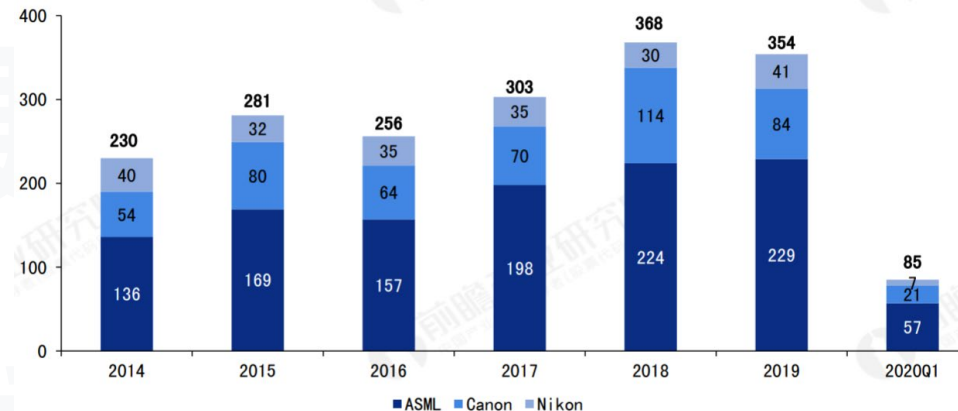


# 中国智能芯片产业的关键瓶颈 – 光刻技术

- 高性能光刻机成为我国智能芯片产业的“卡脖子”问题之一

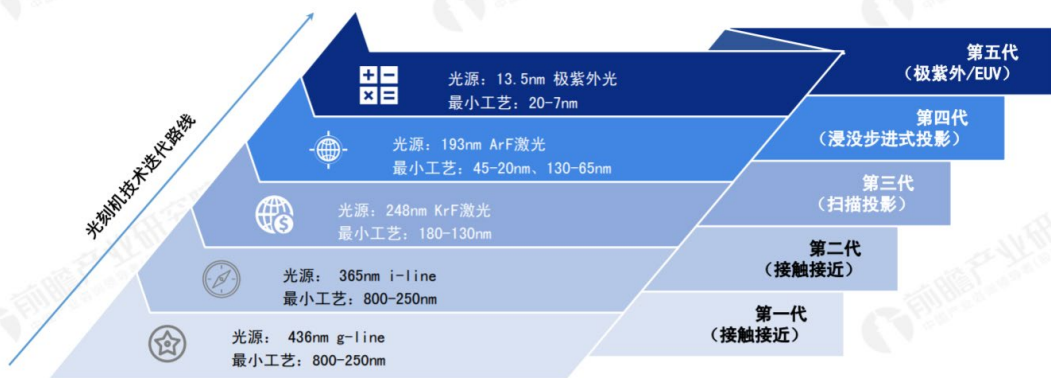


2014-2020Q1全球光刻机销售数量情况 (单位: 台)



中国光刻设备相关领先企业技术进展情况

光刻设备	领先企业	已具备技术	在研技术
光刻机	上海微电子	130-90nm	65nm
光刻机工作台	华卓精科	130-65nm	45nm
涂布显影	芯源微	130-45nm	28-14nm
去胶/清洗	屹唐半导体	130-5nm	3nm



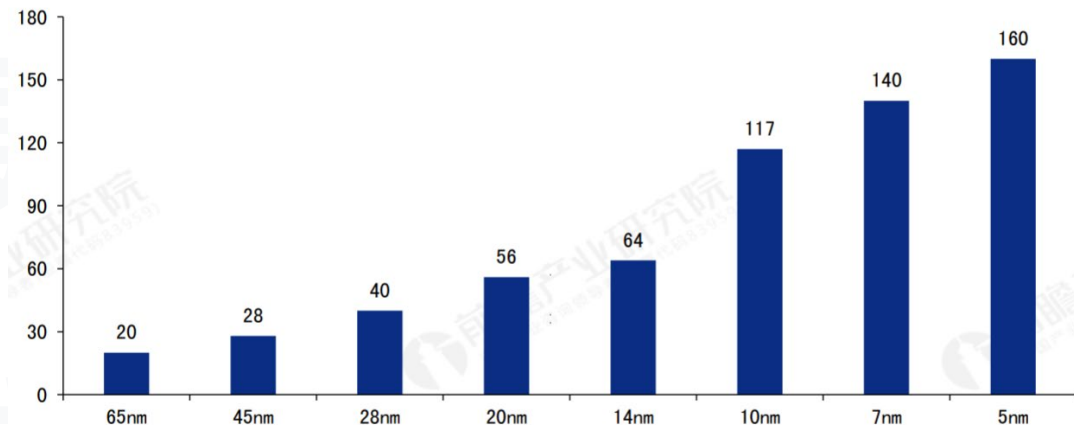


# 中国智能芯片产业的关键瓶颈 – 刻蚀技术

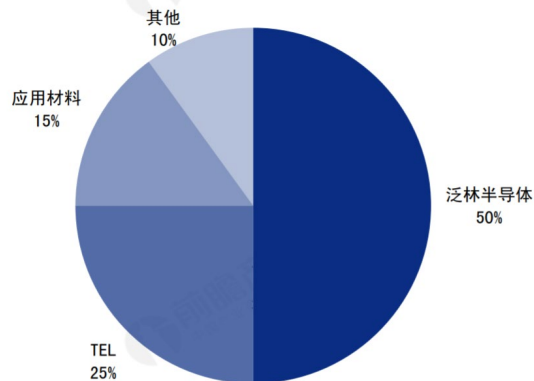
- 高性能刻蚀成为我国智能芯片产业的“卡脖子”问题之一



不同工艺的刻蚀次数（单位：次）



2019年全球刻蚀设备市场品牌竞争格局（单位：%）



中国刻蚀设备相关领先企业技术进展情况

设备	国产化率	设备类型	国内领先企业	已具备技术	在研技术	采购量
刻蚀设备	20%	介质刻蚀机	中微半导体	65-5nm	3nm	大于50台，5nm已打入台积电
		硅刻蚀机	北方华创	65-28nm	14-5nm	大于20台
		金属刻蚀机	北方华创	65-28nm	14nm	/

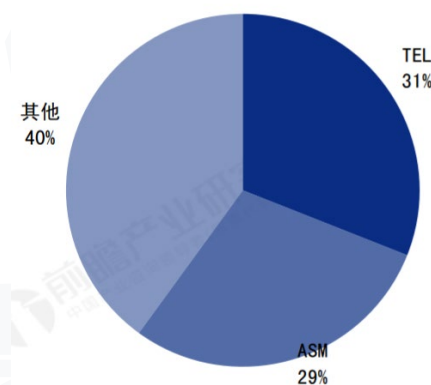
# 中国智能芯片产业的关键瓶颈 – 薄膜沉积技术

## • 高性能薄膜沉积成为我国智能芯片产业的“卡脖子”问题之一

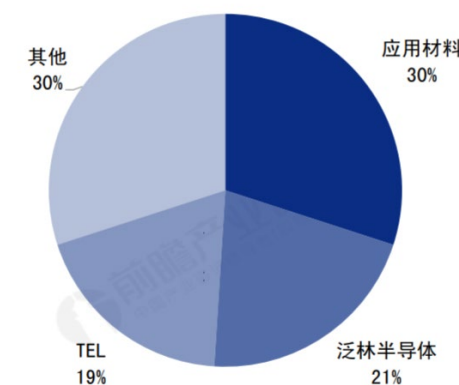
三种半导体薄膜沉积工艺比较

指标	原子层沉积 (ALD)	物理式真空镀膜 (PVD)	化学式真空镀膜 (CVD)
原理	表面反应沉积	蒸发凝固	气相反应沉积
过程	层状生长	形核长大	形核长大
台阶覆盖率	优秀	一般	好
速率	慢	快	快
温度	低	低	高
层均匀性	优秀	一般	较好
厚度控制	反应回圈次数	沉积时间	沉积时间, 气象分压
成分	均匀, 杂质少	无杂质	易含杂质

2019年全球ALD设备市场占比 (单位: %)



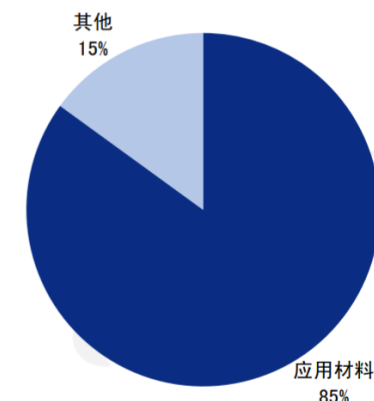
2019年全球CVD设备市场占比 (单位: %)



中国薄膜沉积设备相关领先企业技术进展情况

薄膜沉积设备	领先企业	已具备技术	在研技术
PVD	北方华创	28/14nm	7/5nm
	北方华创	28/14nm	7/5nm
CVD	沈阳拓荆	28/14nm	7/5nm
	北方华创	28/14nm	7/5nm
ALD	沈阳拓荆	28/14nm	7/5nm

2019年全球PVD设备市场占比 (单位: %)



# 中国芯片设计产业现状 – 华为海思、紫光集团等

- 华为海思半导体、紫光集团是中国大陆最大的芯片设计公司




国网信通产业集团  
STATE GRID INFO & TELECOM GROUP

北京智芯微电子科技有限公司  
BEIJING SMARTCHIP MICROELECTRONICS TECHNOLOGY CO., LTD.

电网相关芯片



移动通信	物联网	安全/FPGA	存储	数据通信
 <p>业内首款128层QLC 3D NAND 闪存 128层3D NAND闪存</p>	 <p>拥有完备自主知识产权的DRAM芯片 DDR4</p>	 <p>国内第一款自主知识产权的32层三维闪存芯片 32层三维闪存芯片</p>	 <p>全球首款基于Xtacking®架构设计并实现量产的闪存产品 64层三维闪存</p>	



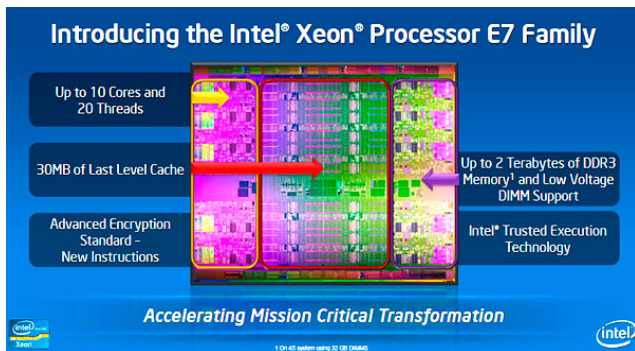
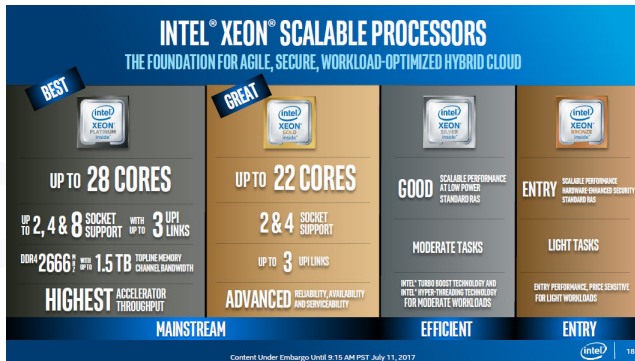
SANECHIPS™  
中兴微电子

通信相关芯片



# 中国的“卡脖子”领域之二：高性能处理器芯片

- 我国在高性能计算芯片CPU、GPU、FPGA的指令集与架构设计领域目前落后较多



高性能CPU遭美国出口管制禁运

高性能GPU遭美国出口管制禁运

高性能可编程逻辑FPGA与美国主流厂商



国产龙芯3C5000目前已可商用，但性能与至强系列仍有显著差异

国产GPU尚处于初级阶段

国产GPU包括摩尔线程、壁仞科技、燧原科技、天数智芯、景嘉微等，与英伟达差距很大

Altera、Xilinx差距明显

国产FPGA包括紫光同创、安路科技、复旦微等，在并行规模、功能灵活性上急需进步



# 中国的“卡脖子”领域之三：EDA软件产业

- 我国在高性能的电路辅助设计与仿真工业软件方面目前与发达国家差距明显

## 现状

2019年

EDA三巨头Cadence、Synopsys、Mentor等已经对华为断供EDA工具，不再出售新license

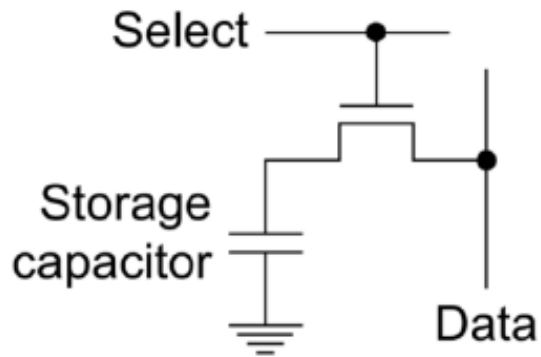
2022年

2022年8月美国将停止对中国出口GAA相关EDA软件，GAA主要用于3nm及以下晶体管



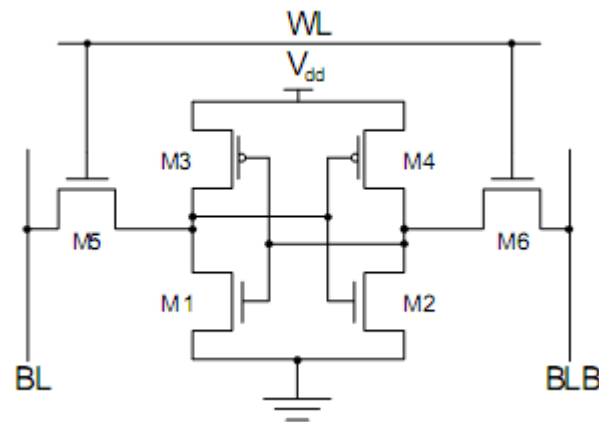
国产EDA软件目前门类已补齐，但制程支持、设计仿真性能、与晶圆厂对接等多方面仍处于落后状态

- 成熟的存储介质，广泛运用于内存、Cache中



## DRAM

- 数据以电荷形式存储在电容中
- 通过晶体管选中cell进行读写
- 该结构存在漏电，需要频繁刷新

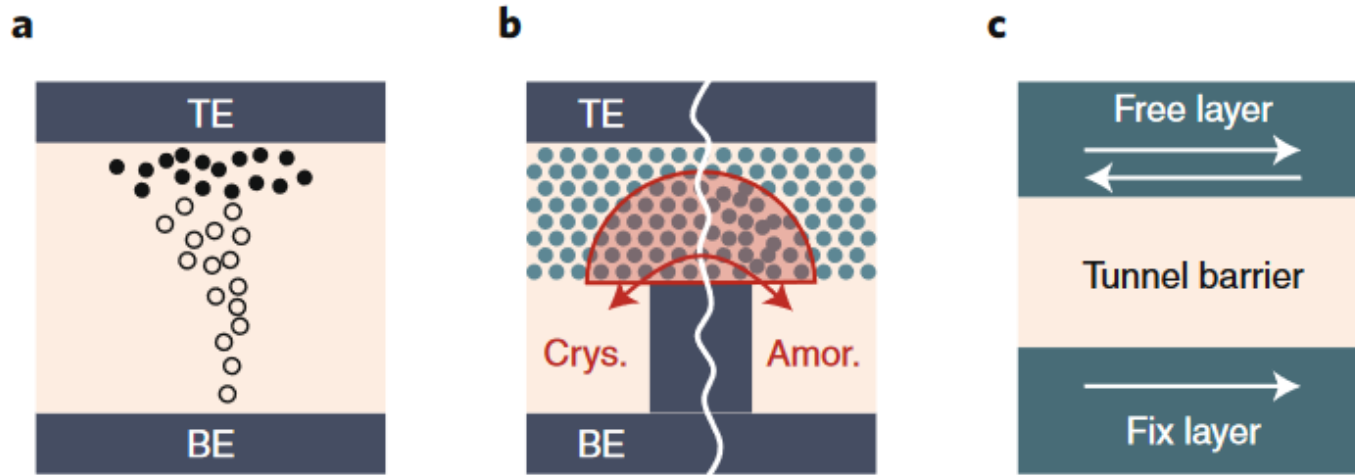


## SRAM

- 数据以被锁存在中央四个晶体管中
- 读写通过BL与BLB刷新
- 访问速度快，数据保存时间长，但相对面积较大

# RRAM & PCM & MRAM

- 新型阻变存储器，依靠物理性质引起的阻值变化存储信息



- **RRAM** (a): 电场驱动金属离子或氧空穴电迁移形成导电细丝改变阻值
- **PCM** (b): 焦耳效应产热导致相变材料在晶态（导电）与非晶态（绝缘）发生转变改变阻值
- **MRAM** (c): 电场作用下磁畴反转引起阻值变化

- 非易失
- 集成密度高