

## 第二章 计算机的发展及应用

2.1 计算机的发展史

2.2 计算机的应用

2.3 计算机的展望

## 2.1 计算机的发展史

### 一、计算机的产生和发展

代	时间	硬件技术	速度（次/秒）
一	1946~1957	电子管	40 000
二	1958~1964	晶体管	200 000
三	1965~1971	中小规模 集成电路	1 000 000
四	1972~现在	大、超大 规模集成电路	10 000 000

硬件技术对计算机更新换代有重要的影响

## 2.1 计算机的发展史

### 一、计算机的产生和发展

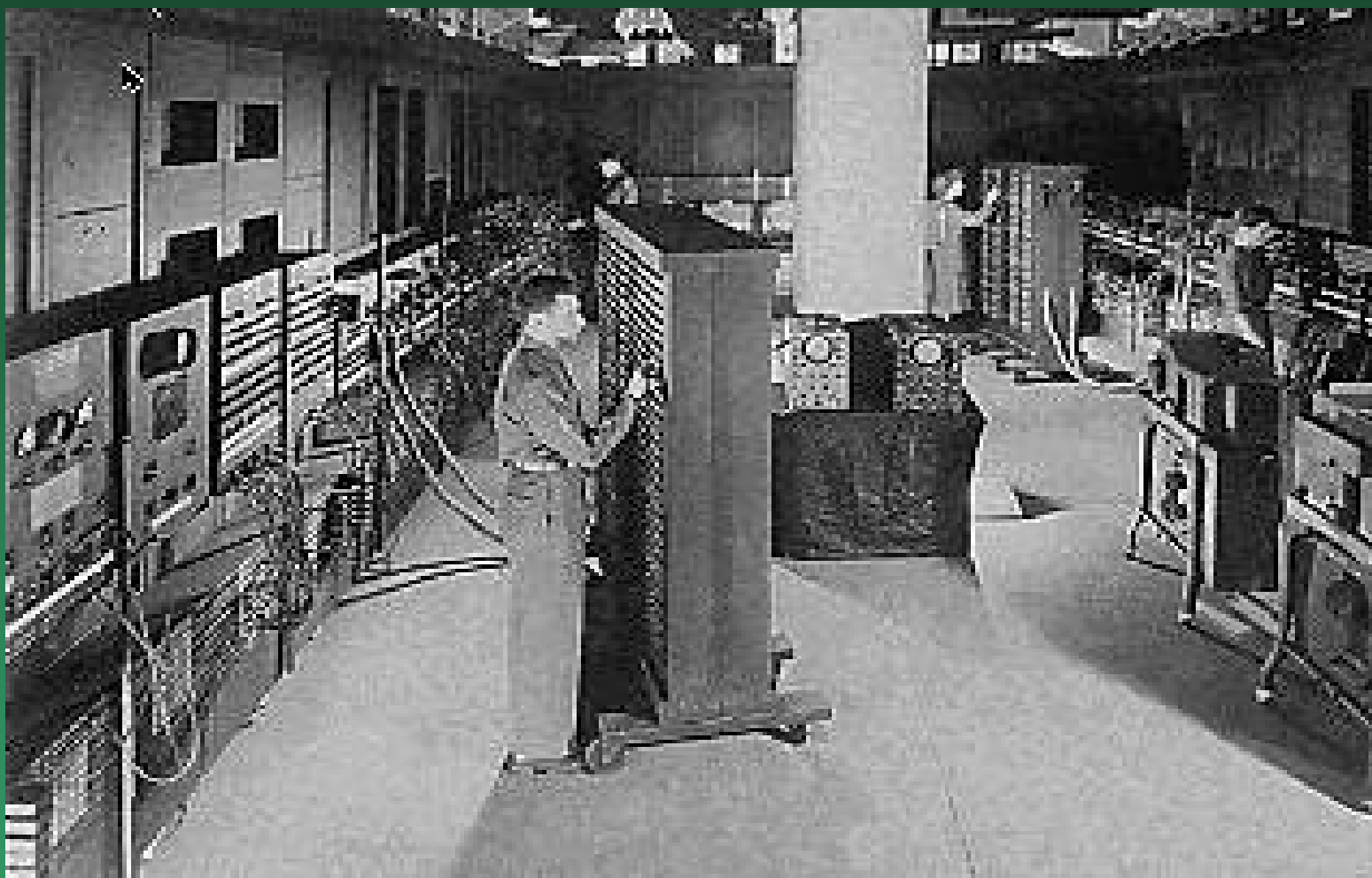
- 第一代 ( 1946 - 1957 ) 电子管计算机(Vacuum Tube )

- 1946年 第一台电子计算机 ENIAC诞生

- ✓ 美国宾夕法尼亚大学莫尔学院机电系
- ✓ 速度：5 000次加法 / 秒
- ✓ 十进制表示信息和运算：存储器由20个累加器组成，每个累加器存10位十进制数，每一位由10个真空管表示。
- ✓ 平方、立方、sin、cos等
- ✓ 基本器件：真空电子管
- ✓ 用手工搬动开关和拔插电缆来编程，采用穿孔卡输入输出数据，1955年退役

**Electronic Numerical Integrator And Computer**  
**电子数字积分计算机**

## 2.1



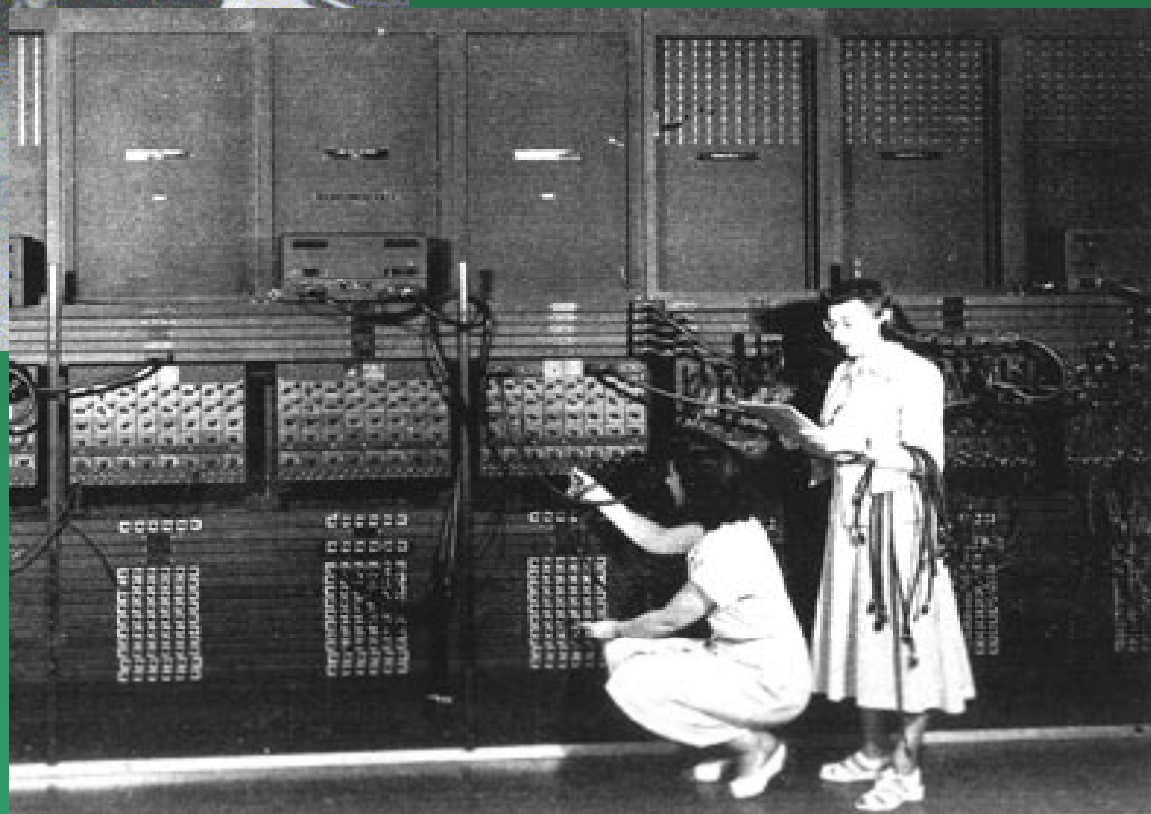
世界上第一台电子计算机 ENIAC(1946)

# Electronic Numerical Integrator And Computer

占地面积170平方米  
重30吨  
有17468个真空管  
耗电160千瓦

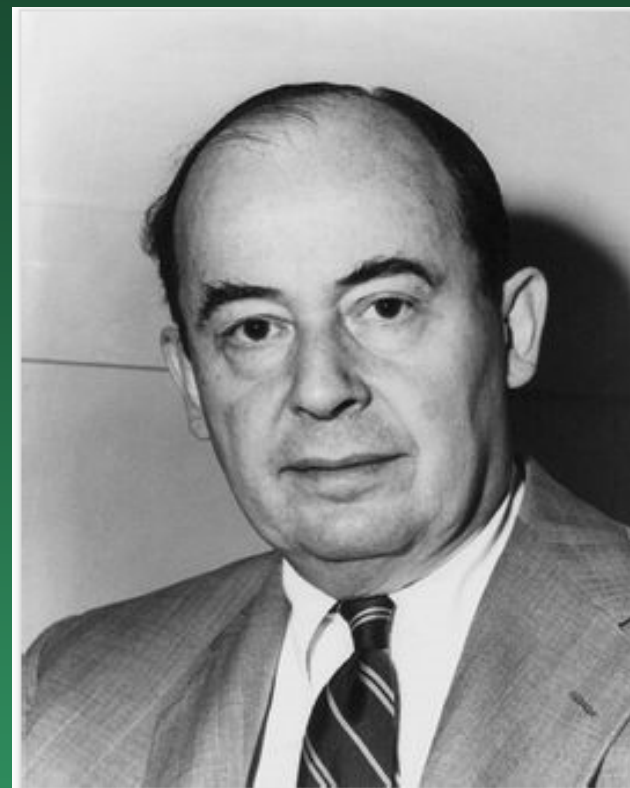


该机正式运行到  
1955年10月2日，  
这十年间共运行  
80 223个小时



# 冯·诺依曼的故事

- 1944年，冯·诺依曼参加原子弹的研制工作，涉及到极为困难的计算。
- 1944年夏的一天，诺依曼巧遇美国弹道实验室的军方负责人戈尔斯坦，他正参与ENIAC的研制工作。
- 冯·诺依曼被戈尔斯坦介绍加入ENIAC研制组，1945年，他们在共同讨论的基础上，冯·诺依曼以“关于EDVAC的报告草案”为题，起草了长达101页的总结报告，发表了全新的“**存储程序通用电子计算机方案**”。
- 一向专搞理论研究的普林斯顿高等研究院批准让冯·诺依曼建造计算机，其依据就是这份报告。



**Electronic  
Discrete  
Variable  
Automatic  
Computer**

# 现代计算机的原型

1946年，普林斯顿高等研究院（ the Institute for Advance Study at Princeton , IAS ）开始设计“**存储程序**”计算机，被称为**IAS计算机**（ 1951年才完成，它并不是第一台存储程序计算机，1949年由英国剑桥大学完成的EDSAC是第一台 ）。

- ◆ 在那个报告中提出的计算机结构被称为**冯·诺依曼结构**。
- ◆ 冯·诺依曼结构最重要的思想是“**存储程序(Stored-program)**”
- ◆ **工作方式：**

任何要计算机完成的工作都要先被编写成程序，然后将程序和原始数据送入主存并启动执行。一旦程序被启动，计算机应能在不需操作人员干预下，自动完成逐条取出指令和执行指令的任务。

- ◆ 冯·诺依曼结构计算机也称为冯·诺依曼机器（ Von Neumann Machine ）。
- ◆ 几乎现代所有的通用计算机大都采用冯·诺依曼结构，因此，IAS计算机是现代计算机的原型机。

冯·诺依曼结构的主要思想是什么呢？



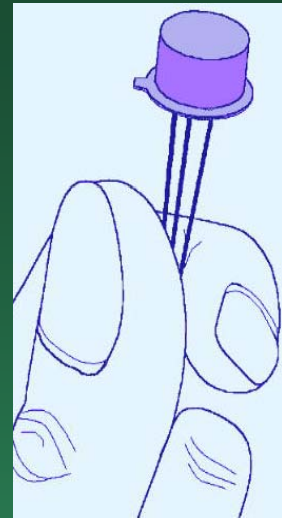
# 第一代（1946—1957）电子管计算机

- 第一代计算机特点
  - ◆ 元器件：电子管可以存储信息,存储容量：几千存储单元；
  - ◆ 使用机器语言；
  - ◆ 输入输出速度慢；
  - ◆ 计算速度：几次/秒；
  - ◆ 应用领域为科学计算，为军事国防尖端科技服务



## 第二代，1958—1964，晶体管计算机

- 元器件：逻辑元件采用晶体管；
- 内存由磁芯构成，外存为磁鼓与磁带；
- 存储容量：10万存储单元；
- 汇编语言代替机器语言，使用操作系统；
- 计算速度：几十万次/秒；
- 特点：变址，浮点运算，多路存储器，I/O处理机，中央交换结构(非总线结构)。
- 应用：在军事国防尖端科技上的应用范围进一步扩大，并应用在气象、数据处理、以及其它科学研究领域。
- 代表机型：IBM 7094 (scientific)、1401 (business)和 **DEC PDP-1**



晶体管：  
**Transistor**



**DEC PDP-1**

## 第三代，1965—1971，小、中规模集成电路（SSI、MSI）计算机

- 元器件：逻辑元件与主存储器均由集成电路（IC）实现。（功耗、体积和价格进一步下降）
- 特点：微程序控制，Cache，虚拟存储器，流水线等。
- 使用了操作系统
- 计算速度达到百万次/秒
- 代表机种：IBM 360和DEC PDP-8（大/巨型机与小型机同时发展）
  - ◆ 巨型机(Supercomputer)：Cray-1
  - ◆ 大型机(Mainframe)：IBM360系列
  - ◆ 小型机(Minicomputer)：DEC PDP-8

# IBM System/360系列计算机

- IBM公司于1964年研制成功
- 引入了“兼容机”（“系列机”）概念
  - ◆ 兼容机的特征：
    - 相同的或相似的指令集
    - 相同或相似的操作系统
    - 更高的速度
    - 更多的I/O端口数
    - 更大的内存容量
    - 更高的价格



IBM 360

低端机指令集是高端机的一个子集，称为“向后兼容”。功能相同，而性能不同。

问题1：引入“兼容机”有什么好处？

问题2：实现“系列机”的关键是什么？

# IBM System / 360

2.1

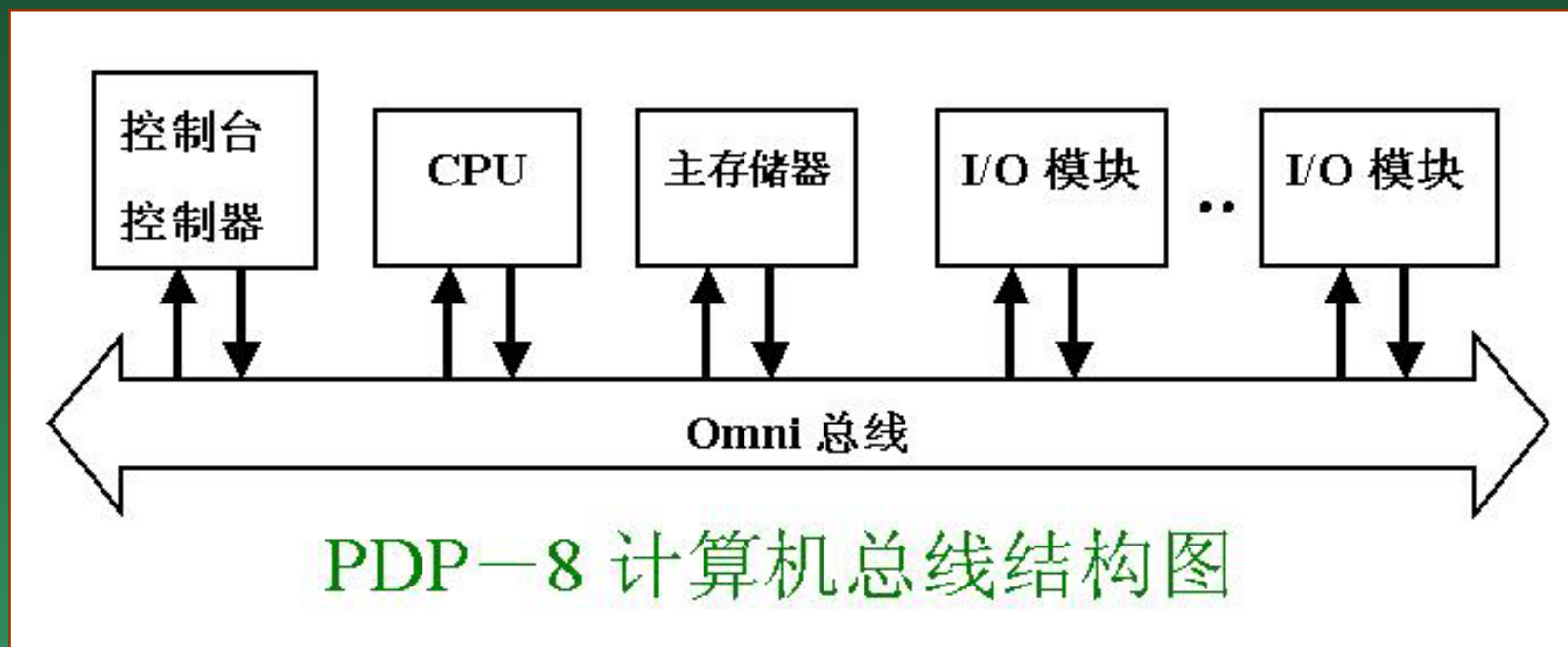


# DEC公司的PDP-8机

- 同在64年出现。与IBM 360相比，价格更低、更小巧，因而被称为小型机（Minicomputer）
- PDP-8“创造了小型机的概念，并使之成为数十亿美元的工业”，使DEC成为了最大的小型机制造商。
- **主要特点：首次采用总线结构。**

Omnibus总线包含了96个独立的信号通道，用以传送控制、地址和数据信号。这种结构具有高度的灵活性，允许将模块插入总线以形成各种配置。

# PDP-8/E计算机系统框图



问题：“总线结构”有什么好处？

具有高度的灵活性，允许将模块插入总线以形成各种配置  
节省器件，体积小，价格便宜

## 第四代，1972 ~至今，大、超大规模集成电路（LSI/VLSI/ULSI）计算机

- 微处理器和半导体存储器技术发展迅猛，微型计算机出现。使计算机进入了几乎所有行业。

### 半导体存储器

- ◆ 70年Fairchild公司生产出第一个相对大容量半导体存储器
- ◆ 74年位价格低于磁芯的半导体存储器出现，并快速下跌
- ◆ 从70年起，存储密度呈4倍提高（几乎是每3年）

### 微处理器

- ◆ 微处理器芯片密度不断增加，使CPU中所有元件放在一块芯片上成为可能。71年开发出第一个微处理器芯片4004。
- 特点：共享存储器，分布式存储器及大规模并行处理系统
- 出现了包含CPU的单片IC(微处理器)，并出现了以微处理器为核心的电子计算机即微型计算机，使计算机



# 我国计算机发展历程

- 从1956年开始研制
- 1958年，研制成功电子管数字计算机
  - ◆ “八一”型通用电子计算机（103机）
- 1971年，研制成功电子管数字计算机
- 1975年开始研制微机
- 1978年，研制出每秒500万次大型计算机
- 1984年国防科大研制出每秒1亿次“银河”电子计算机，及银河Ⅱ型、银河Ⅲ型计算机。
- 2008.11，中科院计算所国家智能计算机研究开发中心、曙光信息产业（北京）有限公司、上海超级计算中心联合研制的集群超级计算机曙光5000A在TOP500强排行榜中位居第10。
- 2009.11安装在我国国家超级计算天津中心的“天河一号”居第5位
- 2010.11天河1号二期工程“天河1”位居top500第1名
- 2013.6 天河2号(MilkyWay-2)，计算速度达到每秒近34千万亿次浮点运算，位居top500第1名

## 2.1

最权威的超级计算机排名的参考网址

<http://www.top500.org>

# TOP 10 Sites for June 2013~November 2014 :

RANK	SITE	SYSTEM	CORES	RMAX (TFLOP/S)	RPEAK (TFLOP/S)	POWER (KW)
1	National Super Computer Center in Guangzhou China	<b>Tianhe-2 (MilkyWay-2)</b> - TH-IVB-FEP Cluster, Intel Xeon E5-2692 12C 2.200GHz, TH Express-2, Intel Xeon Phi 31S1P NUDT	3,120,000	33,862.7	54,902.4	17,808
2	DOE/SC/Oak Ridge National Laboratory United States	<b>Titan</b> - Cray XK7 , Opteron 6274 16C 2.200GHz, Cray Gemini interconnect, NVIDIA K20x Cray Inc.	560,640	17,590.0	27,112.5	8,209
3	DOE/NNSA/LLNL United States	<b>Sequoia</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60 GHz, Custom IBM	1,572,864	17,173.2	20,132.7	7,890
4	RIKEN Advanced Institute for Computational Science (AICS) Japan	K computer, SPARC64 VIIIfx 2.0GHz, Tofu interconnect Fujitsu	705,024	10,510.0	11,280.4	12,660
5	DOE/SC/Argonne National Laboratory United States	<b>Mira</b> - BlueGene/Q, Power BQC 16C 1.60GHz, Custom IBM	786,432	8,586.6	10,066.3	3,945

# 天河2号（银河2号）超级计算机



- 国防科技大学研制的天河2号超级计算机以33.86千万亿次/秒（petaflop/s）的双精度浮点运算速度成为全球最快的超级计算机，位居top500榜首。天河2号比第二名Titan快近一倍。
- 天河2号（银河2号）有16000个节点，每个节点由两个Intel Xeon IvyBridge处理器和三个Xeon Phi协处理器组成，总共3120000个计算核心，并将在今年年底部署在广州的国家超级计算机中心。



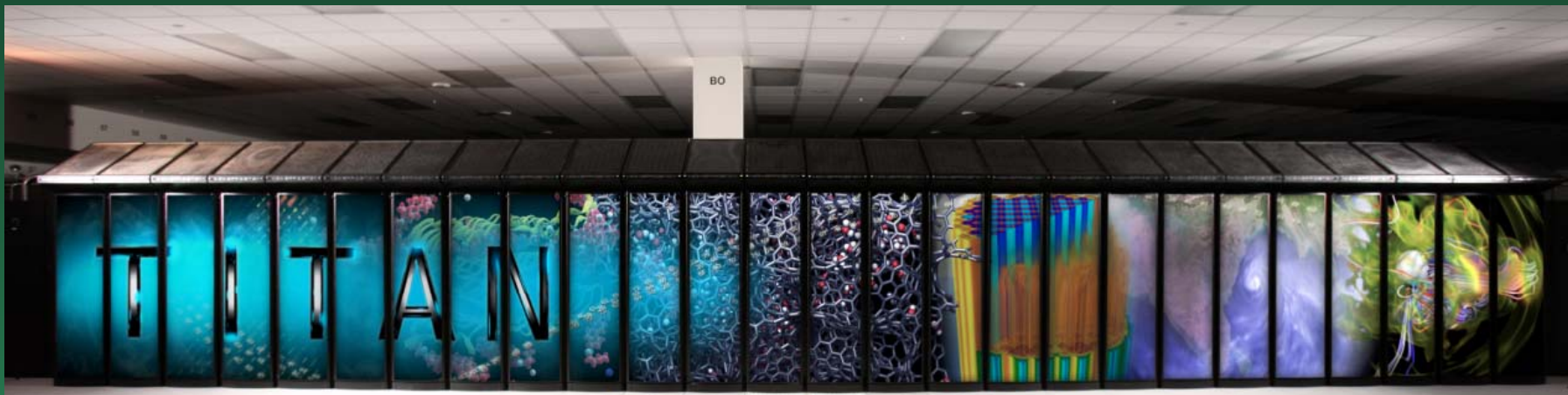
天河一号二期工程——天河1A



我和天河一号



# Titan 超级计算机



- Titan采用Cray公司的XK7系统，位于美国能源部（DOE）的橡树岭国家实验室。Titan使用NVIDIA K20x处理器加速，在Linpack基准测试运算速度可达到每秒17.59千万亿次/秒（petaflop/s）
- Titan还是本次榜单中能效比最高的系统之一，总共消耗电力8.21兆瓦，相当于每瓦每秒提供214.3亿次浮点运算速度。



# Sequoia超级计算机



# Sequoia超级计算机

- Sequoia的建造主要是为美国国家核安全管理局进行复杂的模拟运算，这对于国家核武器储备的安全管理十分重要。
- 除了为国家的核安全服务，Sequoia还被用于其他领域的计算，特别是对商业用户来说，强大的计算能力有助于保持其商业优势。
- 该产品是基于IBM的Blue Gene/Q架构建造的，在Linpack基准测试运算速度达到每秒17.17千万亿次/秒 ( petaflop/s )



- 走鹃为BladeCenter QS22/LS21 集群，由IBM PowerXCell 3.2GHz和AMD Opteron DC 1.8GHz两种处理器组成，拥有122400个计算核心
- 其中，皓龙处理器负责标准的运算处理，如文件系统的I/O，而PowerXCell 芯片主要加速数学和CPU密集型运算。

# Roadrunner的使用

花费1.33亿美元的Roadrunner是在纽约州的IBM Poughkeepsie研究中心进行建造、检测、调试和运行Linpack benchmark的。这套重达250吨的宠然大物的最终安装地点——新墨西哥州北部美国能源部洛斯阿拉莫斯国家实验室。在这里，它会被美国国家核安全局（National Nuclear Security Administration，NNSA）用来确保美国核武器储备的持续发展、安全和可靠性，包括模拟核爆炸后零点几秒的行为状态。自上一次物理核试验以来，已经过去了15年，在这期间，NNSA一直在使用计算机模拟来测试国家的核武器。

“跟我所知道的其他任何一家科技企业相比，这些模拟试验用到更多物理学、化学和材料科学方面的技术。” NNSA研究开发和模拟实验室主任Demitri Kusnezov说，“它每年需要使用最大型的计算机系统来模拟非常复杂的问题。Roadrunner是我们在这方面最新的一套工具，相信它是一个有里程碑意义的成就。”

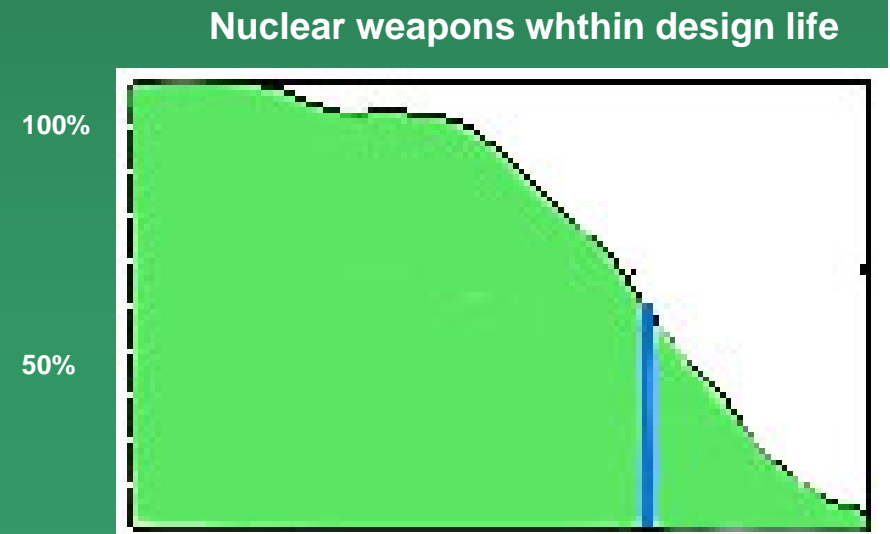
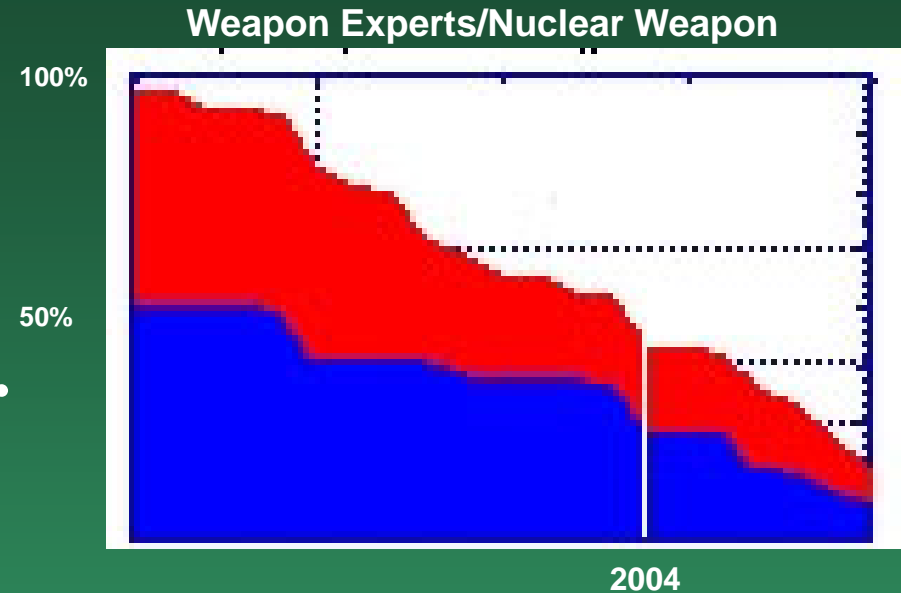
在执行武器模拟之余，Roadrunner也会用于航天、能源、人类基因、纳米和气候方面的研究。IBM的一个应用小组已经在模拟人类大脑方面达到了petaflop的性能水平。2009年早期在Los Alamos实验室的一些测试项目的应用包括模拟生物燃料纤维素分子碎裂（molecular breakdown of cellulose for biofuels）、超新星光变曲线（supernova light curves）、等离子物理的三维磁体重联（3D magnetic reconnection in plasma physics）和金属纳米线的时间演化（time evolution of metallic nanowires）

- 目前美国使用的三种核武器试验方式
  - ◆ 超级计算机仿真核爆炸
  - ◆ 在实验室用特种设备进行物理模拟
  - ◆ 进行亚临界核试验

## 第三种方法

*Gilbert Weigand, US Department of Energy, 1999*  
环境——至2004年

- 美国已经停止核试验12年.
- 2004年50%的核武器专家离任.
- 50%核武器年龄已经超过设计寿命.
- 实验室/工厂对超期服役核武器的经验甚少.
- 怎么办? 恢复核试验吗?





## 第三种方法

- 通过SSP计划不进行核实验，我们在全面禁止实验下能应对保持美国核威胁的挑战吗？
  - ◆ We can meet the challenge of maintaining our nuclear deterrent under a [comprehensive test ban] through a **S**tockpile **S**tewardship **P**rogram without nuclear testing?
- 要建立领先的计算建模与仿真能力
  - ◆ 迅速推进从基于核实验的方法到基于计算的方法的转变
    - to promptly shift from nuclear test-based methods to computationally based methods,
  - ◆ 将储存维护单元集成起来，从而减少核危险
    - to integrate stockpile stewardship elements and thus reduce the nuclear danger.

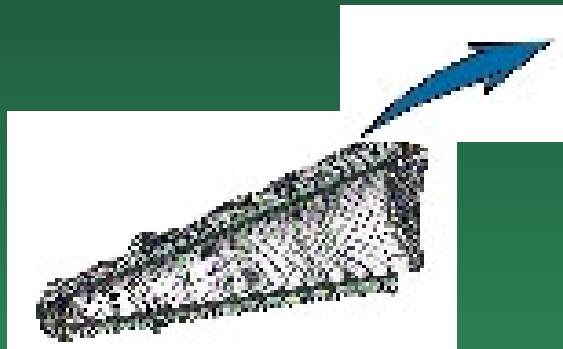
**Simulation -- A 21st Century Discipline**

Gilbert Weigand, US Department of Energy, 1999

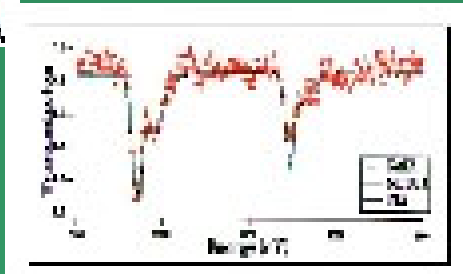


# 第三种方法

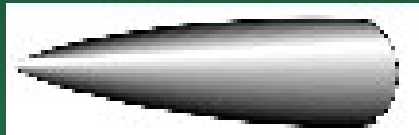
SSP ( *The Stockpile Stewardship Program* ) 必须保证核武器继续安全而可靠



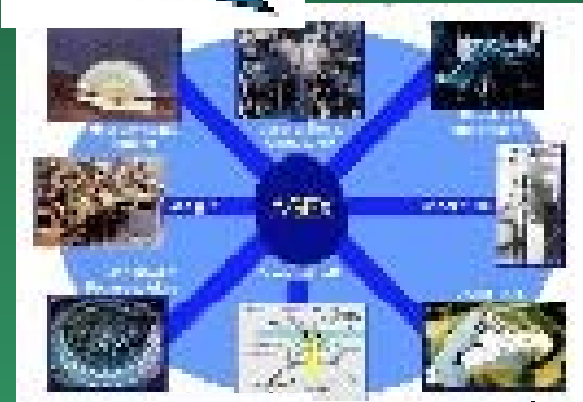
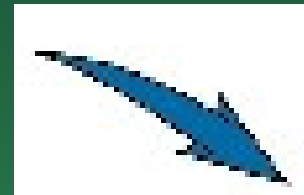
计算弹头目前的安全系数



利用验证过的仿真数据重复地下核试验



潜在的保存问题



利用**AGEX** 数据

验证高级计算仿真

# Shifting promptly from test-based methods to science-based methods

(1) 全规模或全能量密度研究与实验

Adv. Hydro Capability



National Ignition Facility



(2) 仿真和理论

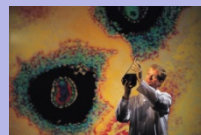
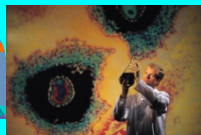


评价与确认

存档的武器数据

核输出  
• 安全性  
• 可靠性  
• 性能

(3) 世界领先级的学术机构与实验室的科学研究与实验



## 二、微型计算机的出现和发展

### Moore's Law:

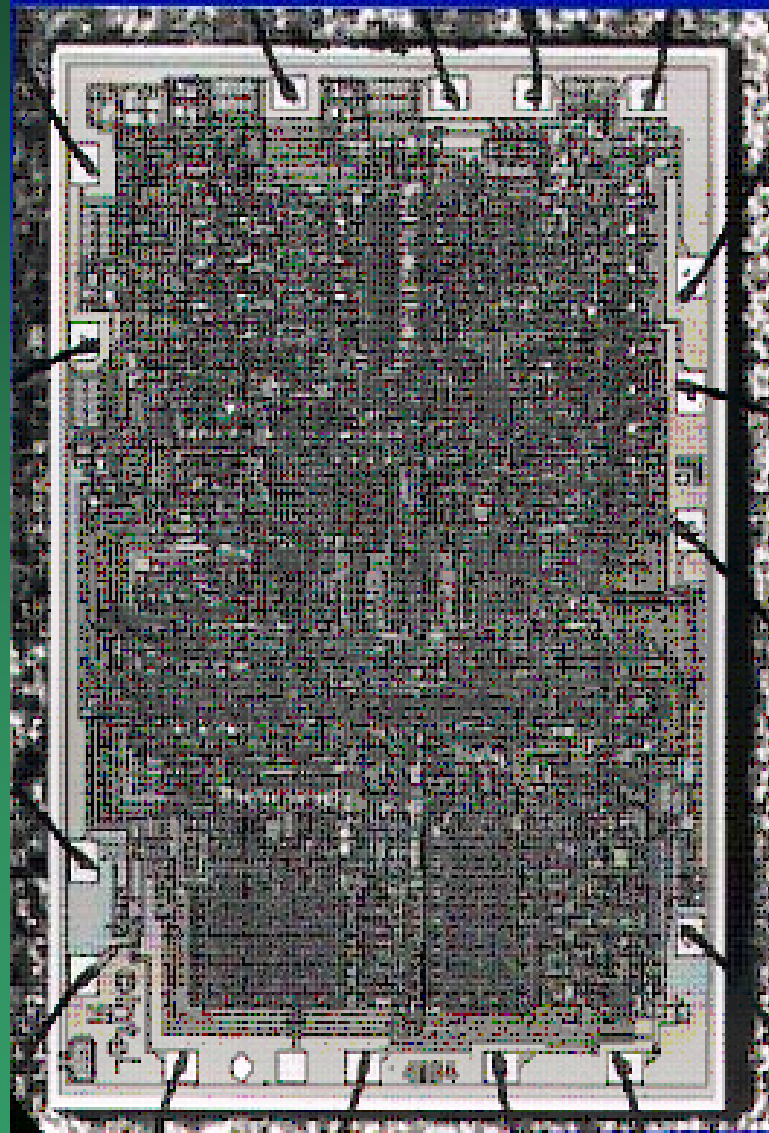
Intel 公司的缔造者之一  
Gordon Moore 提出

微芯片上集成的

晶体管数目每18个月翻一番

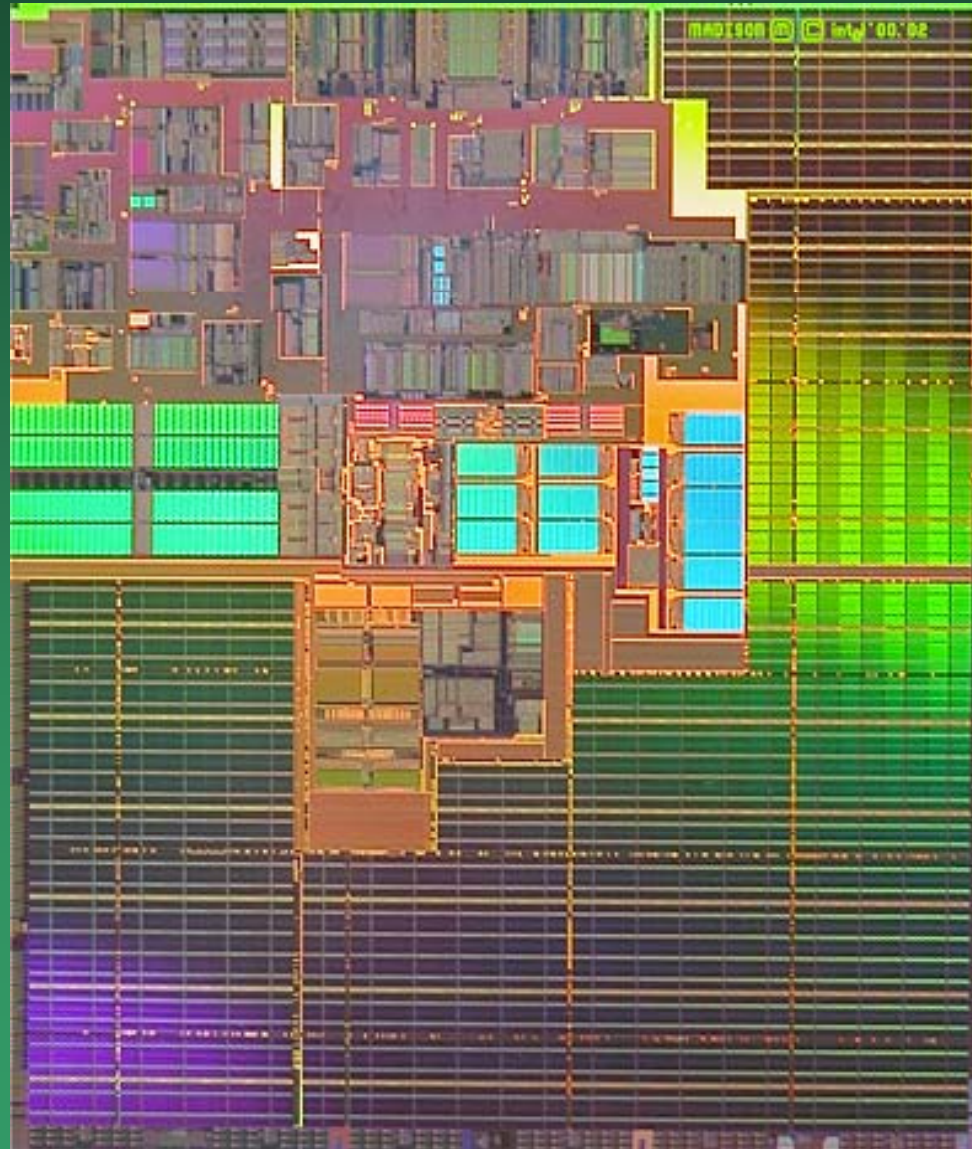
# FIRST MICROPROCESSOR ( 4004 by Intel 1971 )

( 2300 Transistors 12 mm<sup>2</sup> 8μm 750 kHz )



# ITANIUM MICROPROCESSOR

( 410 Million Transistors 374 mm<sup>2</sup> 0.13 $\mu$ m 1.5 GHz )

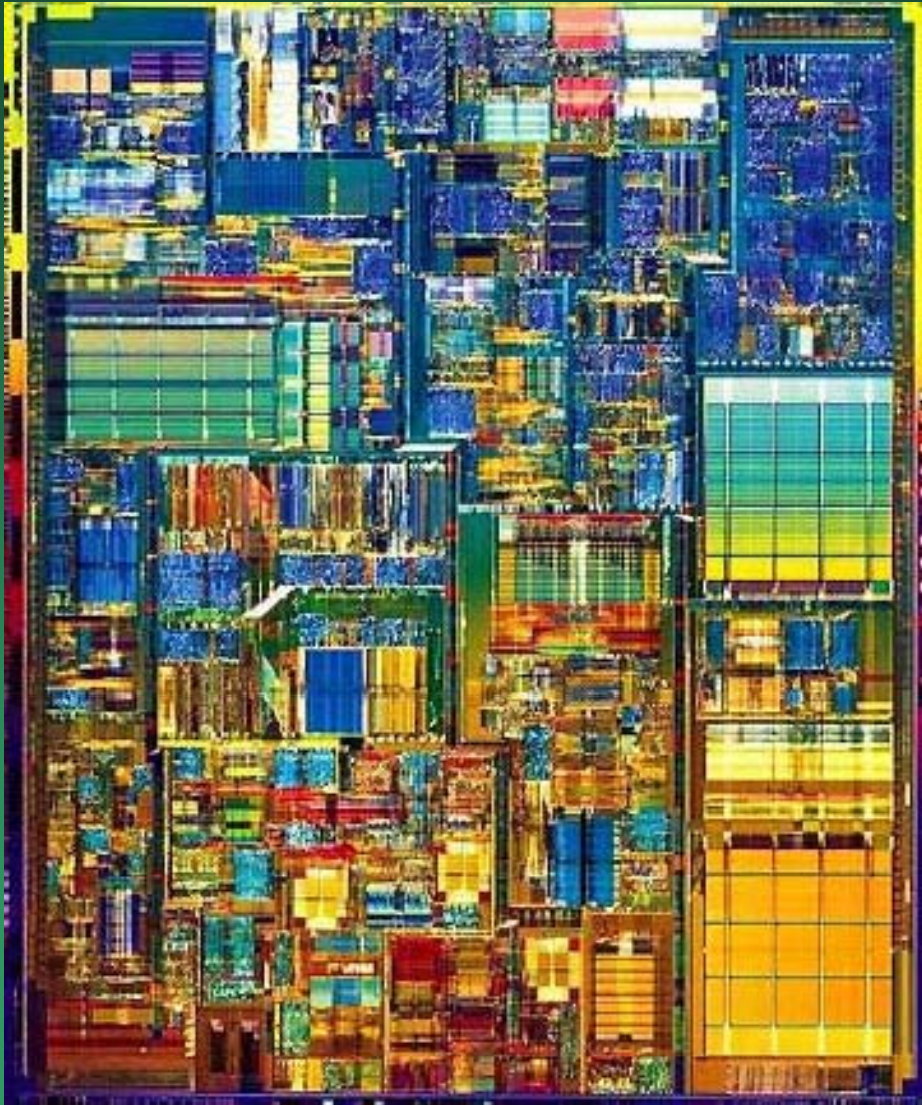


# Intel 公司的典型微处理器产品

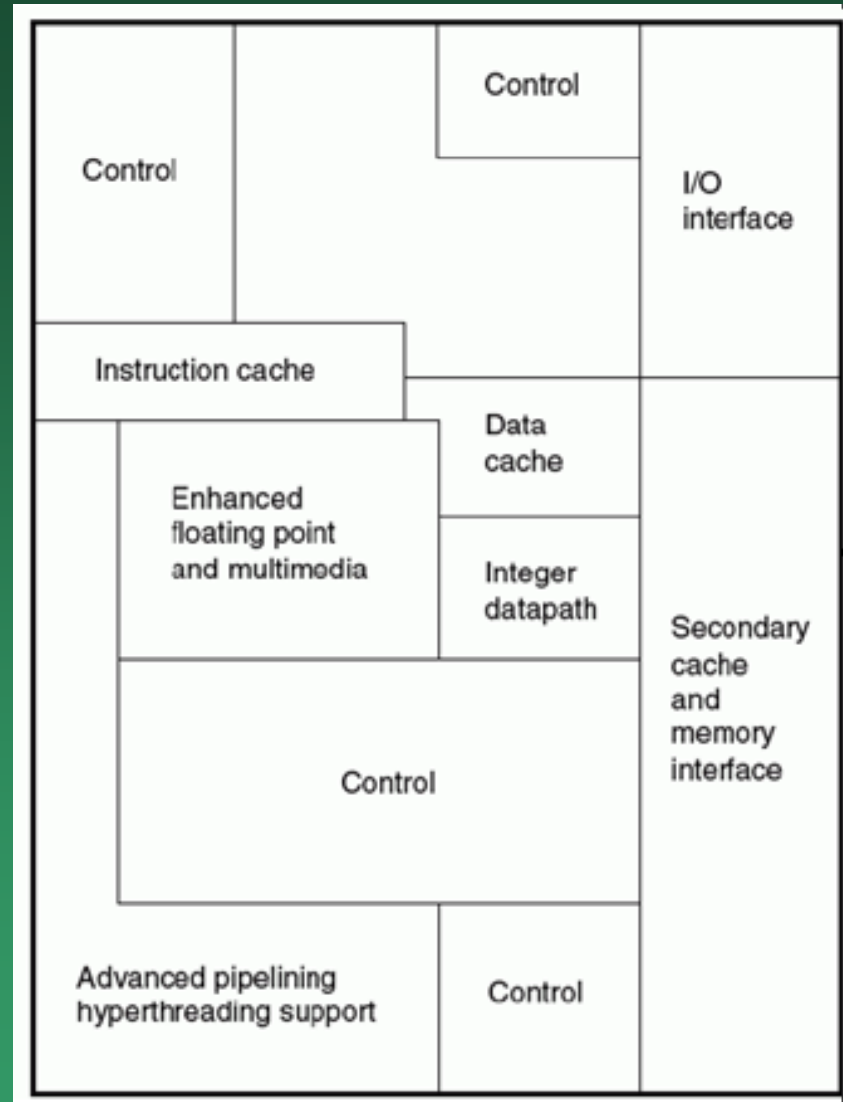
8080	8位	1974年	
8086	16位	1979年	2.9 万
80286	16位	1982年	13.4 万
80386	32位	1985年	27.5 万
80486	32位	1989年	120.0 万
Pentium	64位 (准)	1993年	310.0 万
Pentium pro	64位 (准)	1995年	550.0 万
Pentium II	64位 (准)	1997年	550.0 万以上
Pentium III	64位 (准)	1999年	800.0 万以上
Pentium 4	64位	2000年	4 200.0 万



# Intel 公司的典型微处理器产品



Pentium 4



Pentium 4内部布局



# Loongson 3B

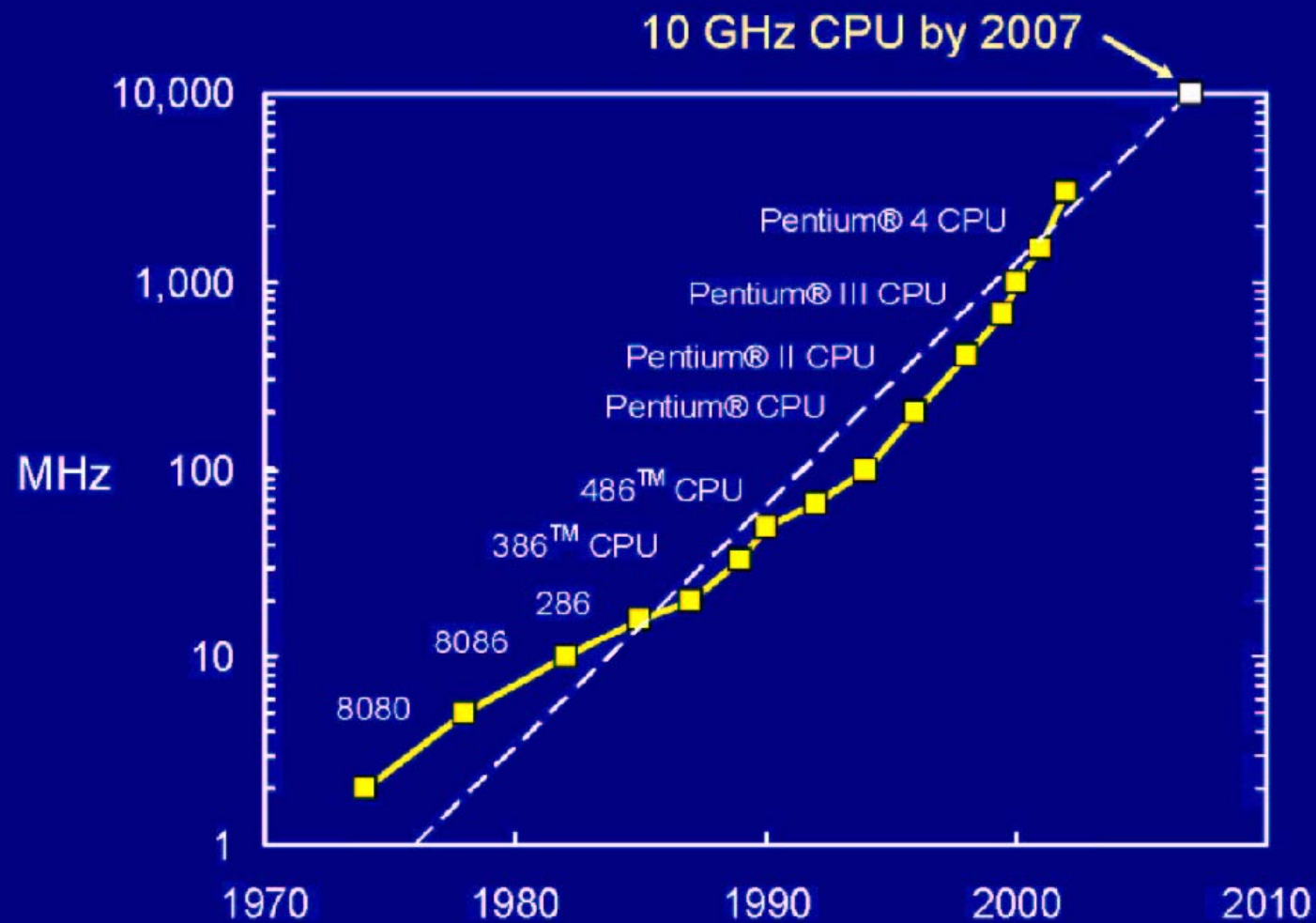
曙光公司此次推出的具有完全自主知识产权的国内首款基于“龙芯” 3B处理器的L620-G15、L640-G15、TC4600L三款服务器产品和L300-G10桌面办公终端产品，均采用国产的“龙芯” 3B处理器及国产操作系统，进一步巩固了曙光在信息安全自主可控战略的长期规划。

据介绍，“龙芯” 3B处理器采用28纳米工艺制造，拥有11亿个晶体管，在设计的复杂度上与国际主流相近，这也是我国第一个超过10亿的晶体管的产品，其运算性能实现了大幅飞跃，国产龙芯处理器与市场主流产品之间的差距正在大幅缩短。

有别于其他可信计算服务器，L620R-S是曙光基于“龙芯”平台开发的一款高性能双路可信服务器，通过采用国产“龙芯”多核处理器和国产可信芯片，实现全自主安全可控的软硬件系统，具有独特的安全性，构建从硬件开始，到BIOS、操作系统、应用的信任链，为业务应用提供安全可信运行环境，全面实现计算系统的主动安全机制。

“之所以基于自主可控的平台搭建可信计算的平台，是因为我们并不能保证非自主可控的CPU一定是安全可靠的。事关国家信息安全，拥有核心技术和自主知识产权的国产处理器是当仁不让的第一选择。”有行业分析师表示，曙光此举实现了我国在信息安全领域真正的全自主可控。□

# CPU MHz TREND



## 处理器的发展将以增加芯片 内的核数为主要方式



如何有效使用??

Courtesy: M.  
McLaren

# David Patterson

“From my perspective, parallelism is the biggest challenge since high-level programming languages. It's the biggest thing in 50 years because industry is betting its future that parallel programming will be useful. ”

ACM Queue Interview with John Hennessy and David Patterson, Jan 2007  
<http://www.acmqueue.com/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=445&page=1>

ACM&IEEE院士，ACM前任主席，提出RISC, RAID, NOW等



# 三、软件技术的兴起和发展

## 1. 各种语言

机器语言 面向机器

汇编语言 面向机器

高级语言 面向问题

**FORTRAN** 科学计算和工程计算

**PASCAL** 结构化程序设计

**C++** 面向对象

**Java** 适应网络环境

## 2. 系统软件

语言处理程序      汇编程序 编译程序 解释程序

操作系统            **DOS UNIX Windows**

服务性程序          装配 调试 诊断 排错

数据库管理系统    数据库和数据库管理软件

网络软件

### 3. 软件发展的特点

- (1) 开发周期长
- (2) 制作成本高
- (3) 检测软件产品质量的特殊性

软件是程序以及开发、使用和维护程序所需要的所有文档

## 2.2 计算机的应用

一、科学计算和数据处理

二、工业控制和实时控制

三、网络技术

1. 电子商务

2. 网络教育

3. 敏捷制造



四、虚拟现实

五、办公自动化和管理信息系统

六、CAD/CAM/CIMS

七、多媒体技术

八、人工智能

## 2.3 计算机的展望

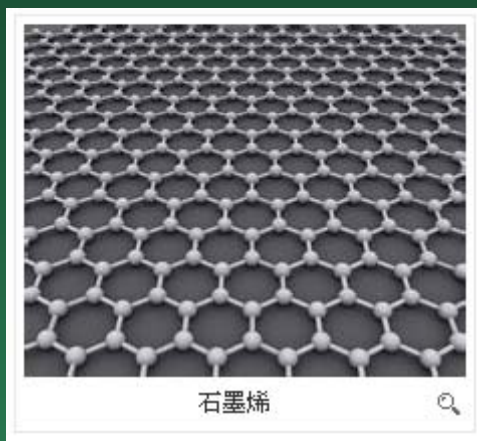
一、计算机具有类似人脑的一些超级智能功能

要求计算机的速度达 $10^{15}$ /秒

二、芯片集成度的提高受以下三方面的限制

- 芯片集成度受物理极限的制约
- 按几何级数递增的制作成本
- 芯片的功耗、散热、线延迟

### 三、？ 替代传统的硅芯片



石墨烯

- 石墨烯不仅是已知材料中最薄的一种，还非常牢固坚硬；作为单质，它在室温下传递电子的速度比已知导体都快。

石墨烯（Graphene）是一种由碳原子构成的单层片状结构的新材料。是一种由碳原子以 $sp^2$ 杂化轨道组成六角型呈蜂巢晶格的平面薄膜，只有一个碳原子厚度的二维材料[1]。石墨烯一直被认为是假设性的结构，无法单独稳定存在[1]，直至2004年，英国曼彻斯特大学物理学家安德烈·海姆和康斯坦丁·诺沃肖洛夫，成功地在实验中从石墨中分离出石墨烯，而证实它可以单独存在，两人也因“在二维石墨烯材料的开创性实验”为由，共同获得2010年诺贝尔物理学奖[2]。

石墨烯目前是最薄也是最坚硬的纳米材料[3]，它几乎是完全透明的，只吸收2.3%的光[4]；导热系数高达 $5300\text{ W/m}\cdot\text{K}$ ，高于碳纳米管和金刚石，常温下其电子迁移率\*超过 $15000\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，又比纳米碳管或硅晶体\*高，而电阻率只约 $10^{-6}\text{ }\Omega\cdot\text{cm}$ ，比铜或银更低，为目前世上电阻率最小的材料[1]。因为它的电阻率极低，电子迁移的速度极快，因此被期待可用来发展出更薄、导电速度更快的新一代电子元件或晶体管。由于石墨烯实质上是一种透明、良好的导体，也适合用来制造透明触控屏幕、光板、甚至是太阳能电池。

## 三、？ 替代传统的硅芯片

### 1. 光计算机

利用光子取代电子进行运算和存储

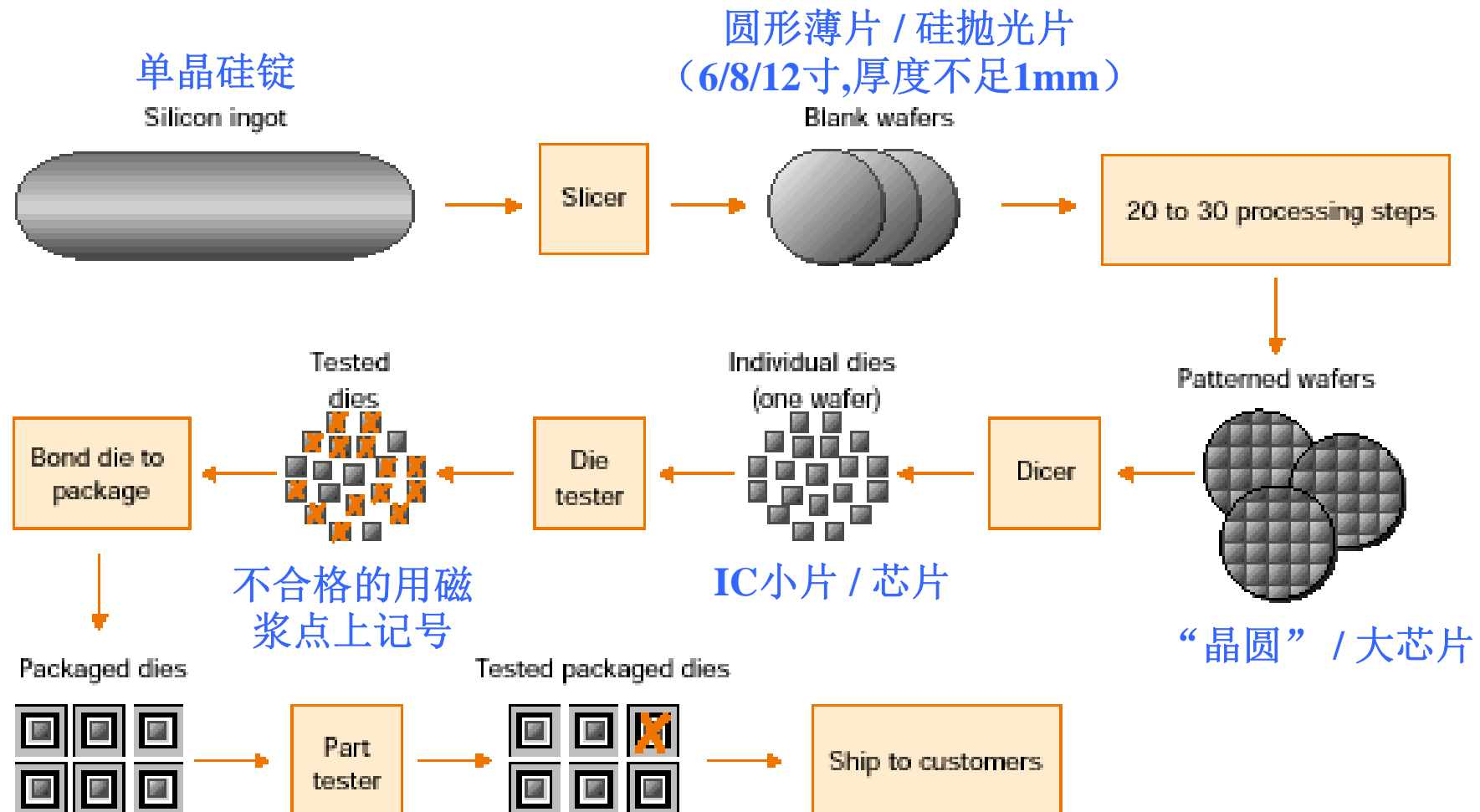
### 2. DNA生物计算机

通过控制DNA分子间的生化反应

### 3. 量子计算机

利用原子所具有的量子特性

# Integrated Circuits manufacturing process



约需**400**多道工序!

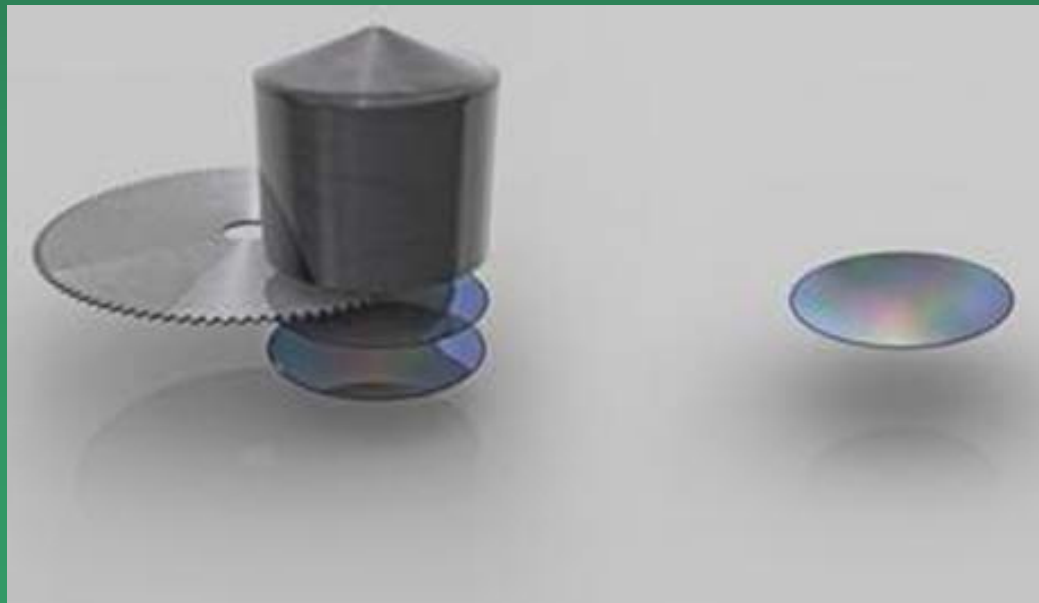
# 计算机芯片的制造过程

- 原料准备：（沙子→硅）：  
脱氧后的沙子(尤其是石英)最多包含25%的硅元素，以二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )的形式存在
- 硅熔炼：通过多步净化得到可用于半导体制造质量的硅，学名电子级硅(EGS)，平均每  
一百万个硅原子中最多只有一个杂质原子。
  - ◆ 单晶硅锭：整体基本呈圆柱形，  
重约100千克，硅纯度99.9999%。
  - ◆ 横截面直径：300mm、200mm



# 计算机芯片的制造过程

- 硅锭切割：横向切割成圆形的单个硅片，也就是晶圆 (Wafer)
- 晶圆：切割出的晶圆经过抛光后变得几乎完美无瑕。
  - ◆ Intel自己并不生产这种晶圆，而是从第三方半导体企业那里直接购买成品，然后利用自己的生产线进一步加工，(如现在主流的45nm HKMG(高K金属栅极))。





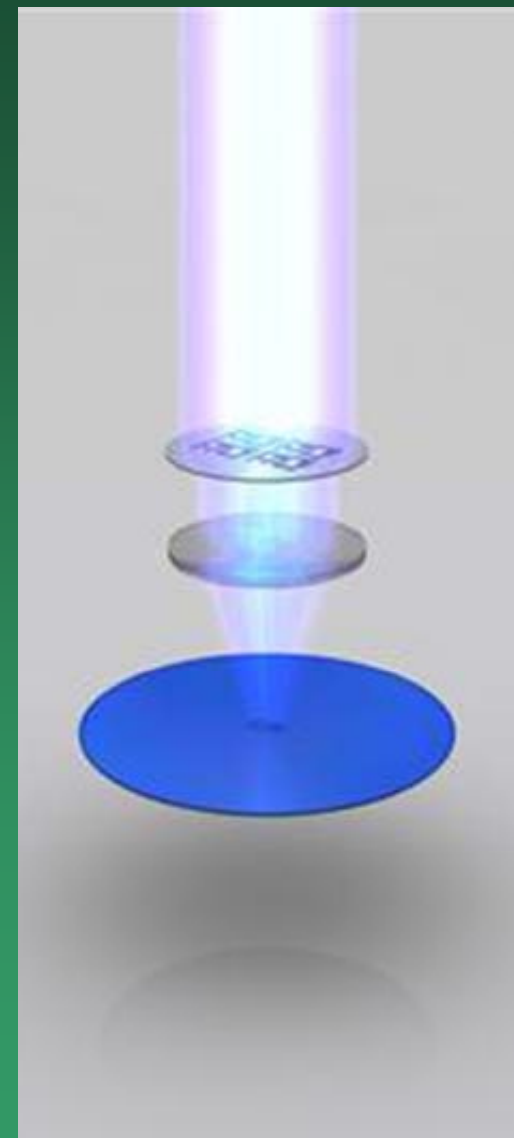
# 计算机芯片的制造过程

- 光刻胶(Photo Resist):  
图中蓝色部分就是在晶圆旋转过程中浇上去的光刻胶液体，类似制作传统胶片的那种。晶圆旋转可以让光刻胶铺的非常薄、非常平。



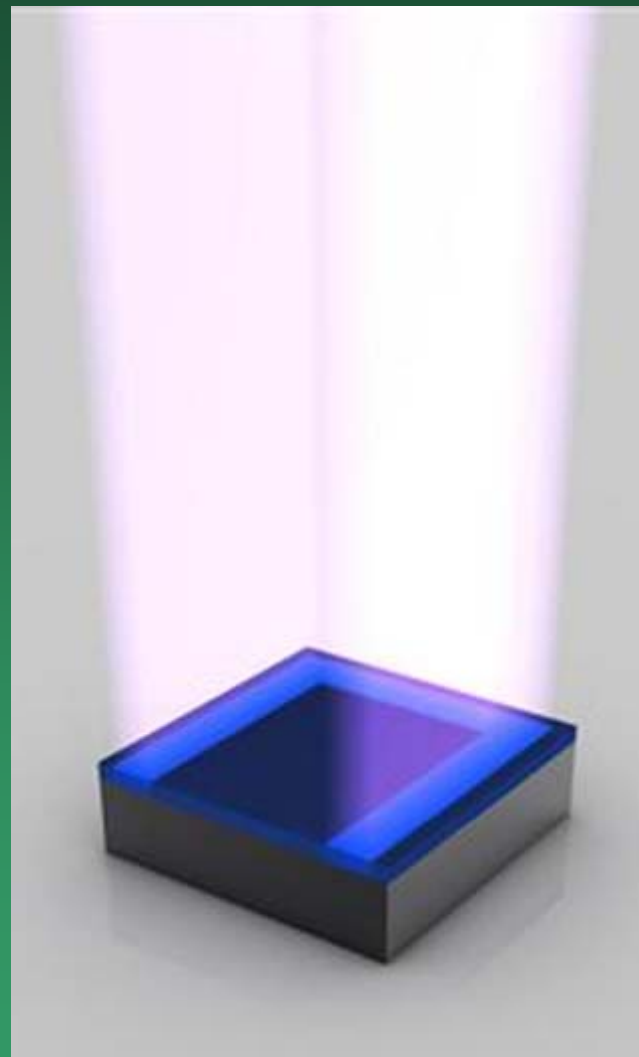
# 计算机芯片的制造过程

- 光刻：光刻胶层随后透过掩模(Mask)被曝光在紫外线(UV)之下，变得可溶，期间发生的化学反应类似按下机械相机快门那一刻胶片的变化。掩模上印着预先设计好的电路图案，紫外线透过它照在光刻胶层上，就会形成微处理器的每一层电路图案。一般来说，在晶圆上得到的电路图案是掩模上图案的四分之一。



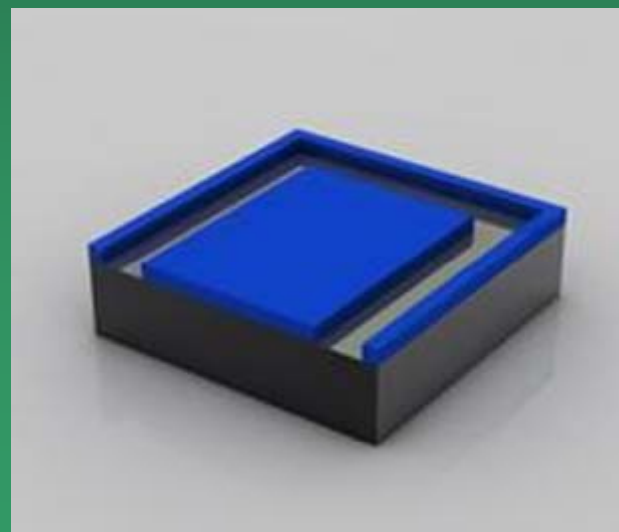
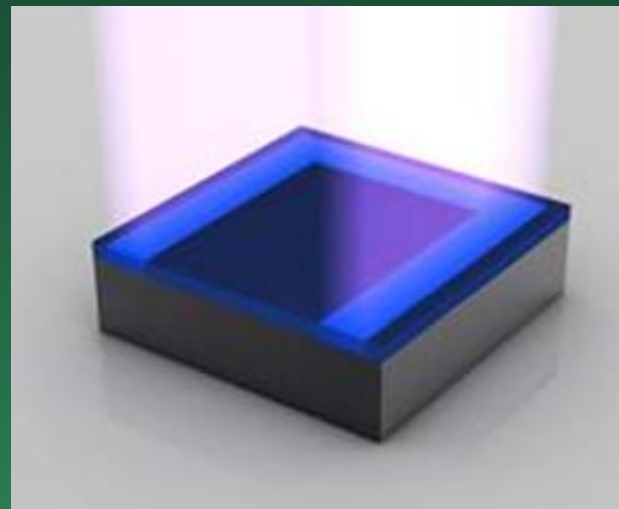
# 计算机芯片的制造过程

- 光刻：由此进入50-200纳米尺寸的晶体管级别。一块晶圆上可以切割出数百个处理器，不过从这里开始把视野缩小到其中一个上，展示如何制作晶体管等部件。晶体管相当于开关，控制着电流的方向。现在的晶体管已经如此之小，一个针头上就能放下大约3000万个。



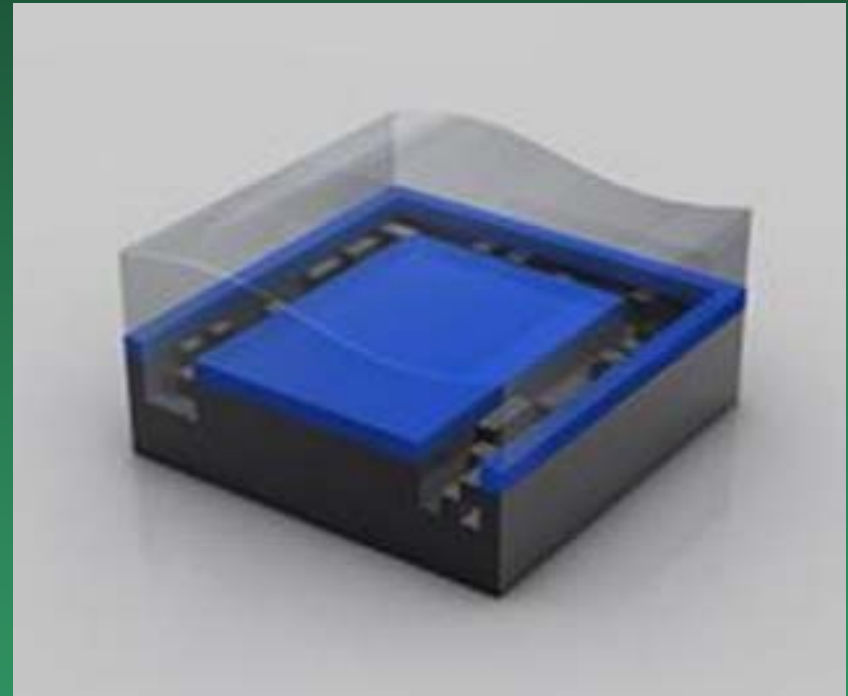
# 计算机芯片的制造过程

- 溶解光刻胶：光刻过程中曝光在紫外线下，光刻胶被溶解掉，清除后留下的图案和掩模上的一致。



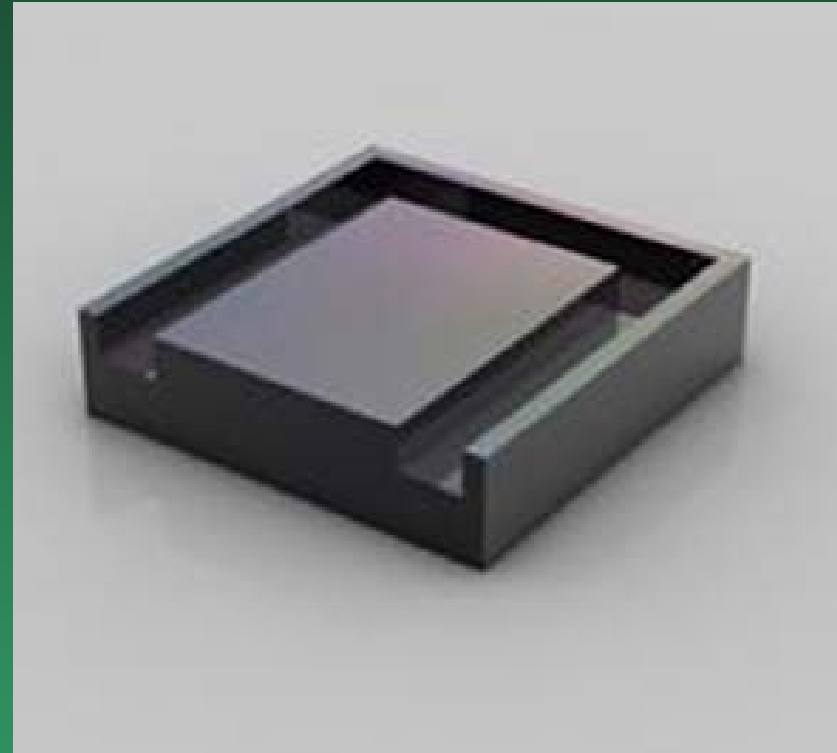
# 计算机芯片的制造过程

- 蚀刻：使用化学物质溶解掉暴露出来的晶圆部分，而剩下的光刻胶保护着不应该蚀刻的部分。



# 计算机芯片的制造过程

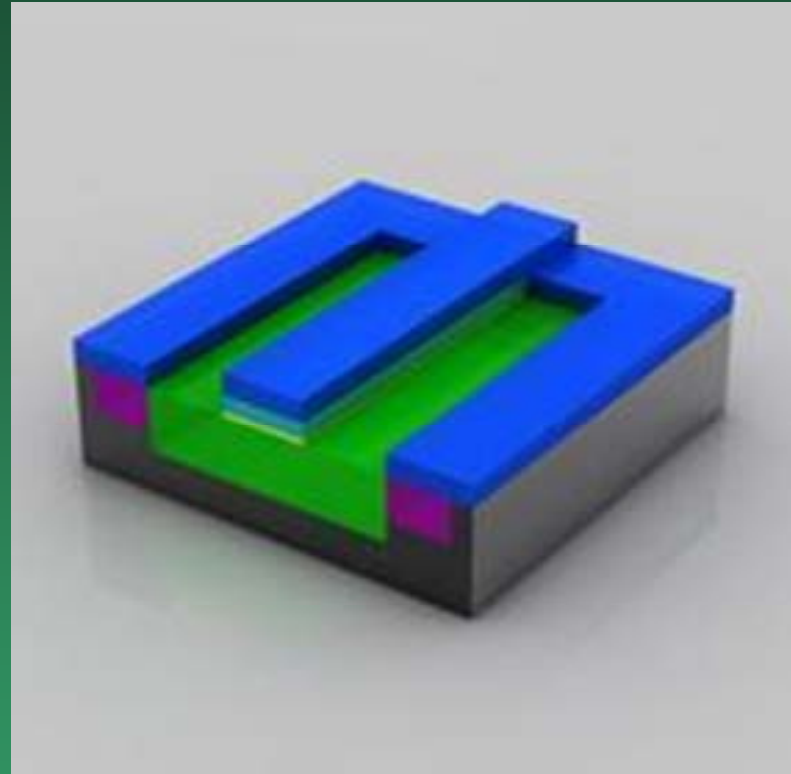
- 清除光刻胶：  
蚀刻完成后，  
光刻胶的使命  
宣告完成，全  
部清除后就可  
以看到设计好  
的电路图案。





# 计算机芯片的制造过程

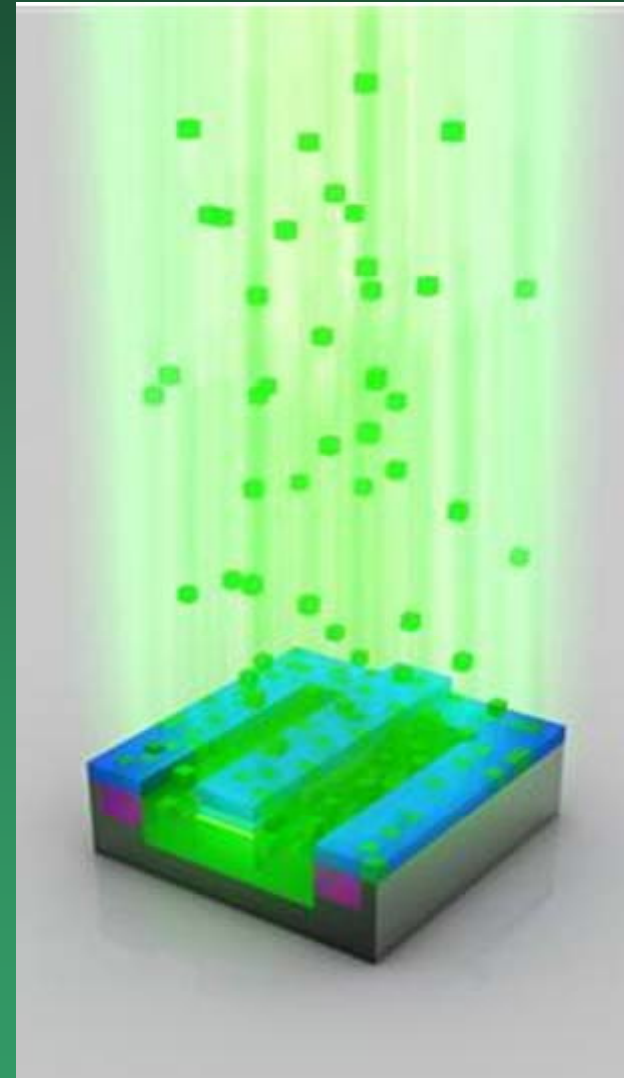
- 光刻胶：再次浇上光刻胶(蓝色部分)，然后光刻，并洗掉曝光的部分，剩下的光刻胶还是用来保护不会离子注入的那部分材料。



# 计算机芯片的制造过程

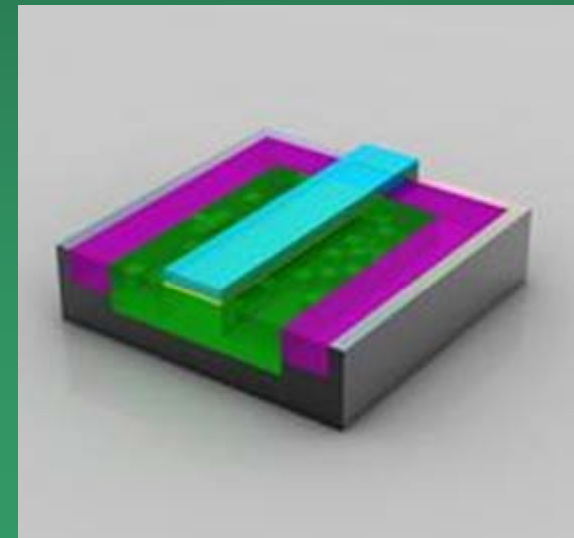
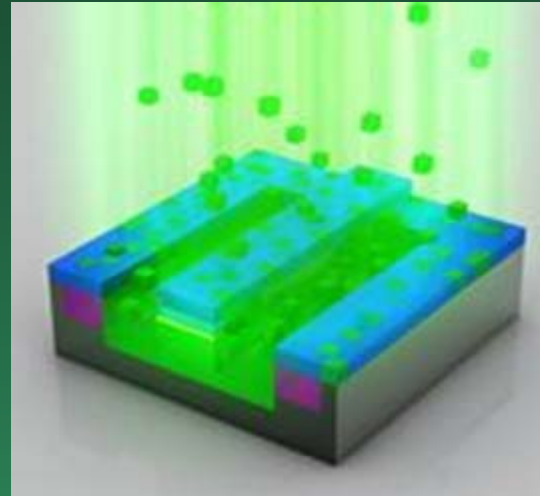
- 离子注入

(Ion Implantation): 在真空系统中，用经过加速的、要掺杂的原子的离子照射(注入)固体材料，从而在被注入的区域形成特殊的注入层，并改变这些区域的硅的导电性。经过电场加速后，注入的离子流的速度可以超过30万千米每小时。



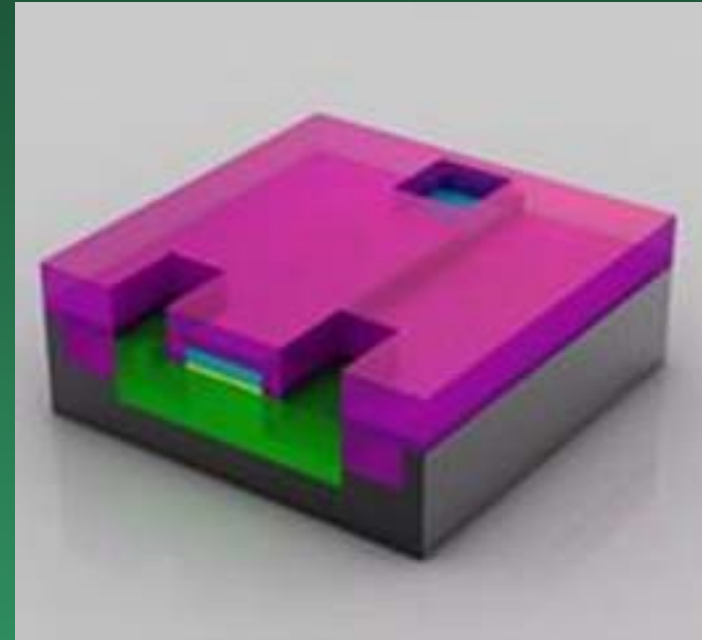
# 计算机芯片的制造过程

- 清除光刻胶：离子注入完成后，光刻胶也被清除，而注入区域(绿色部分)也已掺杂，注入了不同的原子。注意这时候的绿色和之前已经有所不同。



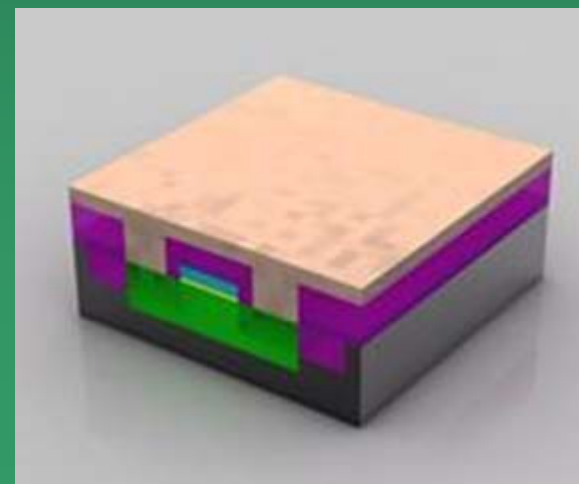
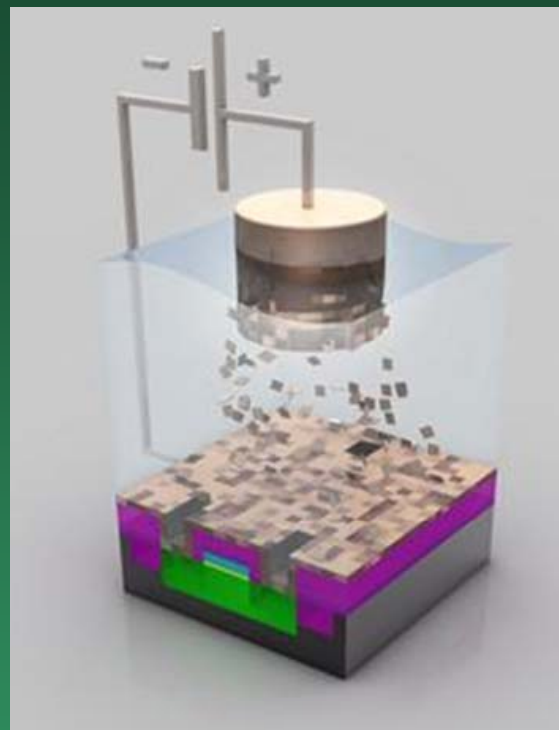
# 计算机芯片的制造过程

- 晶体管就绪：至此，晶体管已经基本完成。在绝缘材(品红色)上蚀刻出三个孔洞，并填充铜，以便和其它晶体管互连。



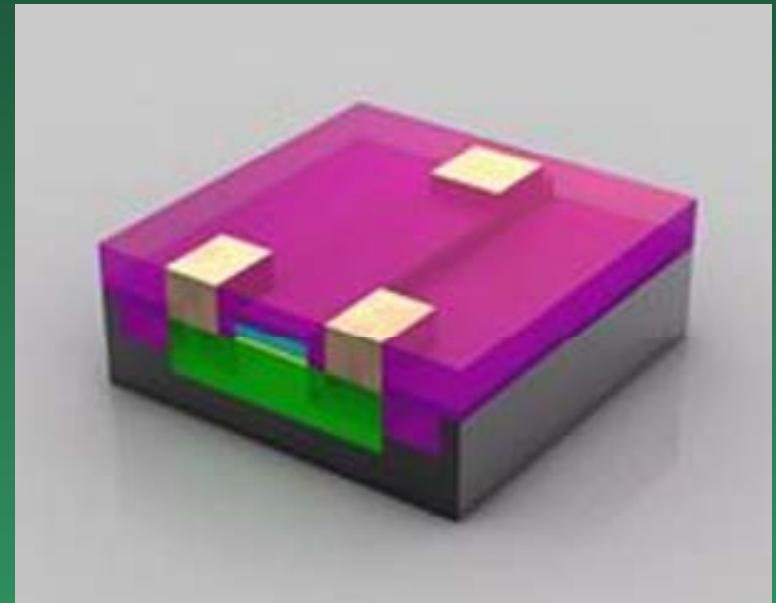
# 计算机芯片的制造过程

- 电镀：在晶圆上电镀一层硫酸铜，将铜离子沉淀到晶体管上。铜离子会从正极(阳极)走向负极(阴极)。
- 铜层：电镀完成后，铜离子沉积在晶圆表面，形成一个薄薄的铜层。



# 计算机芯片的制造过程

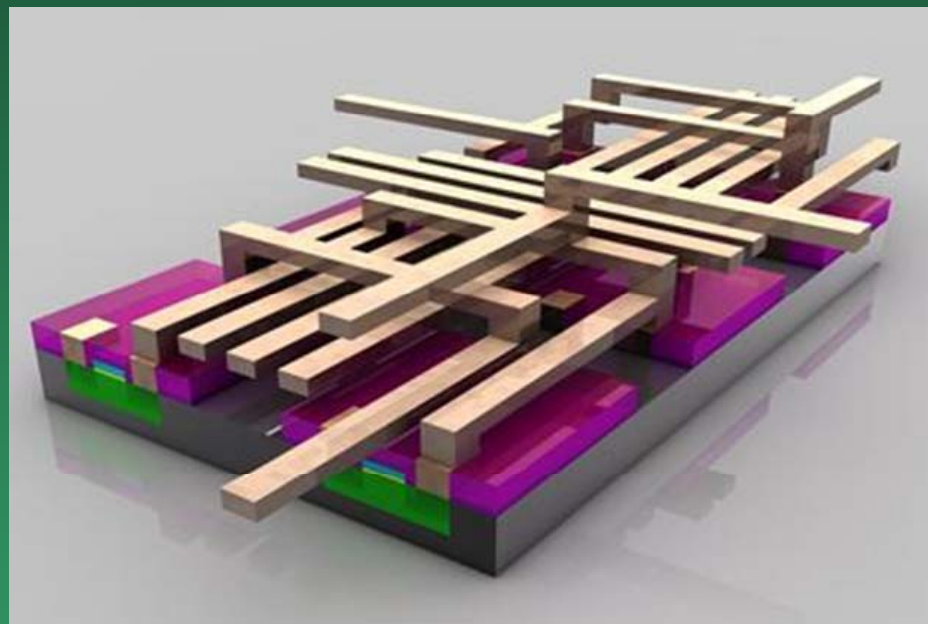
- 抛光：将多余的铜抛光掉，也就是磨光晶圆表面。





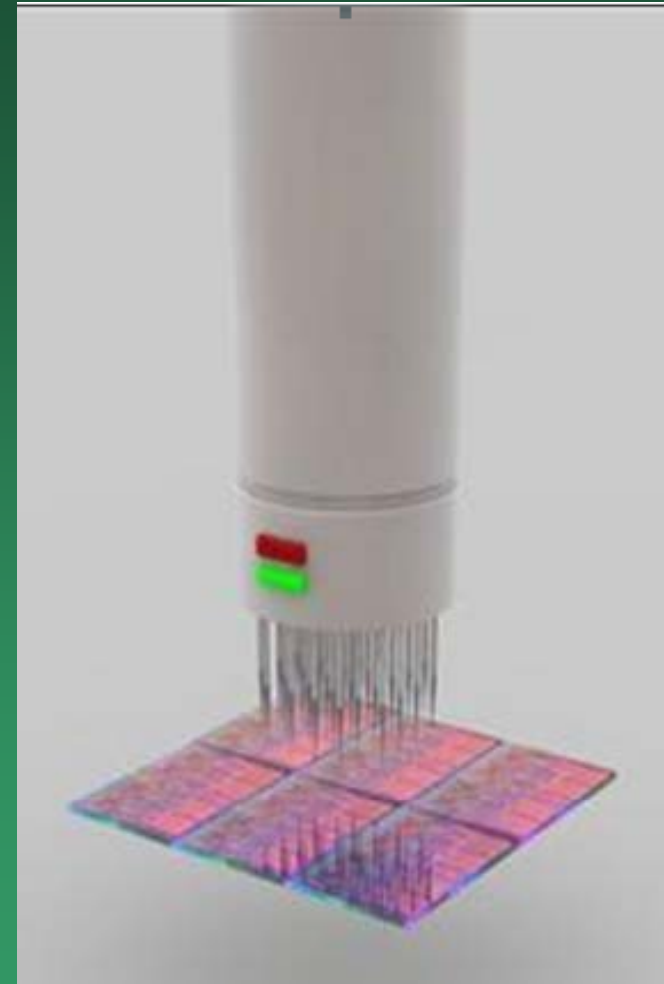
# 计算机芯片的制造过程

- 金属层：晶体管级别，六个晶体管的组合，大约500纳米。在不同晶体管之间形成复合互连金属层，具体布局取决于相应处理器所需要的不同功能性。芯片表面看起来异常平滑，但事实上可能包含20多层复杂的电路，放大之后可以看到极其复杂的电路网络，形如未来派的多层高速公路系统。



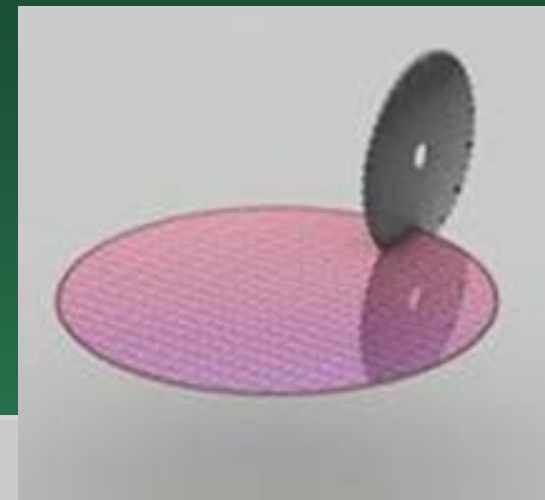
# 计算机芯片的制造过程

- 晶圆测试：内核级别，大约10毫米/0.5英寸。图中是晶圆的局部，正在接受第一次功能性测试，使用参考电路图案和每一块芯片进行对比。



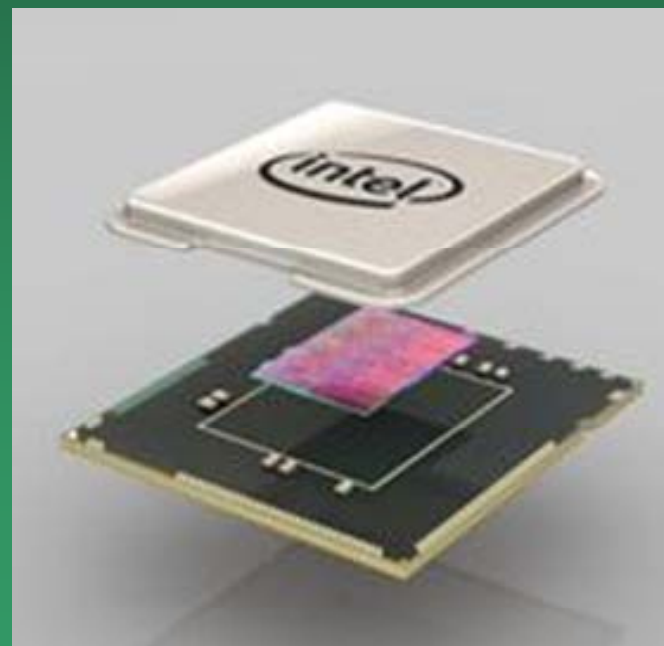
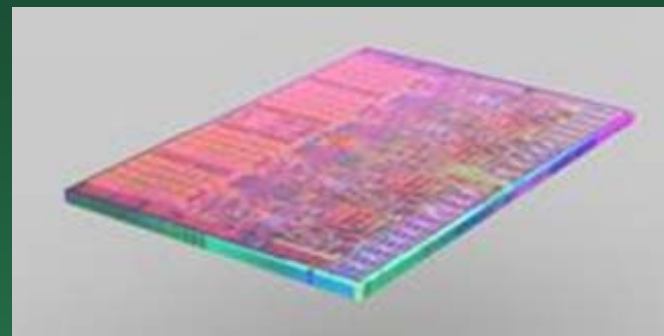
# 计算机芯片的制造过程

- 晶圆切片(Slicing): 晶圆级别, 300毫米/12英寸。将晶圆切割成块, 每一块就是一个小晶块 (Die) (或称单晶片、晶粒, 处理器核心)。
- 丢弃瑕疵内核: 晶圆级别。测试过程中发现的有瑕疵的内核被抛弃, 留下完好的准备进入下一步。



# 计算机芯片的制造过程

- 单个内核：内核级别。从晶圆上切割下来的单个内核，这里展示的是Core i7的核心。
- 封装：封装级别，20毫米/1英寸。衬底(基片)、内核、散热片堆叠在一起，就形成了我们看到的处理器的样子。衬底(绿色)相当于一个底座，并为处理器内核提供电气与机械界面，便于与PC系统的其它部分交互。散热片(银色)就是负责内核散热的了。



# 计算机芯片的制造过程

- 处理器：至此就得到完整的处理器了(这里是一颗Core i7)。这种在世界上最干净的房间里制造出来的最复杂的产品实际上是经过数百个步骤得来的，这里只是展示了其中的一些关键步骤。



# 计算机芯片的制造过程

- 等级测试：最后一次测试，可以鉴别出每一颗处理器的关键特性，比如最高频率、功耗、发热量等，并决定处理器的等级，比如适合做成最高端的Core i7-975 Extreme，还是低端型号Core i7-920。



# 计算机芯片的制造过程

- 装箱：根据等级测试结果将同样级别的处理器放在一起装运。
- 零售包装：制造、测试完毕的处理器要么批量交付给OEM厂商，要么放在包装盒里进入零售市场。

