



# 计算机组织与体系结构

## Computer Architectures

陆俊林

北京大学本科生主干基础课

## 第六讲 数字电路设计

### 本讲要点

首先简要介绍用电路进行运算的数学基础，其次讲解晶体管和基本的门电路，然后分析时钟和触发器的实现，最后介绍集成电路的制造过程。

阅读教材“COD”：B.1-B.4， B.7-B.9

# 主要内容

通过学习本课程  
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法



I 运算电路的数学基础

II 晶体管和门电路

III 时钟和触发器

IV 集成电路的制造过程

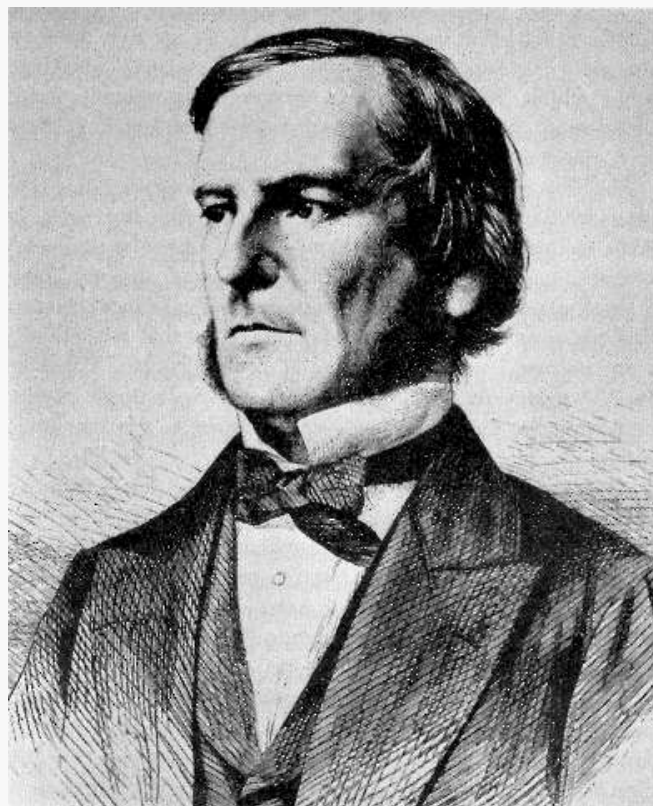




# 几位重要的人物



戈特弗里德·威廉·**莱布尼兹**  
Gottfried Wilhelm Leibniz  
1646年~1716年



乔治·**布尔**  
George Boole  
1815年~1864年

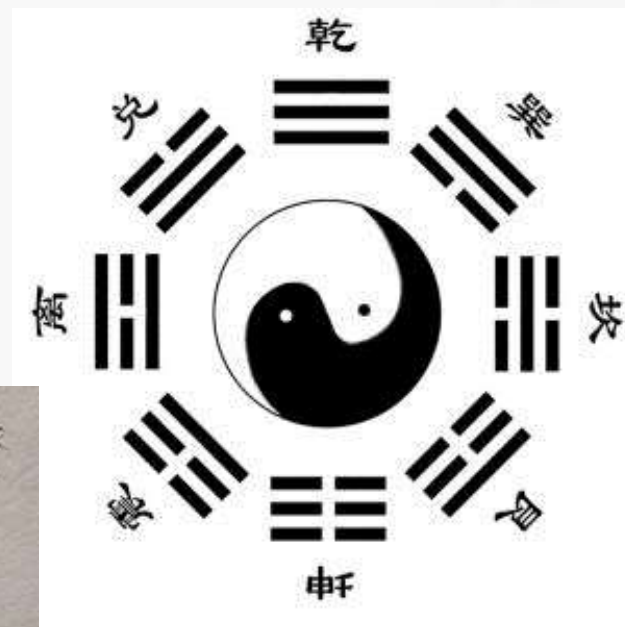
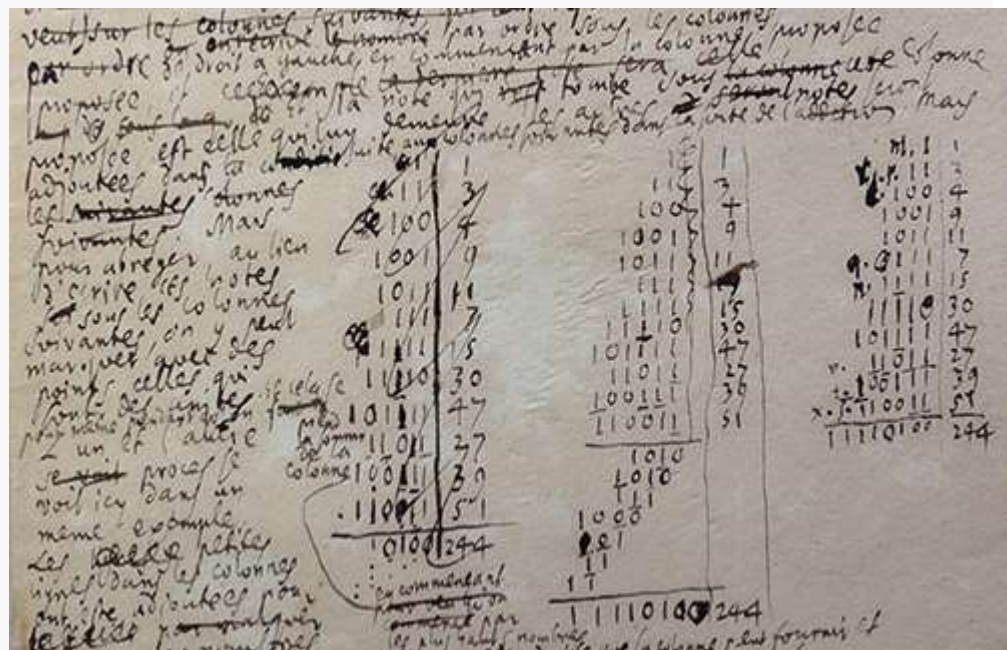


克劳德·艾尔伍德·**香农**  
Claude Elwood Shannon  
1916年~2001年

# 莱布尼兹和二进制



戈特弗里德·威廉·莱布尼兹  
Gottfried Wilhelm Leibniz  
1646年~1716年





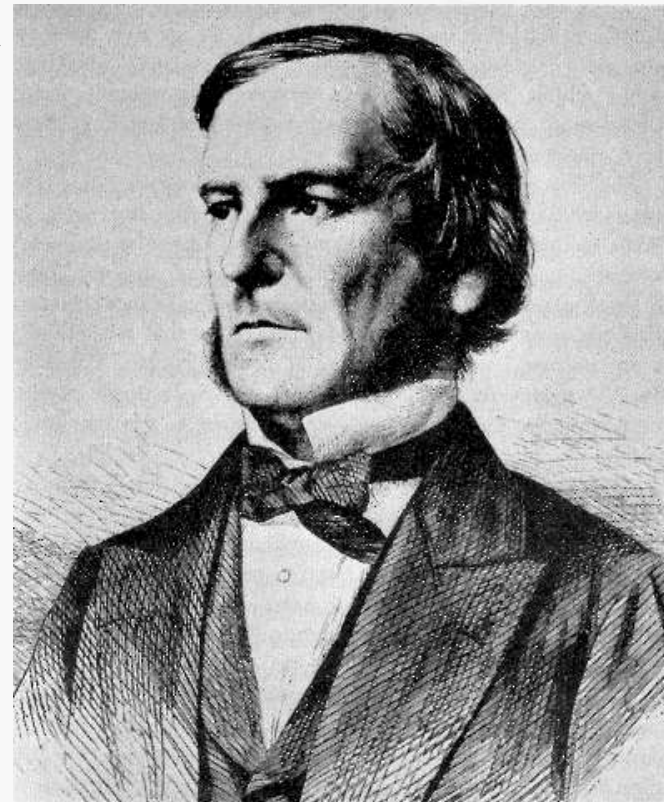
# 布尔和布尔代数

## 🕒 1854年，代表作《The Laws of Thought》

- 全名：《An Investigation of the Laws of Thought on Which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities》

## 🕒 布尔代数的基本思想

- 两个元素：真，假
- 三种运算：与，或，非
  - 这三种运算又都可以转换成“与非”或者“或非”运算

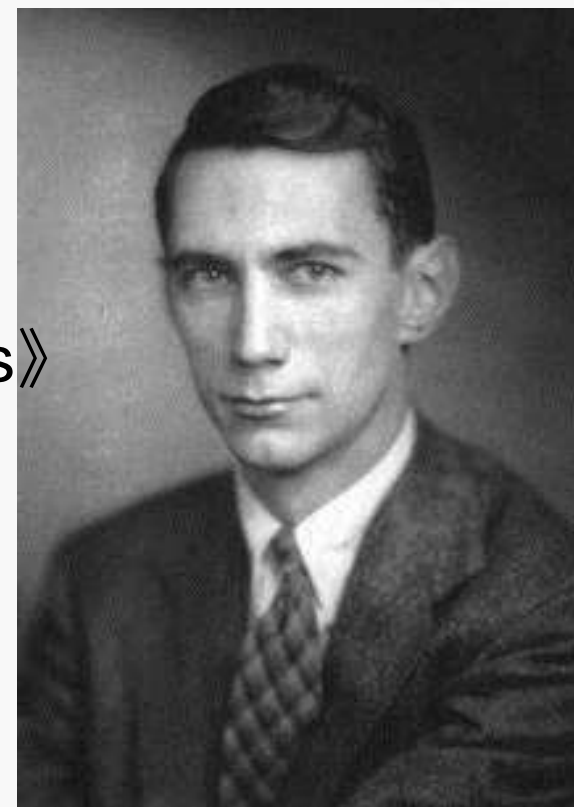


乔治·布尔  
George Boole  
1815年~1864年

# 香农和开关电路



- ④ 1932，进入密歇根大学
  - 学习了布尔代数
- ④ 1937年，麻省理工学院，完成硕士论文
  - 《A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits》
  - “可能是本世纪最重要、最著名的硕士学位论文”
- ④ 主要贡献
  - 用电子开关来模拟布尔逻辑运算
  - 建立了数字电路设计的理论基础
  - 形成现代电子计算机的基本思路



克劳德·艾尔伍德·香农  
Claude Elwood Shannon  
1916年~2001年

# 主要内容

通过学习本课程  
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法

I 运算电路的数学基础



II 晶体管和门电路

III 时钟和触发器

IV 集成电路的制造过程

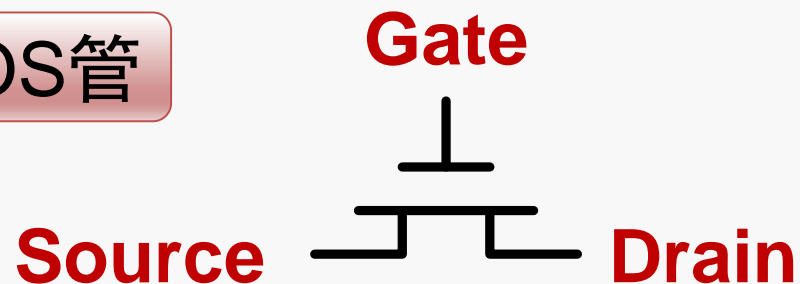




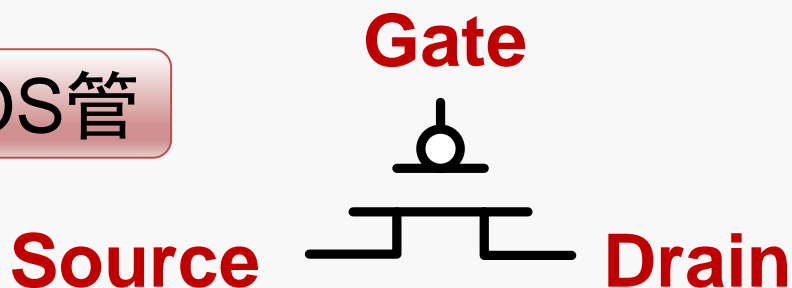
# 晶体管 (transistor)

- 现代集成电路中通常使用MOS晶体管
  - M**etal-**O**xide-**S**emiconductor: 金属-氧化物-半导体
- CMOS集成电路 (Complementary MOS)
  - 由PMOS和NMOS共同构成的互补型MOS集成电路

N型MOS管

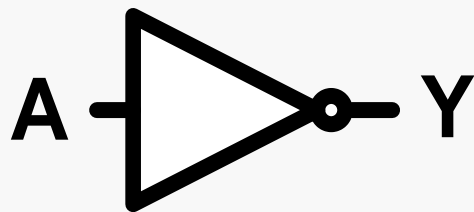


P型MOS管



# 非门 (NOT gate)

逻辑  
符号

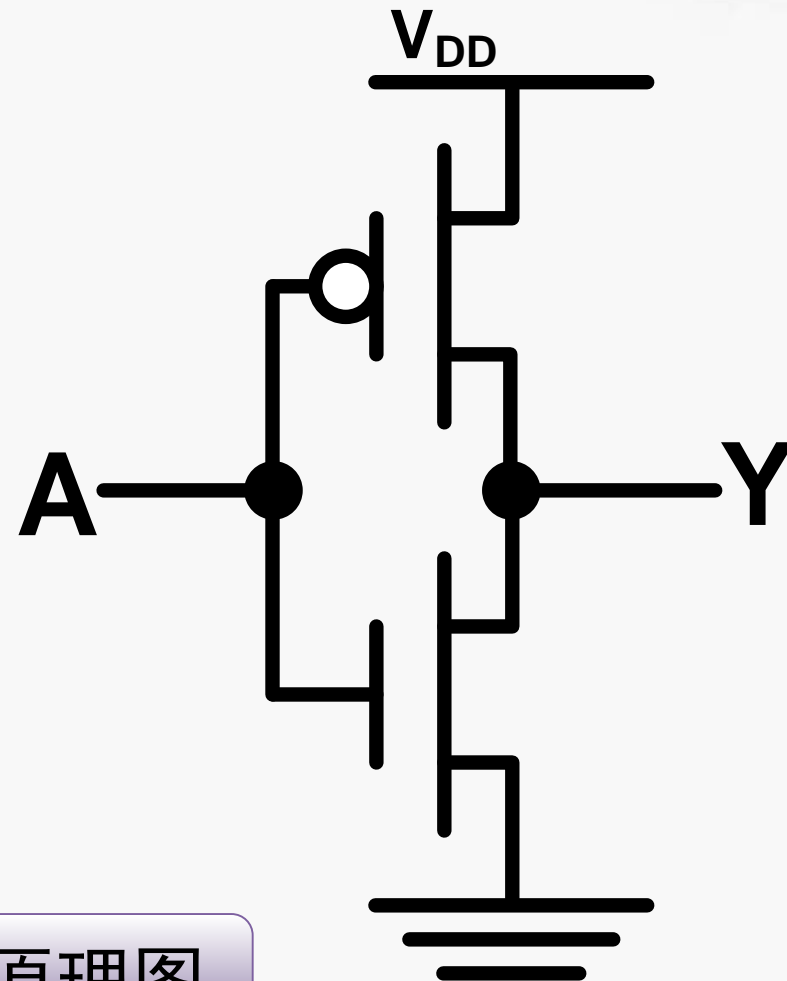


真  
值  
表

输入A	输出Y
0	1
1	0

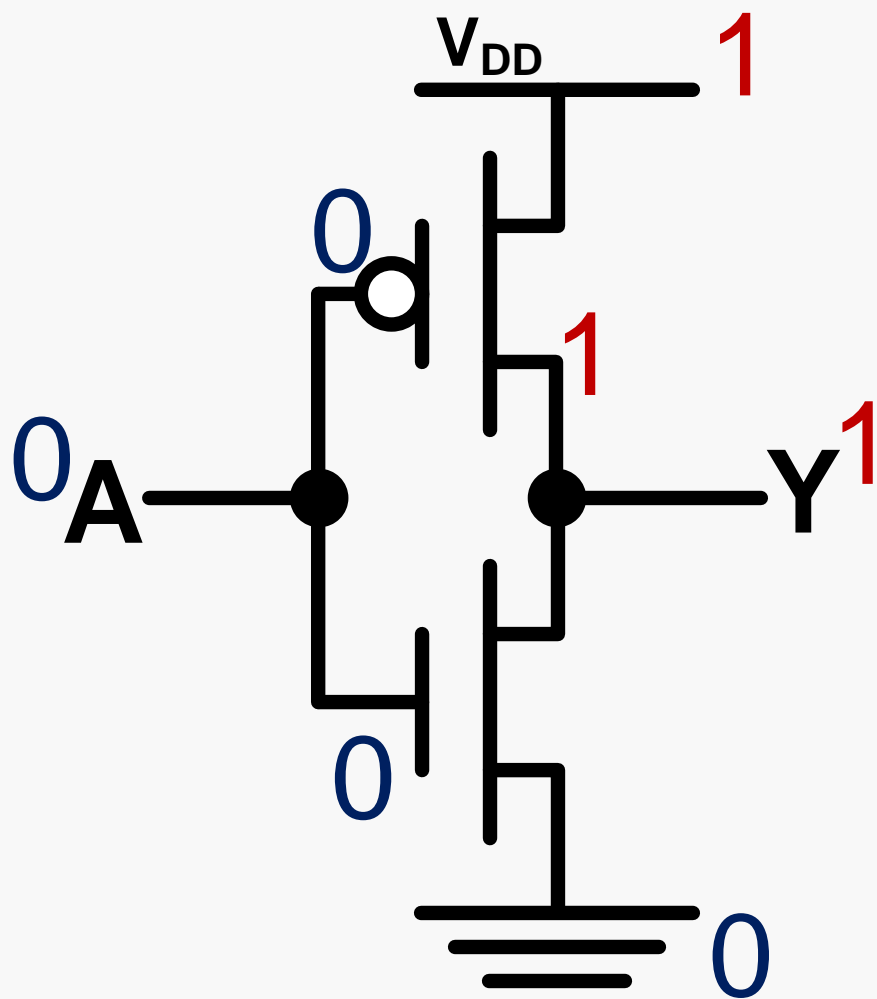
逻辑  
函数  
表示

$$Y = \overline{A}$$

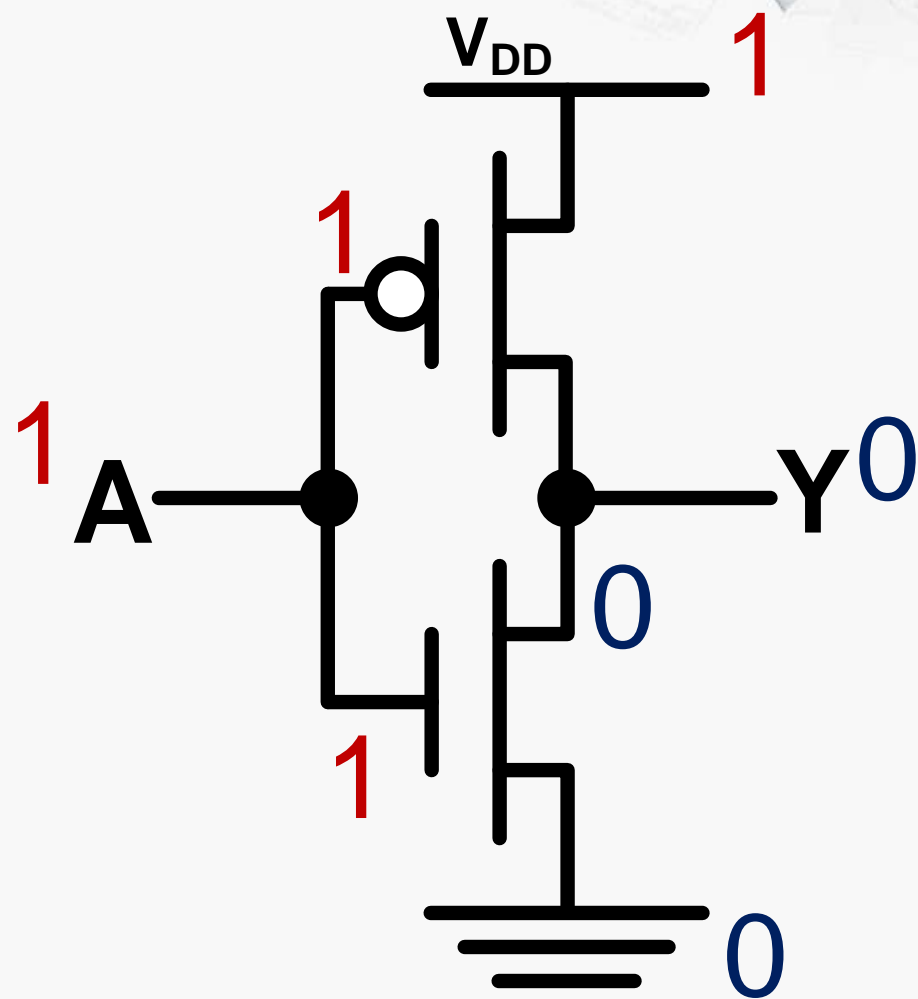


非门原理图

# 非门的工作过程示例



$A=0 \rightarrow Y=1$

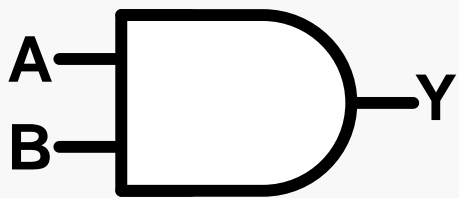


$A=1 \rightarrow Y=0$



# 与门 (AND gate)

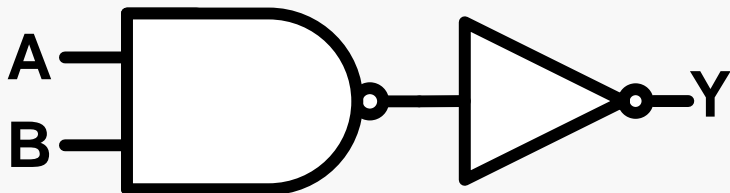
逻辑  
符号



逻辑函数表示  
 $Y = A \cdot B$

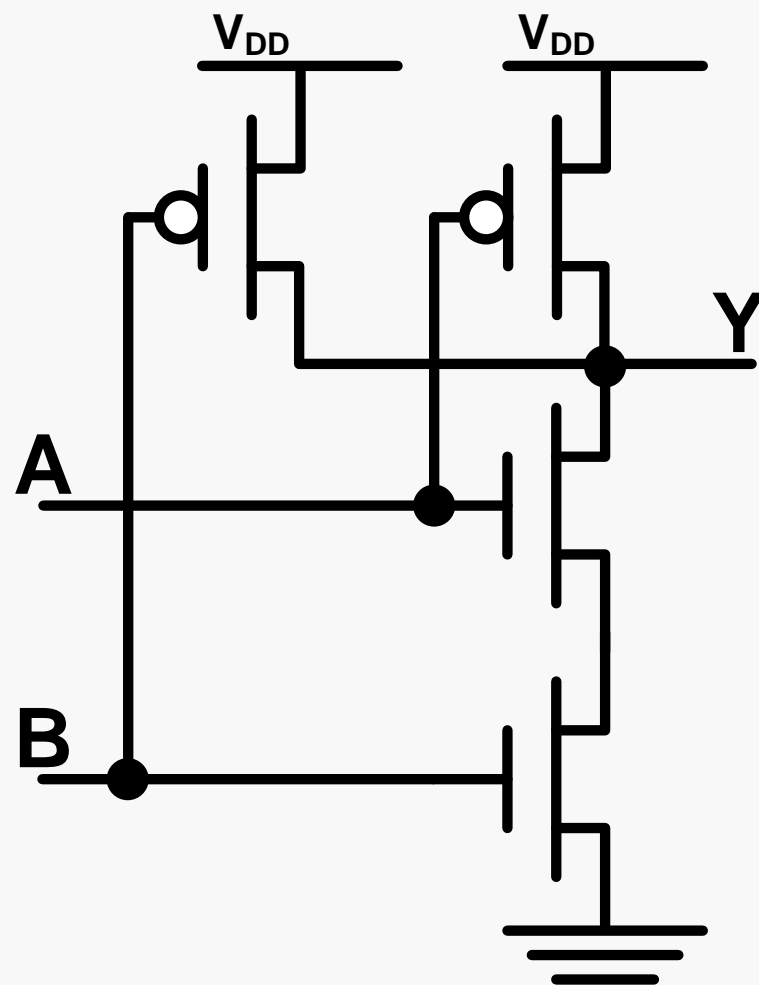
真  
值  
表

输入A	输入B	输出Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

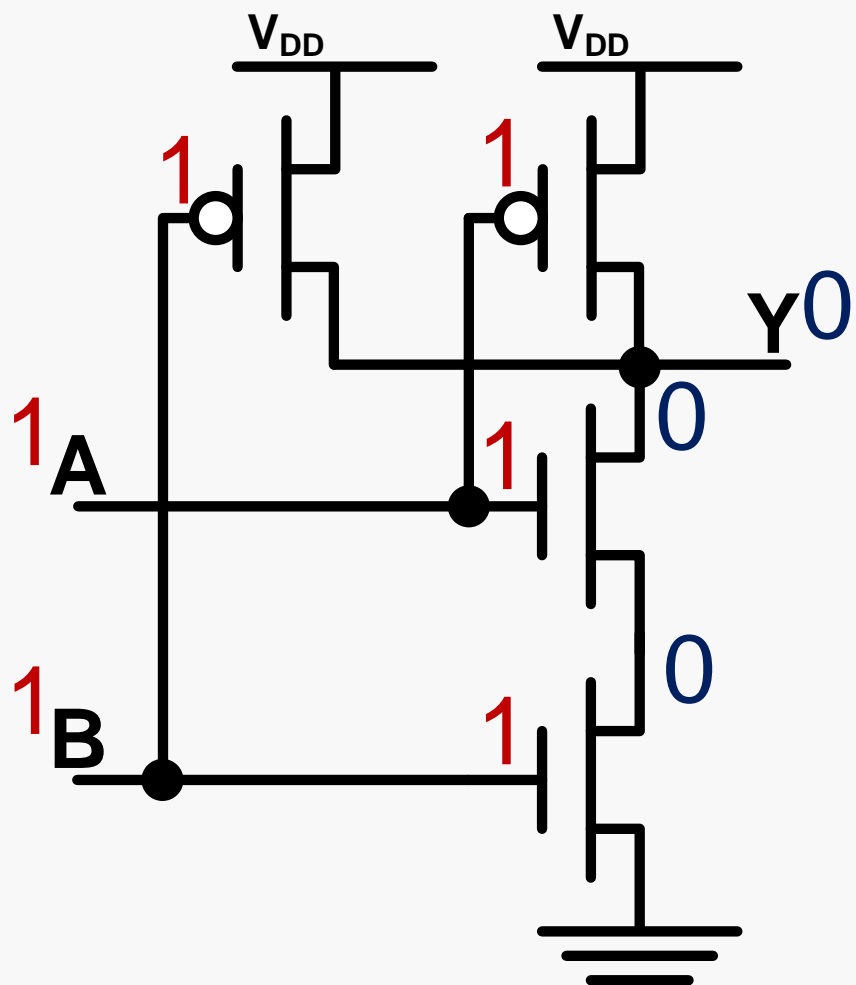


(实际用“与非门”和“非门”实现“与门”)

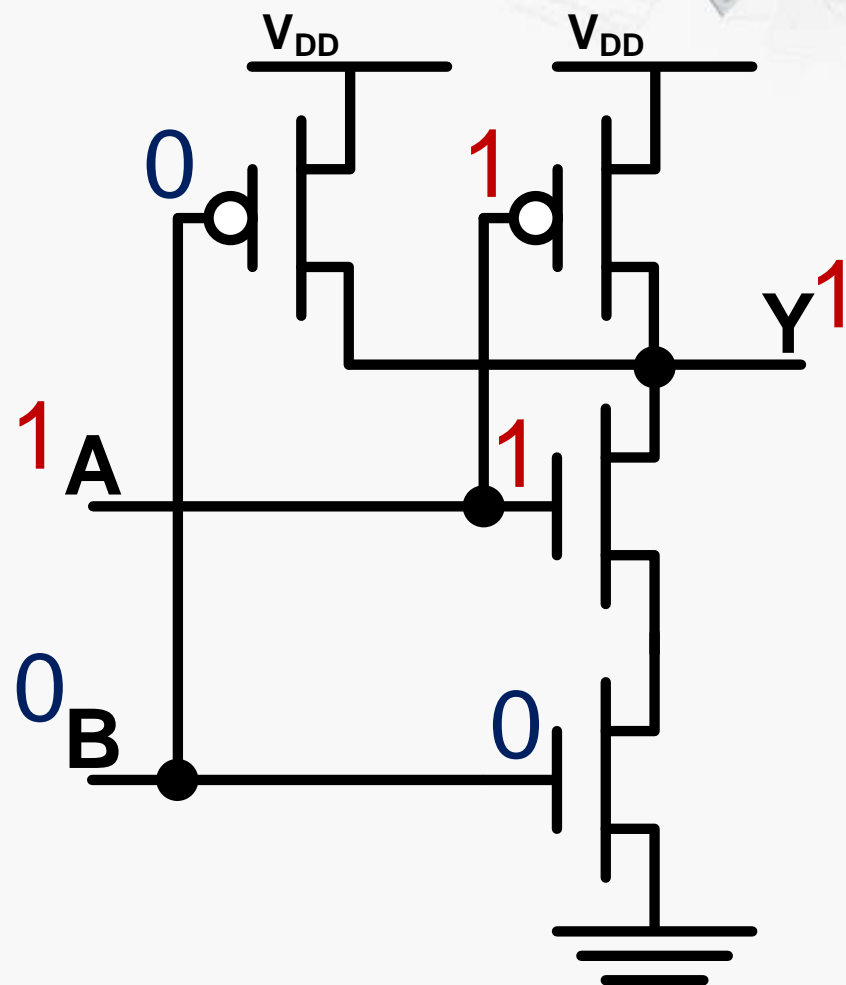
与非门原理图



# 与非门的工作过程示例



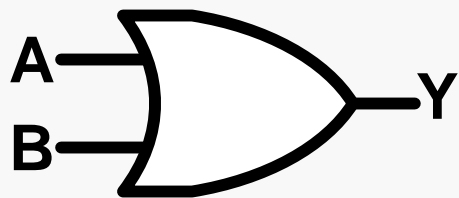
$A=1, B=1 \rightarrow Y=0$



$A=1, B=0 \rightarrow Y=1$

# 或门 (OR gate)

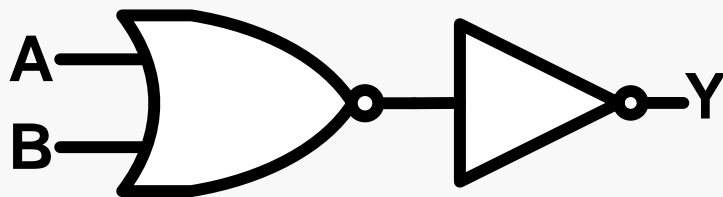
逻辑  
符号



逻辑函数表示  
 $Y=A+B$

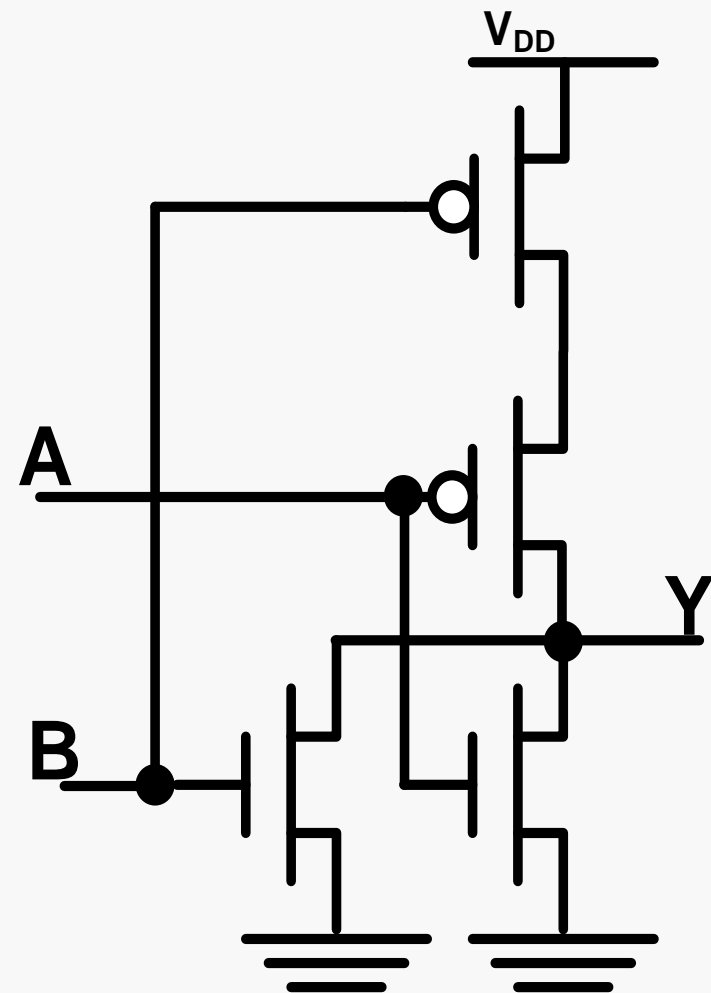
真  
值  
表

输入A	输入B	输出Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1



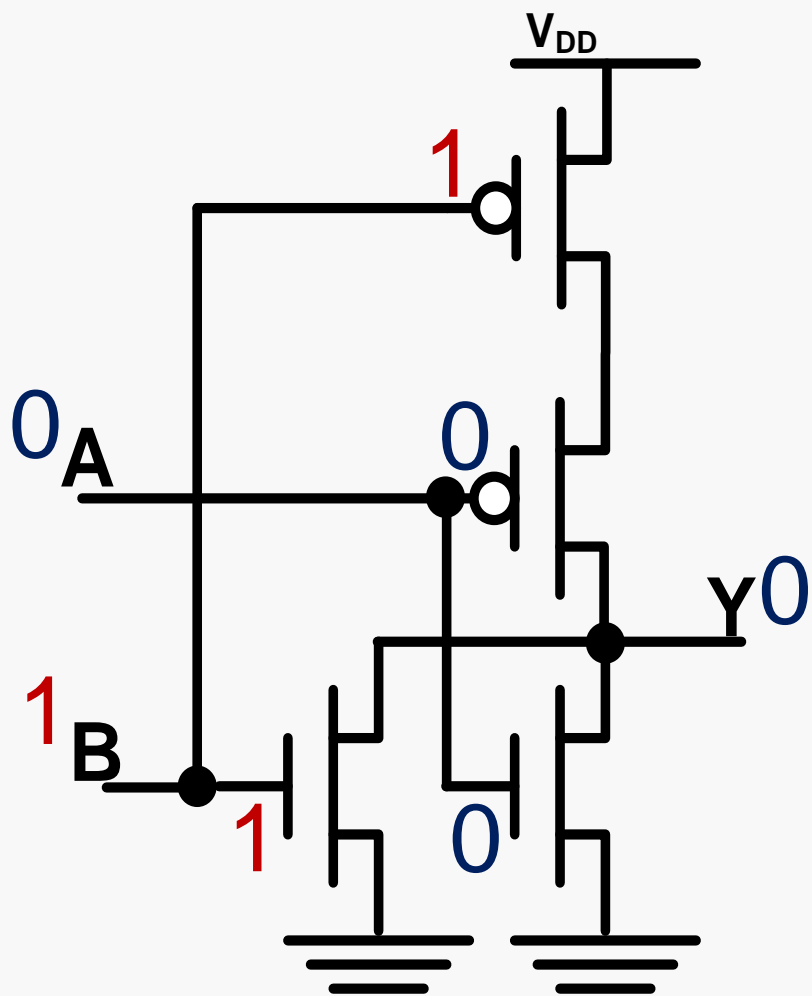
(实际用“或非门”和“非门”实现“或门”)

或非门原理图

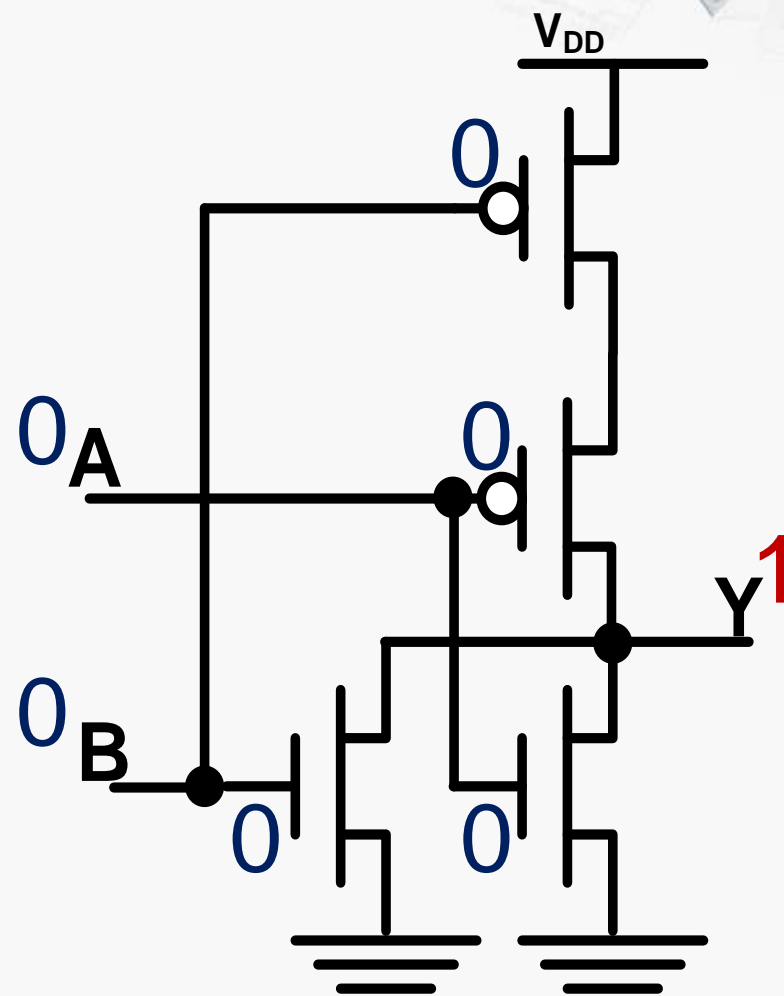




# 或非门的工作过程示例



$A=0, B=1 \rightarrow Y=0$

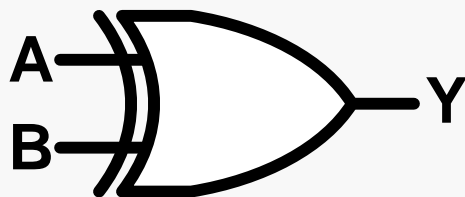


$A=0, B=0 \rightarrow Y=1$

# 异或门 (Exclusive-OR gate, XOR gate)

- 异或运算：  $A \oplus B = \overline{A} \cdot B + (A \cdot \overline{B})$ 
  - 两个值不相同，则异或结果为真。反之，为假。

逻辑  
符号



真值表

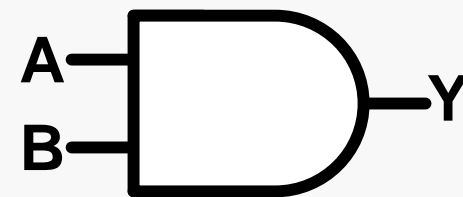
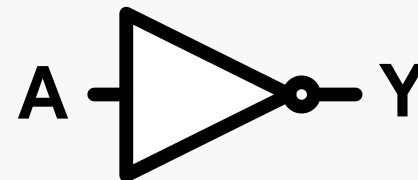
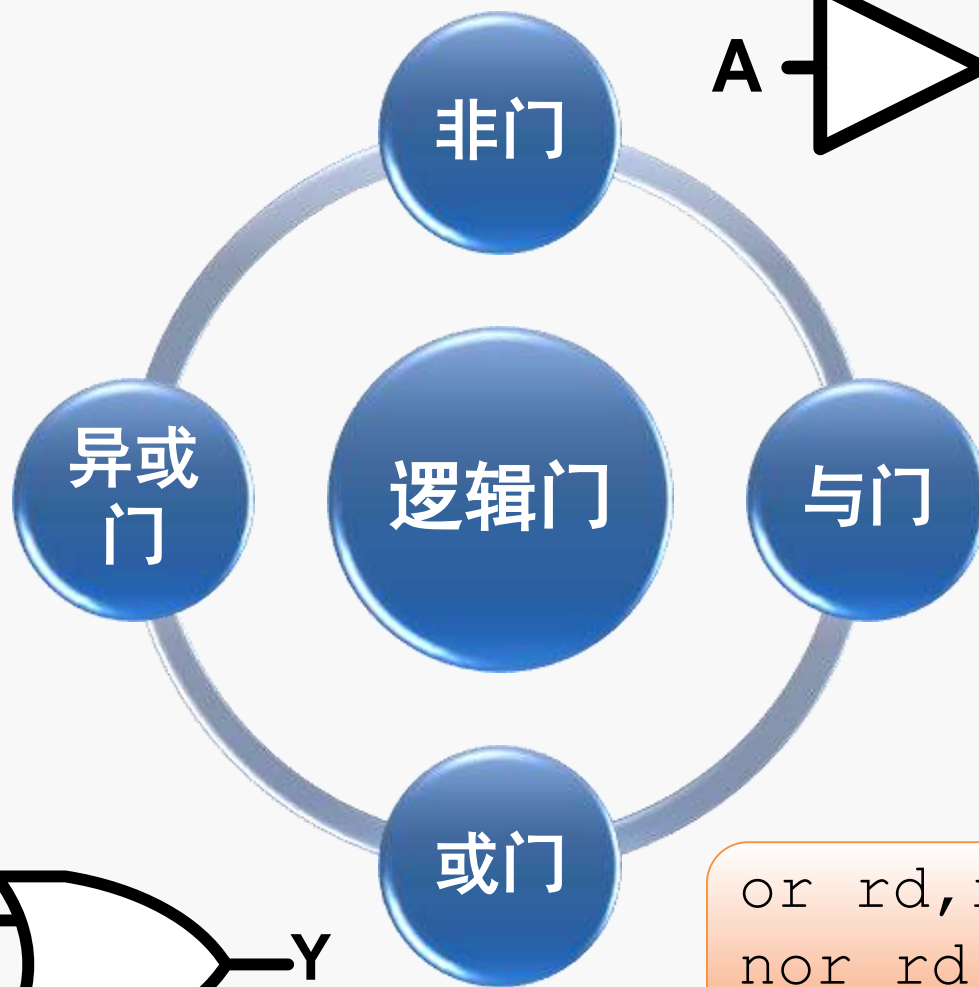
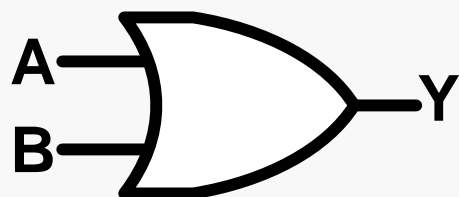
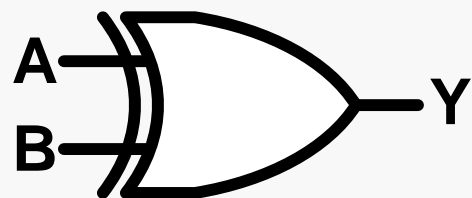
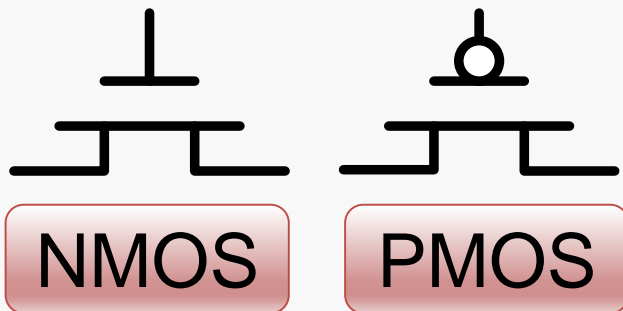
输入A	输入B	输出Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

逻辑函数表示

$$Y = A \oplus B$$

$$Y = A \wedge B$$

# 小结：晶体管、逻辑门



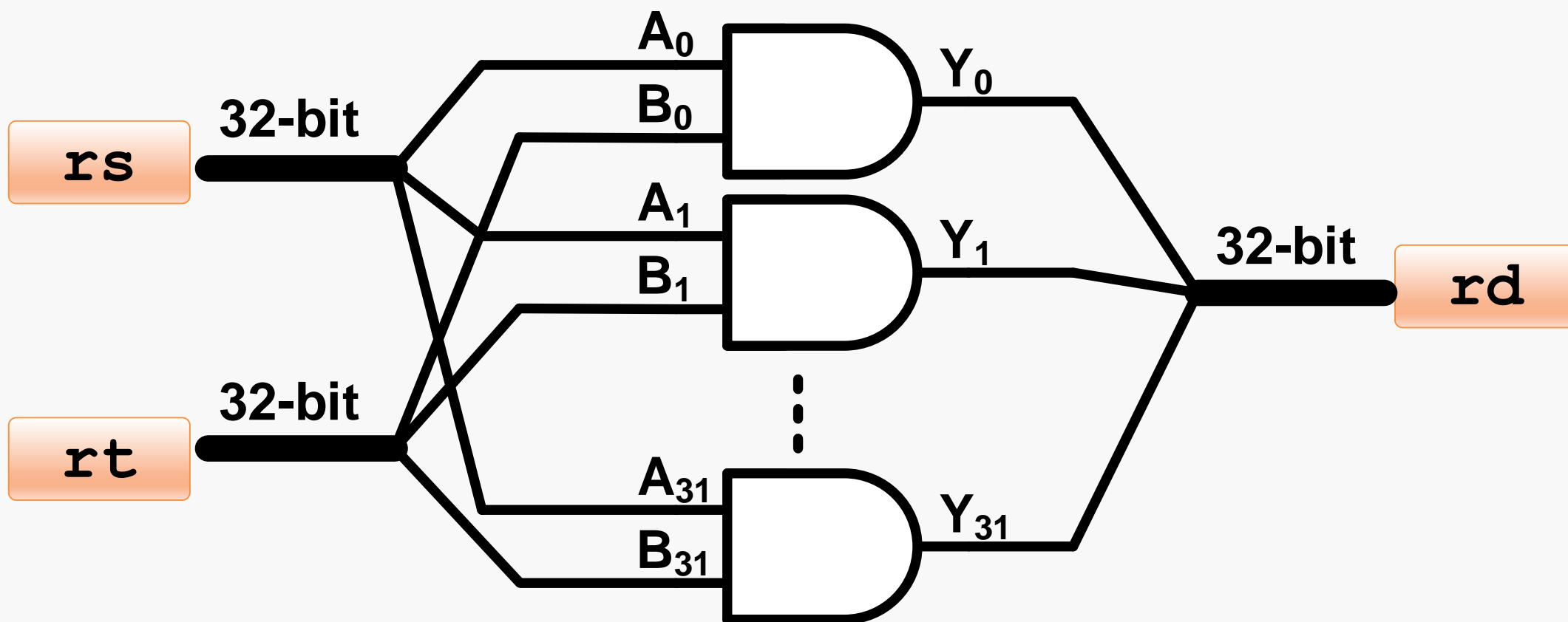
```
and rd,rs,rt  
andi rt,rs,imm
```

```
or rd,rs,rt  
nor rd,rs,rt  
ori rt,rs,imm
```



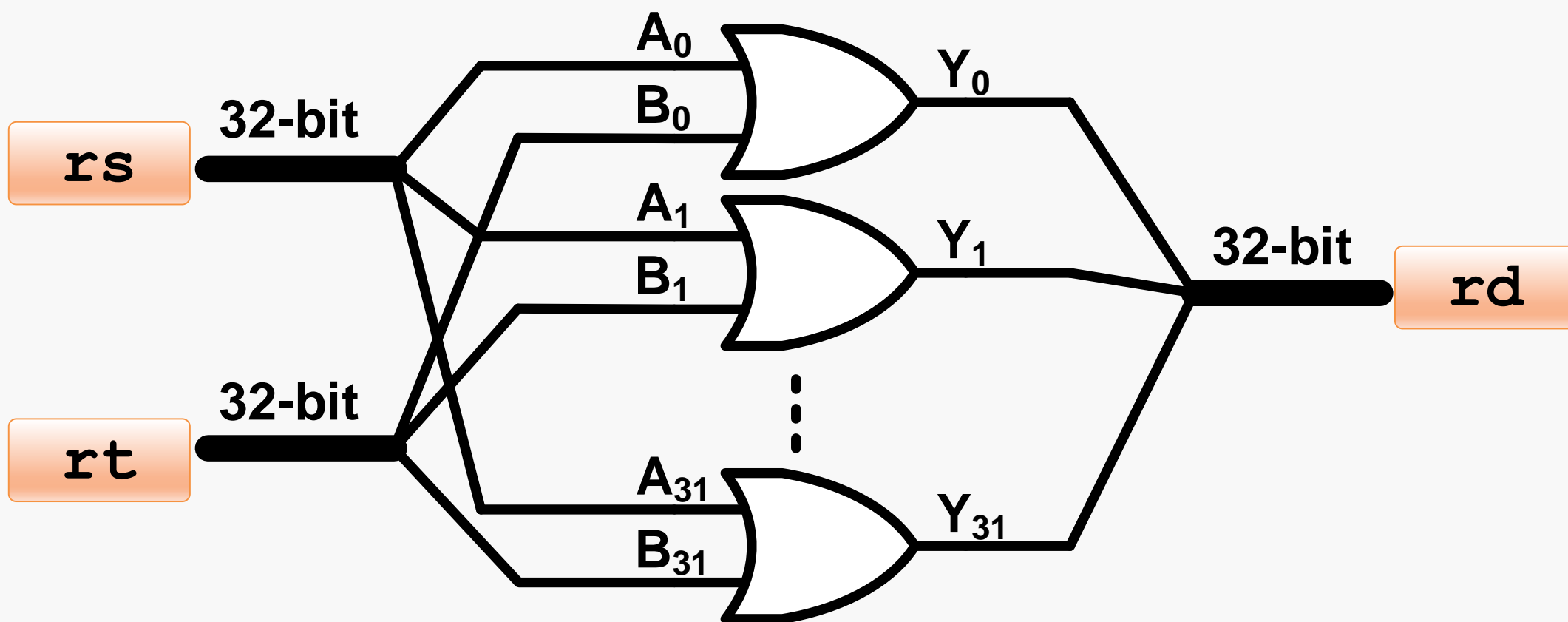
# 与运算的实现

and rd, rs, rt



# 或运算的实现

or rd, rs, rt







# 主要内容

通过学习本课程  
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法

I 运算电路的数学基础

II 晶体管和门电路

III 时钟和触发器

IV 集成电路的制造过程

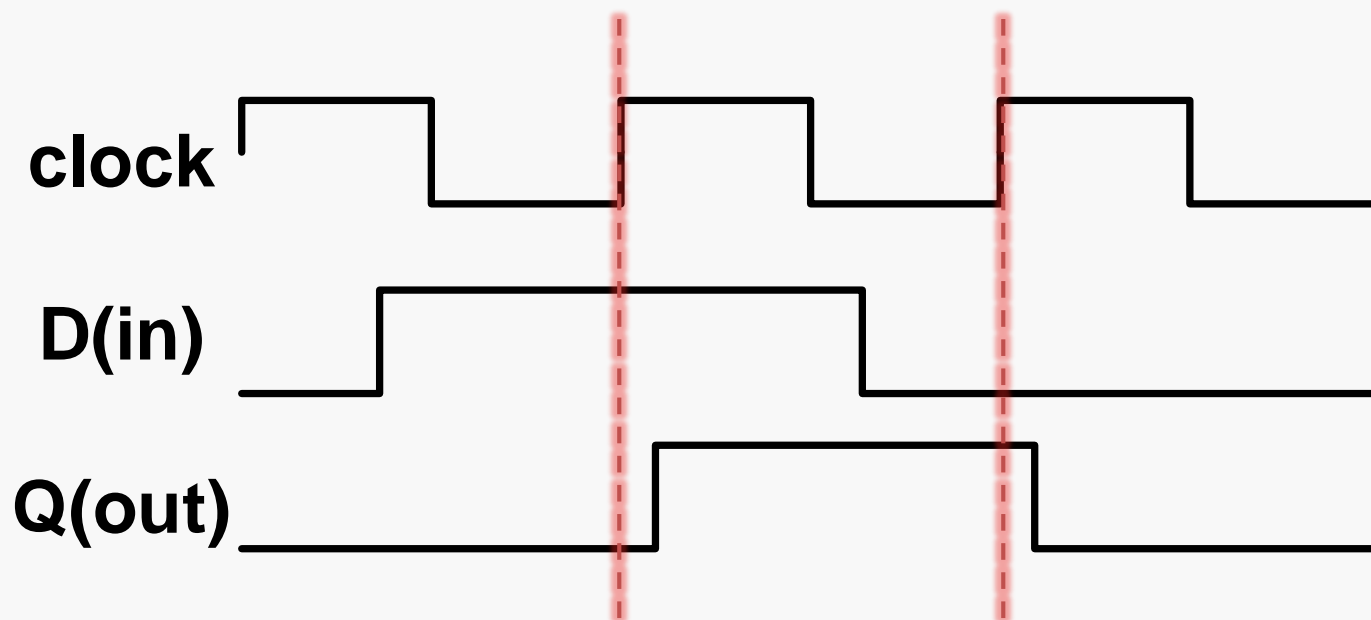
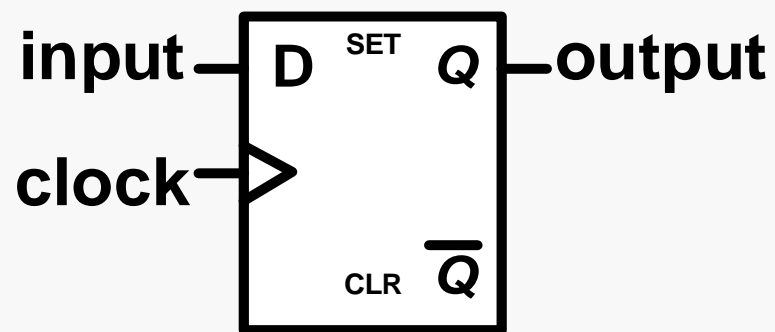


# D触发器 (D flip-flop, DFF)



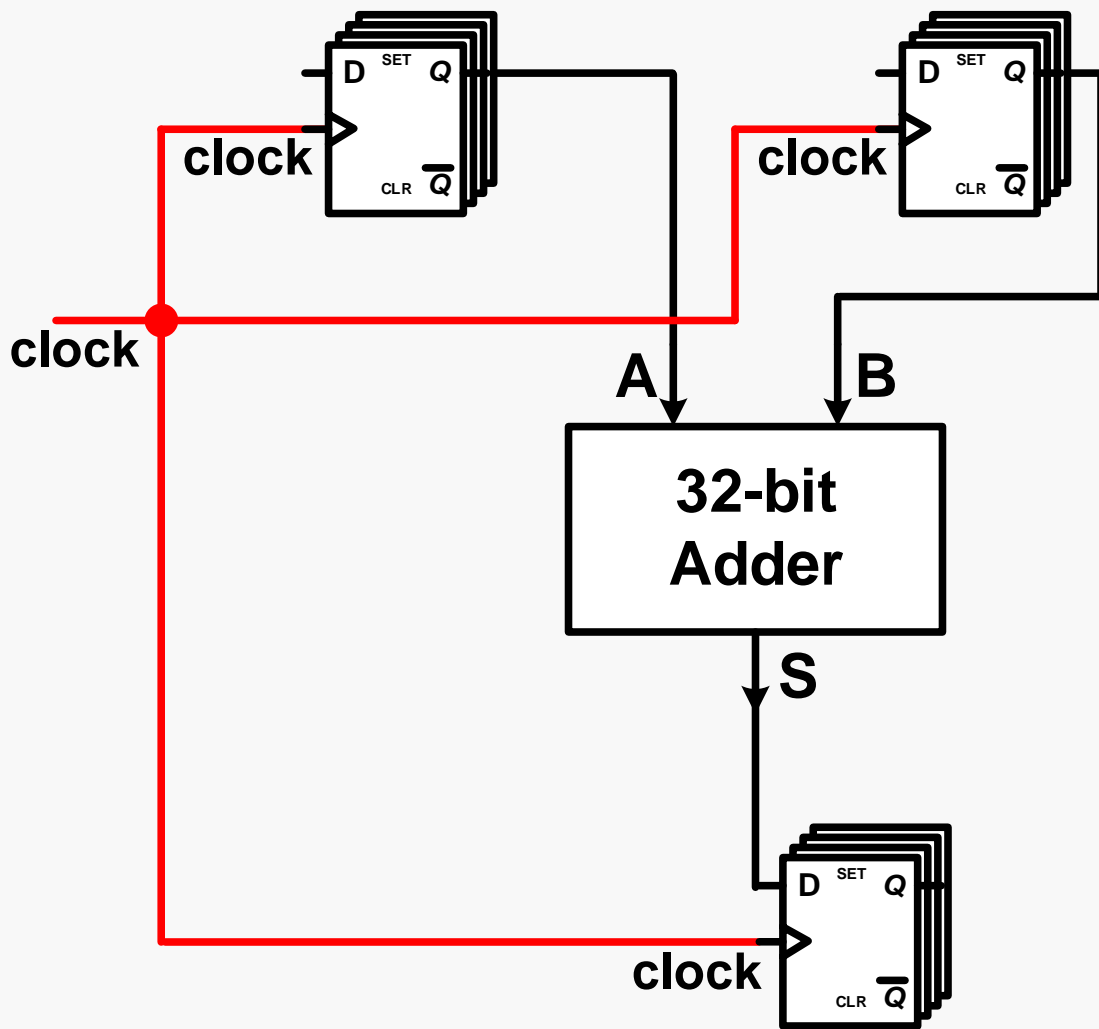
## ▶ D触发器

- 具有存储信息能力的基本单元
- 由若干逻辑门构成，有多种实现方式
- 主要有一个数据输入、一个数据输出和一个时钟输入
- 在时钟clock的上升沿（0→1），采样输入D的值，传送到输出Q，其余时间输出Q的值不变

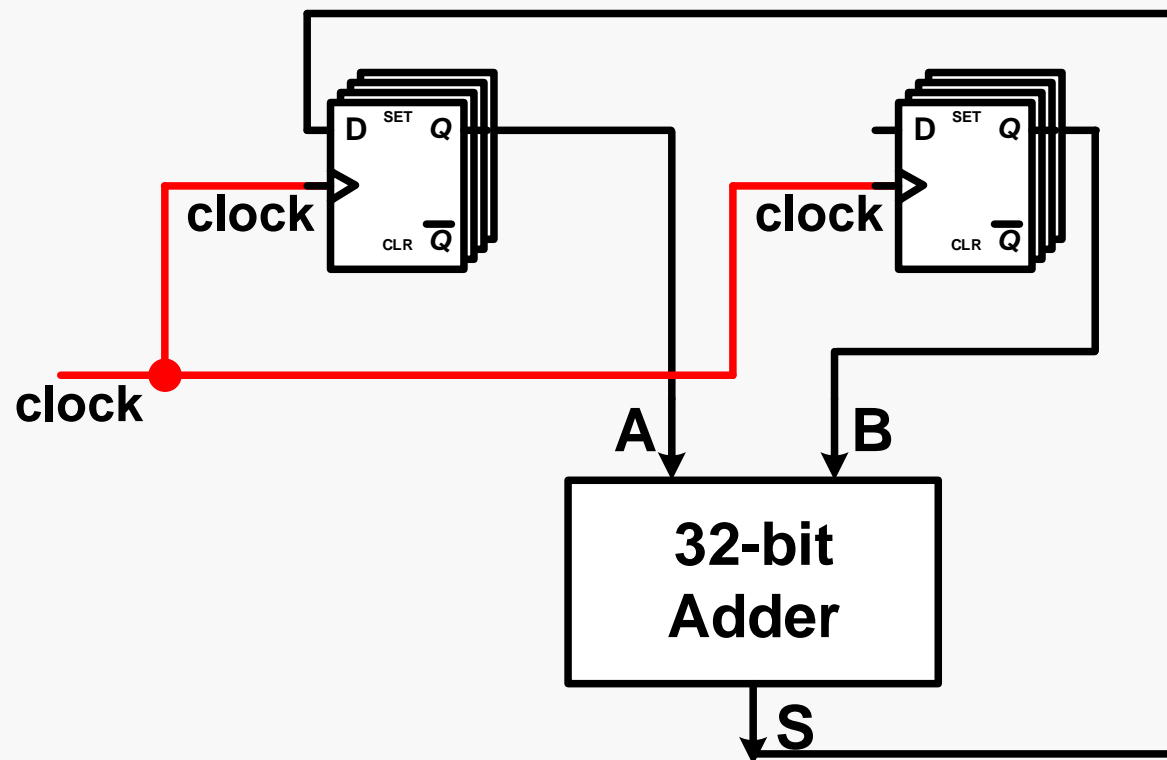


# D触发器应用示例：通用寄存器

add \$t0,\$t1,\$t2



add \$t0,\$t0,\$t3

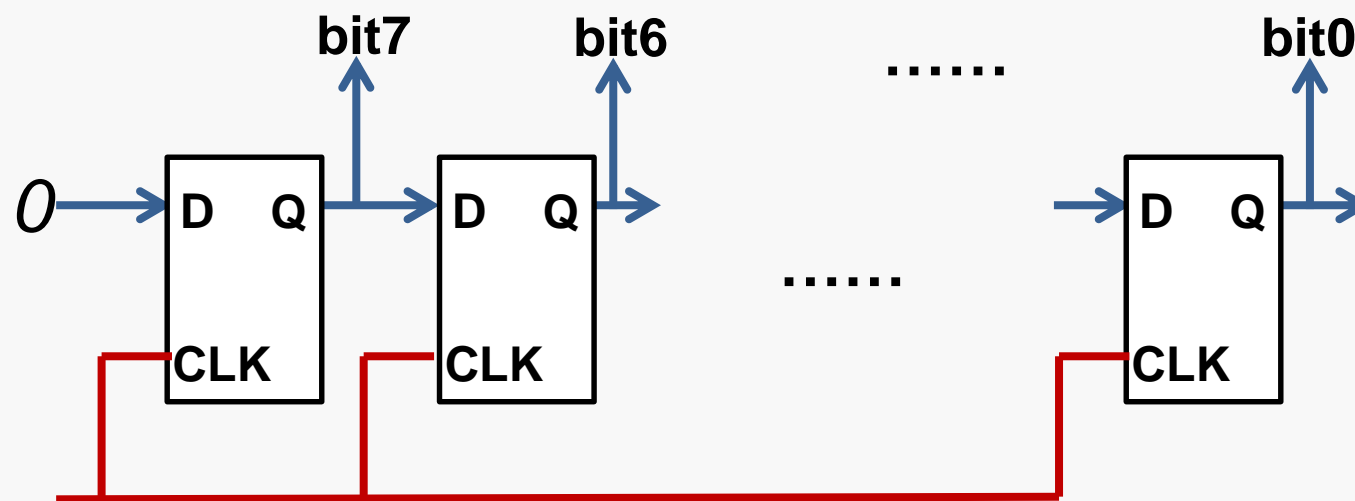


# D触发器应用示例：移位寄存器

clkcycle 3: 0 0 1 0 0 0 1 1

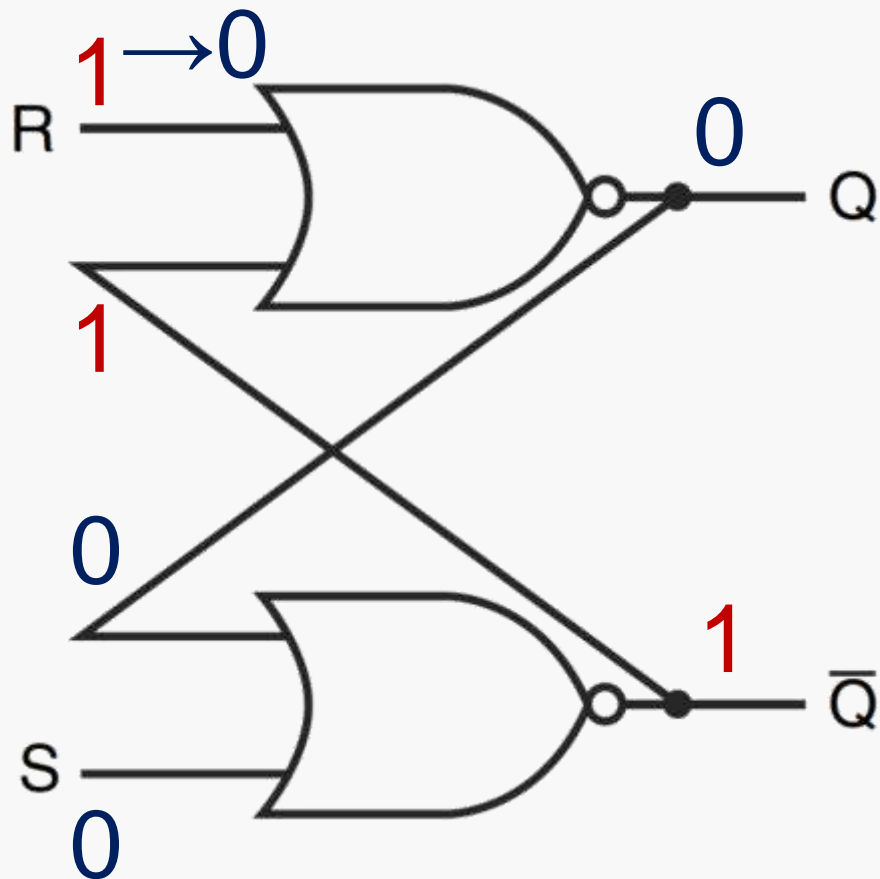
clkcycle 2: 0 1 0 0 0 1 1 0

clkcycle 1: 1 0 0 0 1 1 0 0

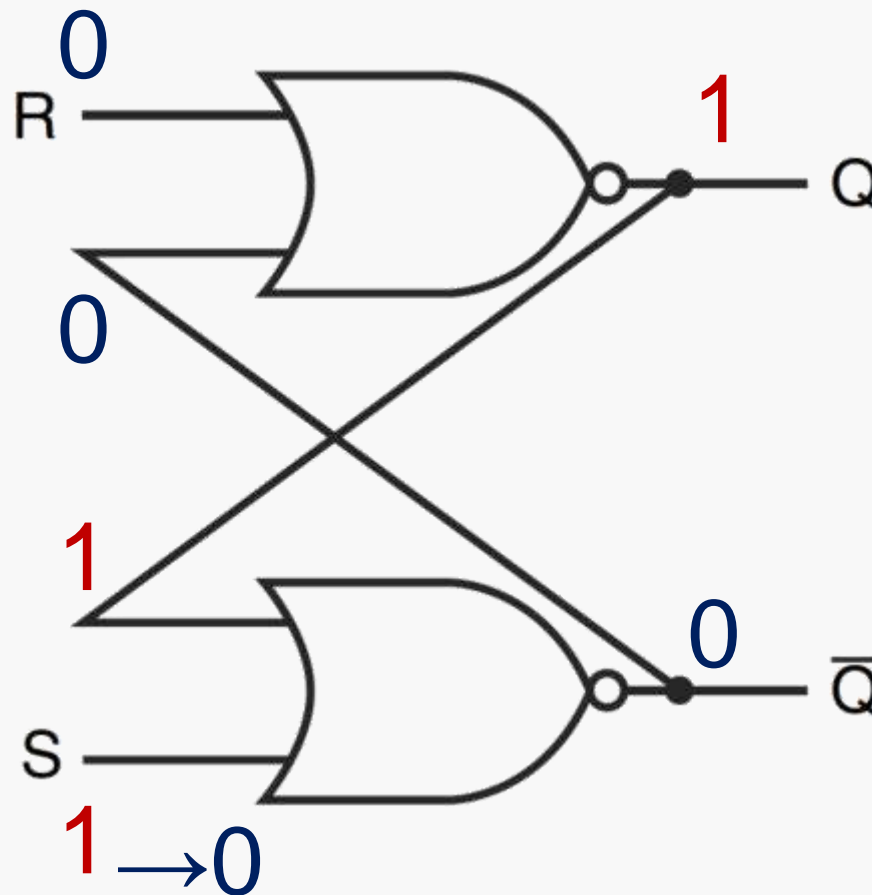


# 具有存储功能的电路

R=1且S=0时，Q被设置0



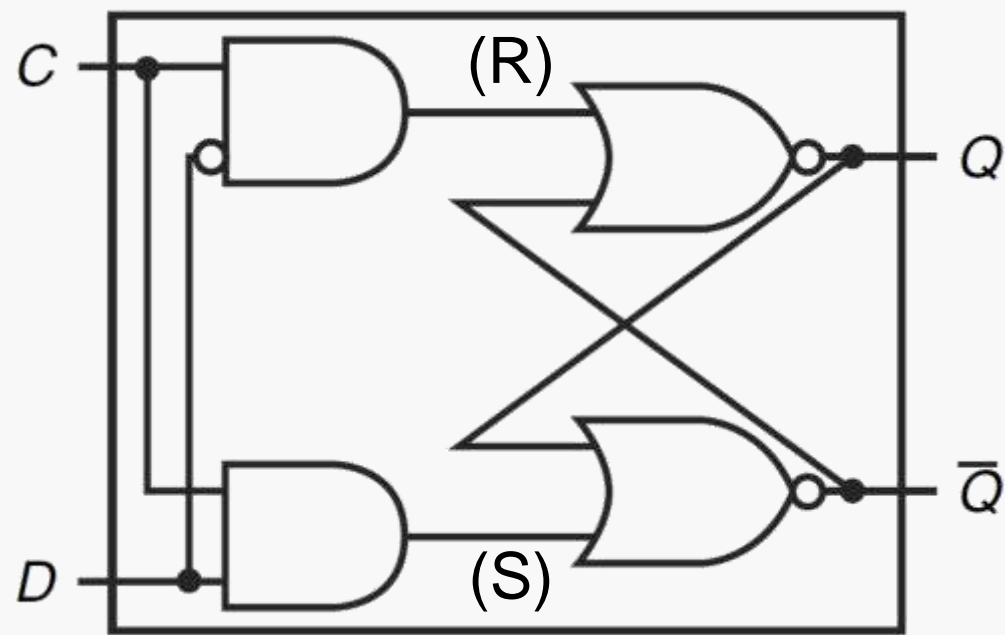
R=0且S=1时，Q被设置为1



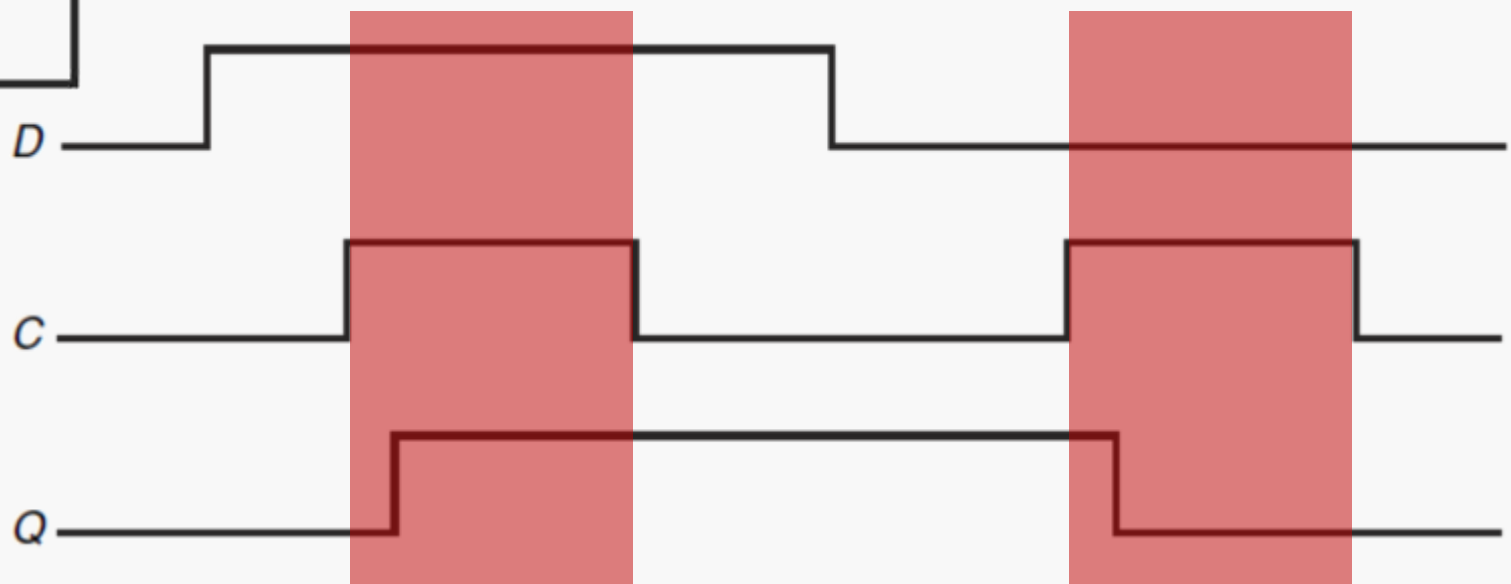




# D锁存器 (D latch)

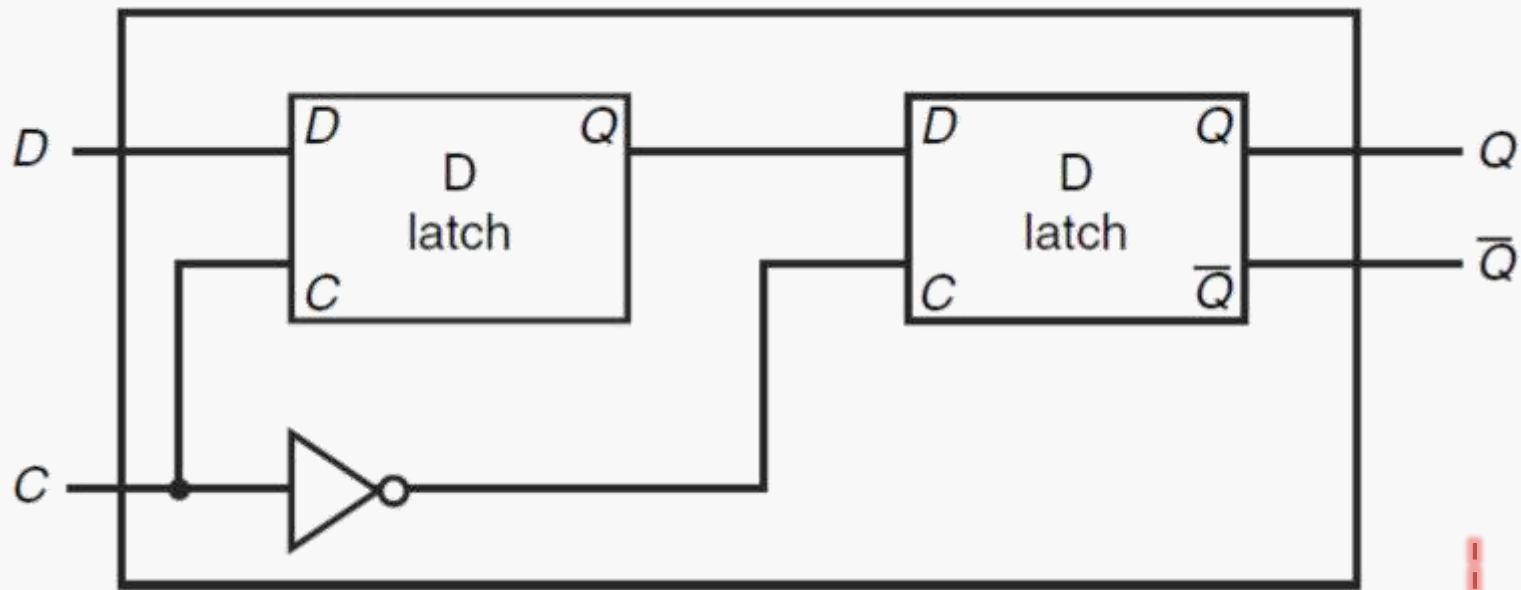


C	D	(R)	(S)	Q	$\bar{Q}$
0	0	0	0	不变	不变
0	1	0	0	不变	不变
1	0	1	0	0	1
1	1	0	1	1	0



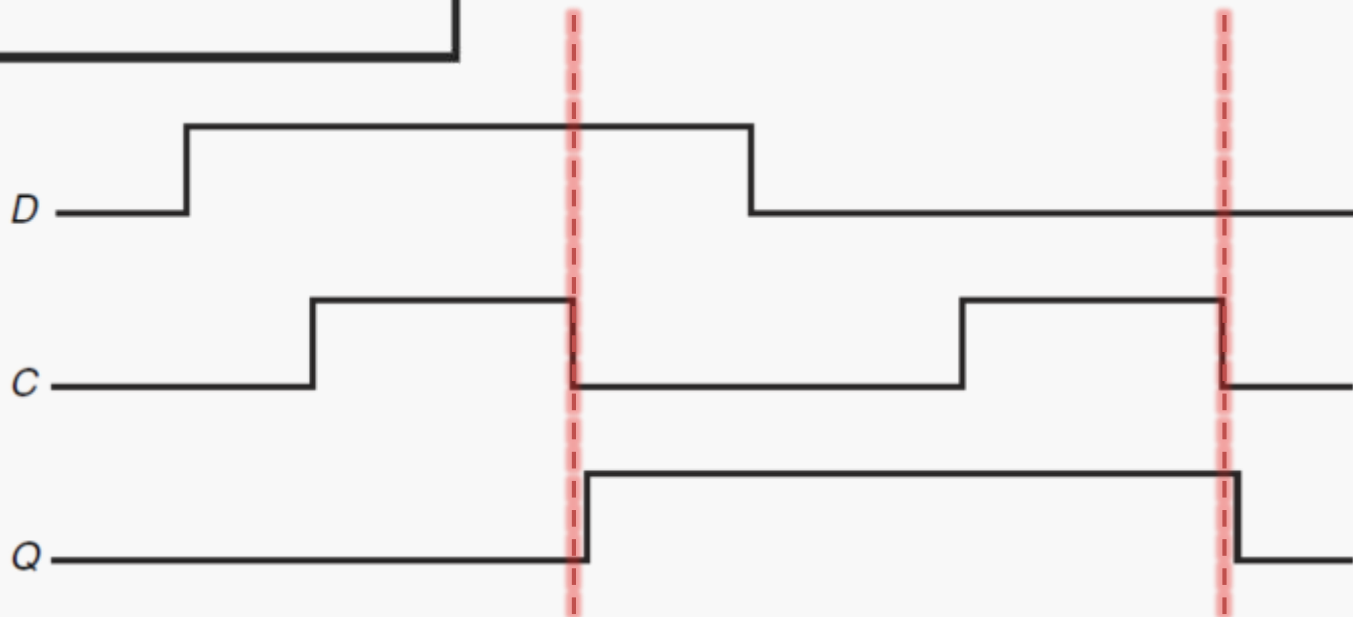
该结构在时钟C为高电平时  
锁存数据D

# D触发器 (D flip-flop, DFF)



该结构在时钟C下降沿时  
锁存数据D

该结构为时钟下降沿触发  
还有时钟上升沿触发的结构

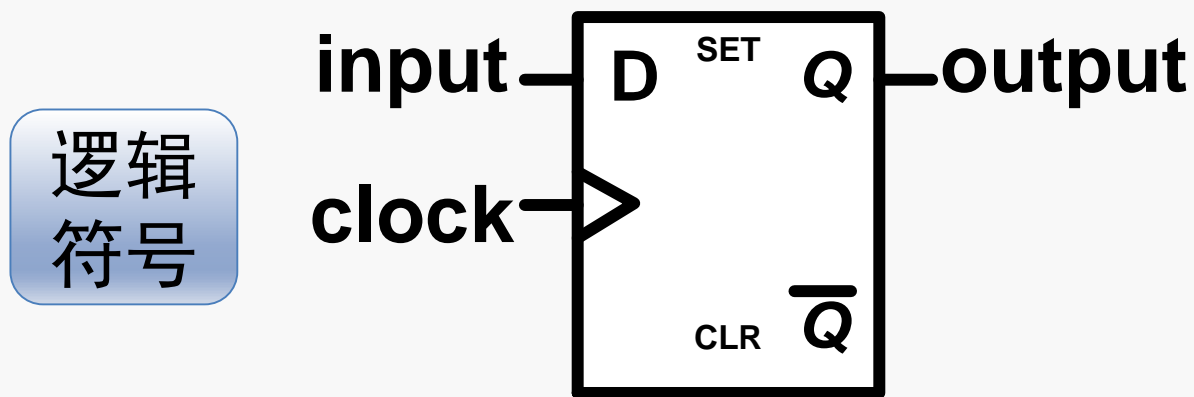


# D触发器 (D flip-flop, DFF)

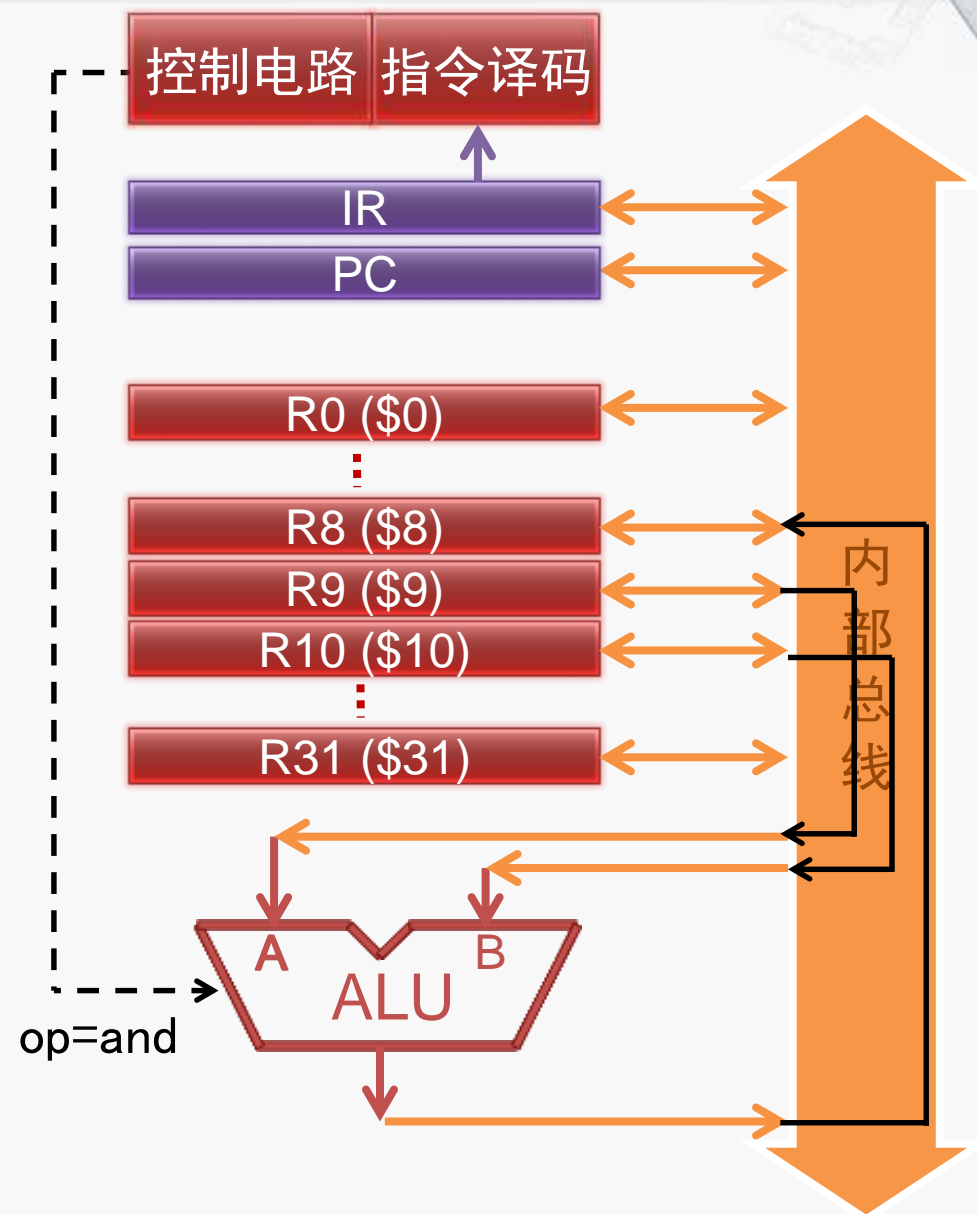
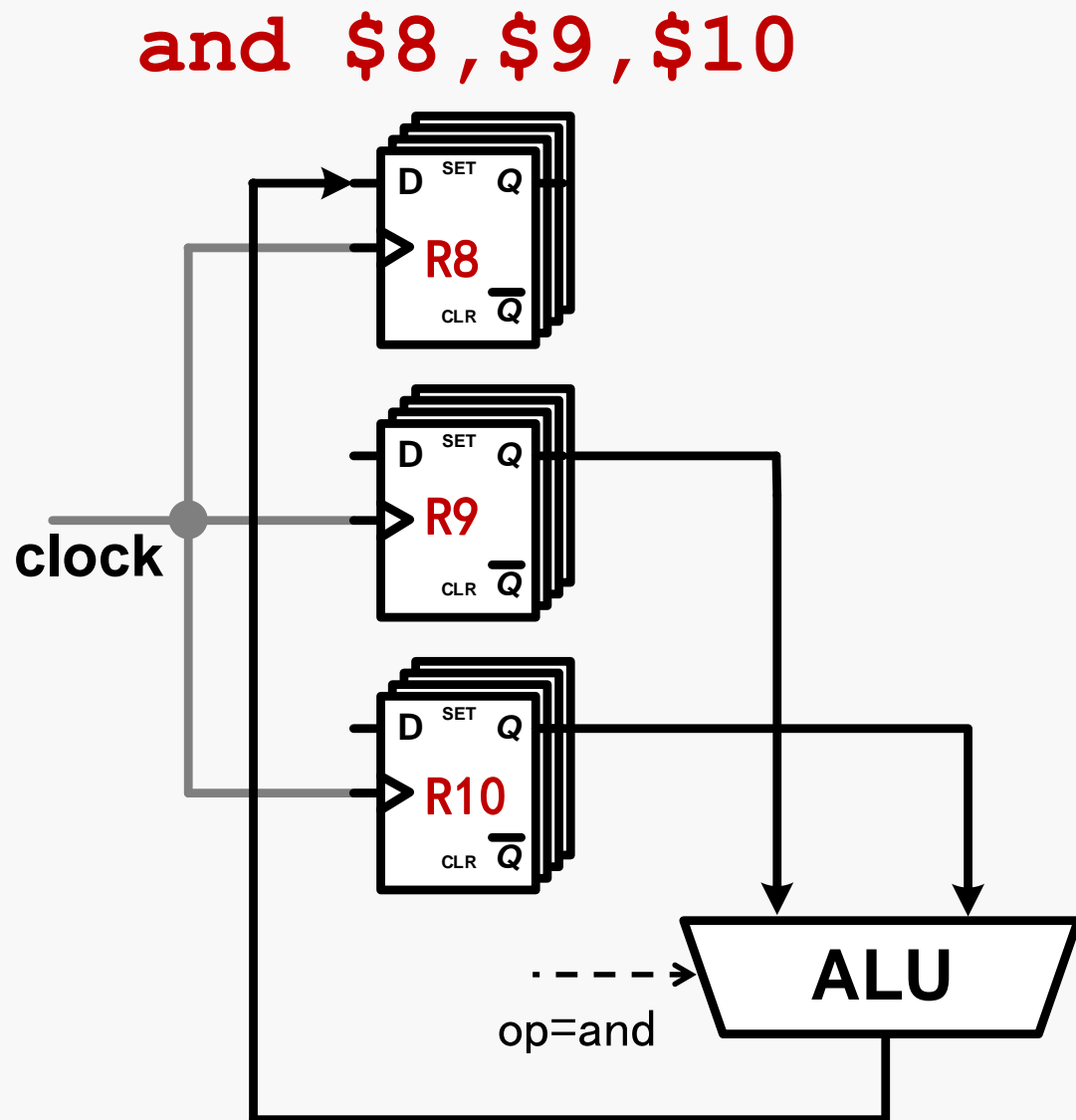


## 🔍 D触发器

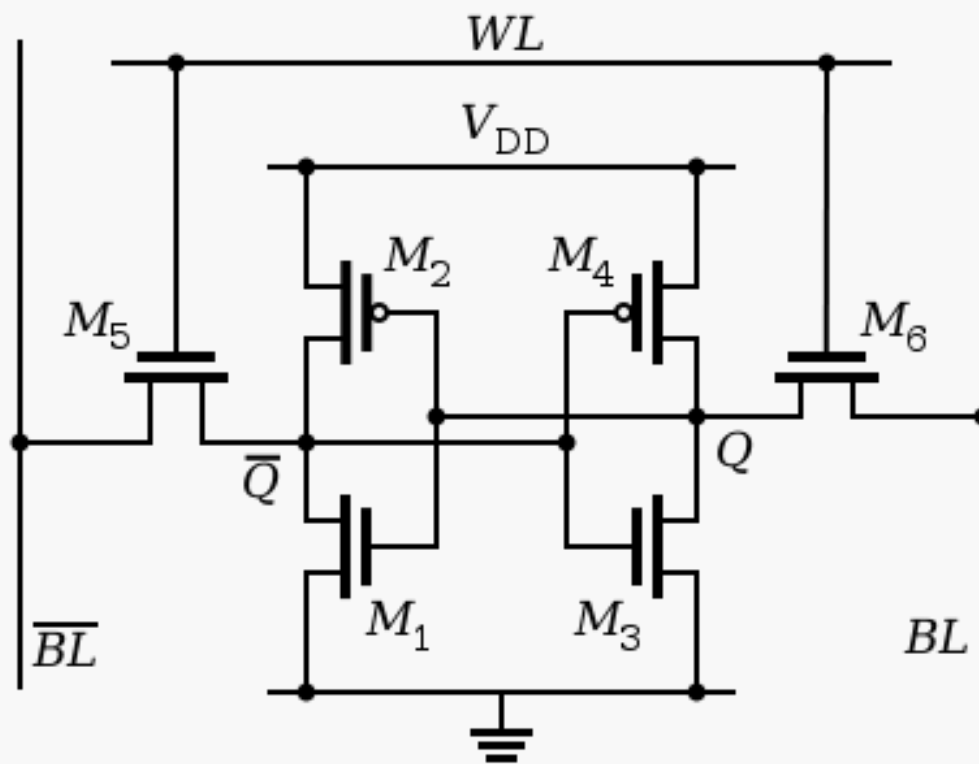
- 由若干逻辑门构成，有多种实现方式
- 主要有一个数据输入D、一个数据输出Q和一个时钟输入
- 在时钟上升沿 ( $0 \rightarrow 1$ )，采样输入D的值，传送到输出Q，其余时间输出Q的值不变
- 具有存储信息能力的基本单元



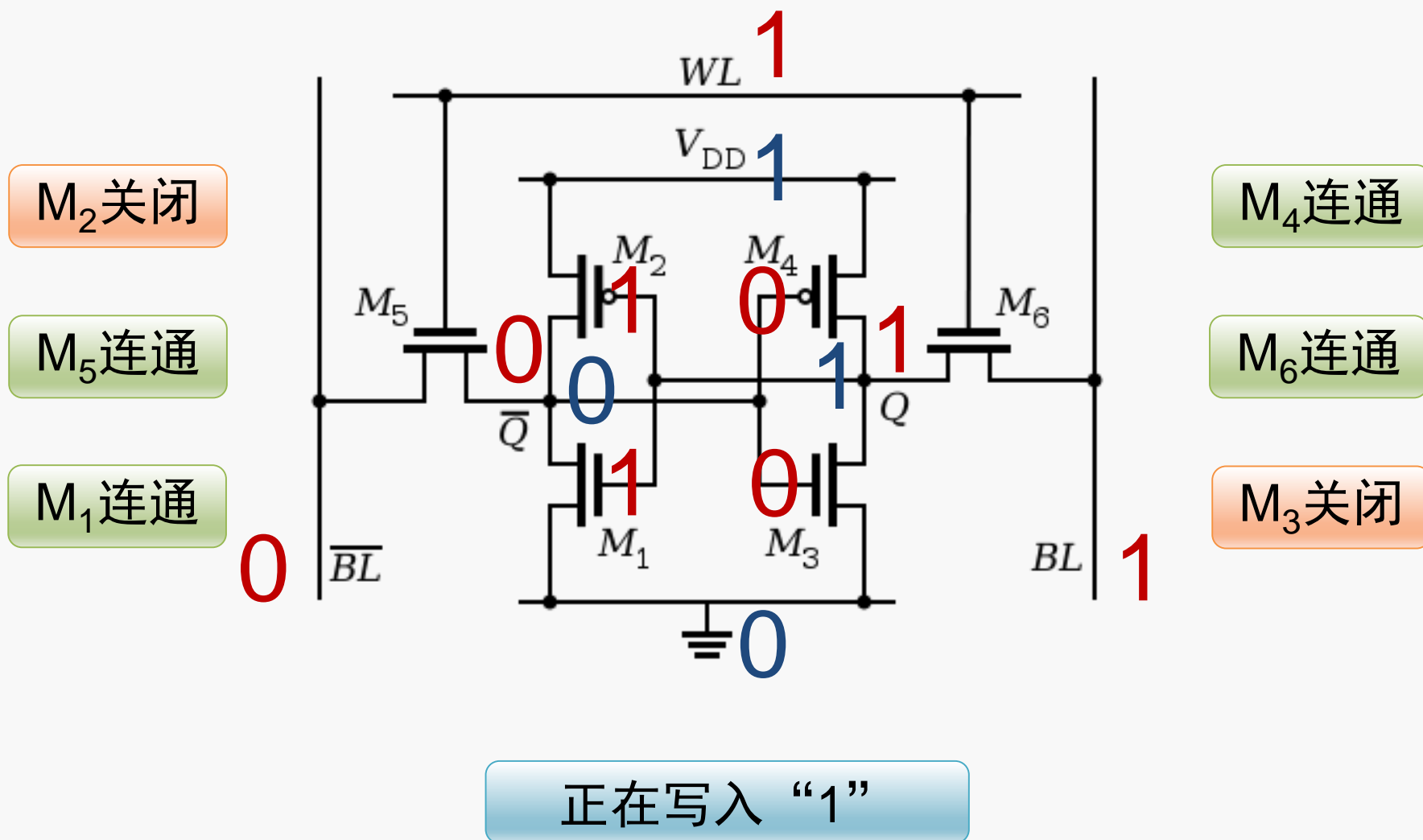
# 算术逻辑单元和寄存器堆示例



# SRAM的基本存储单元 (1 bit)

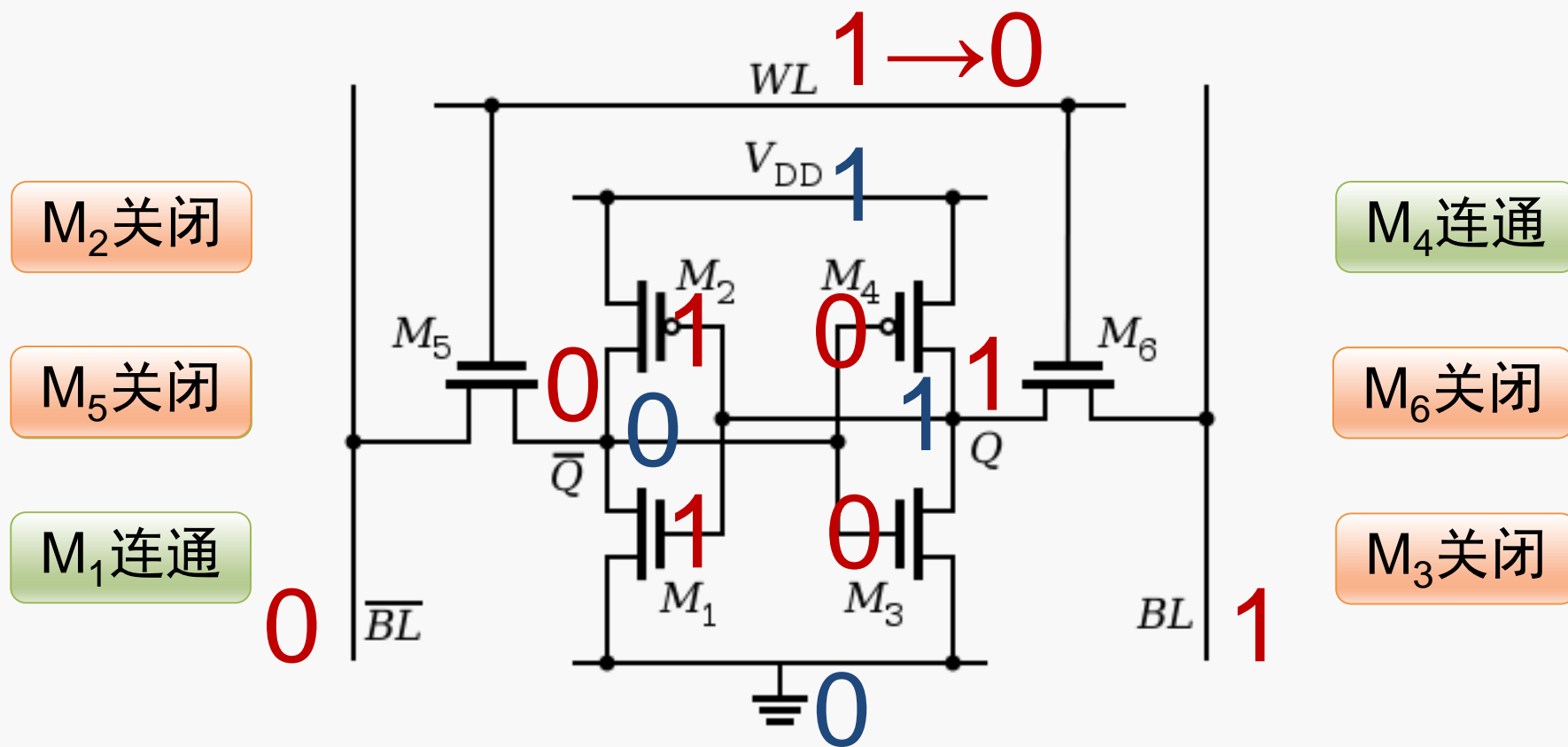


# SRAM的写入过程示例



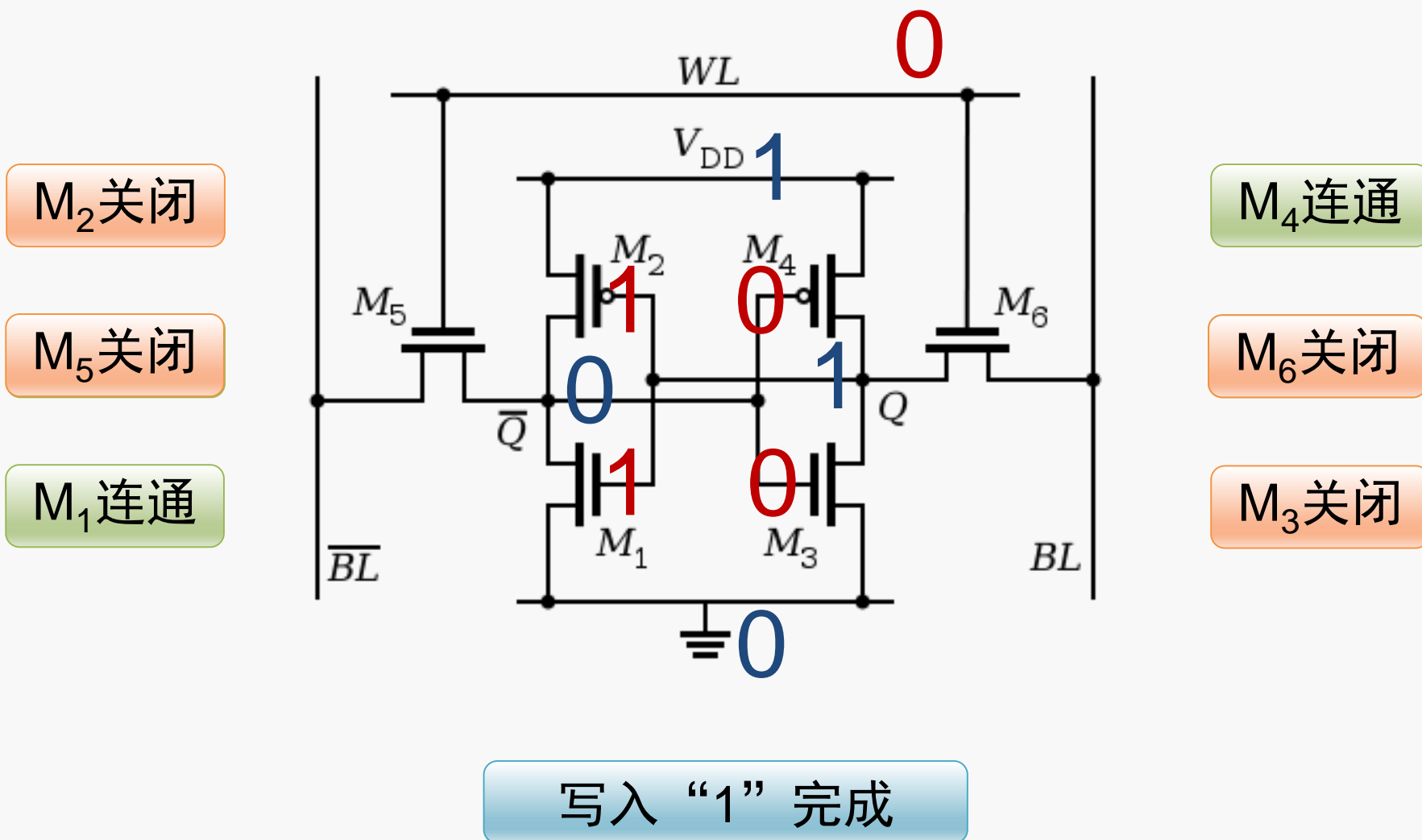


## SRAM的写入过程示例



## 写入过程即将结束

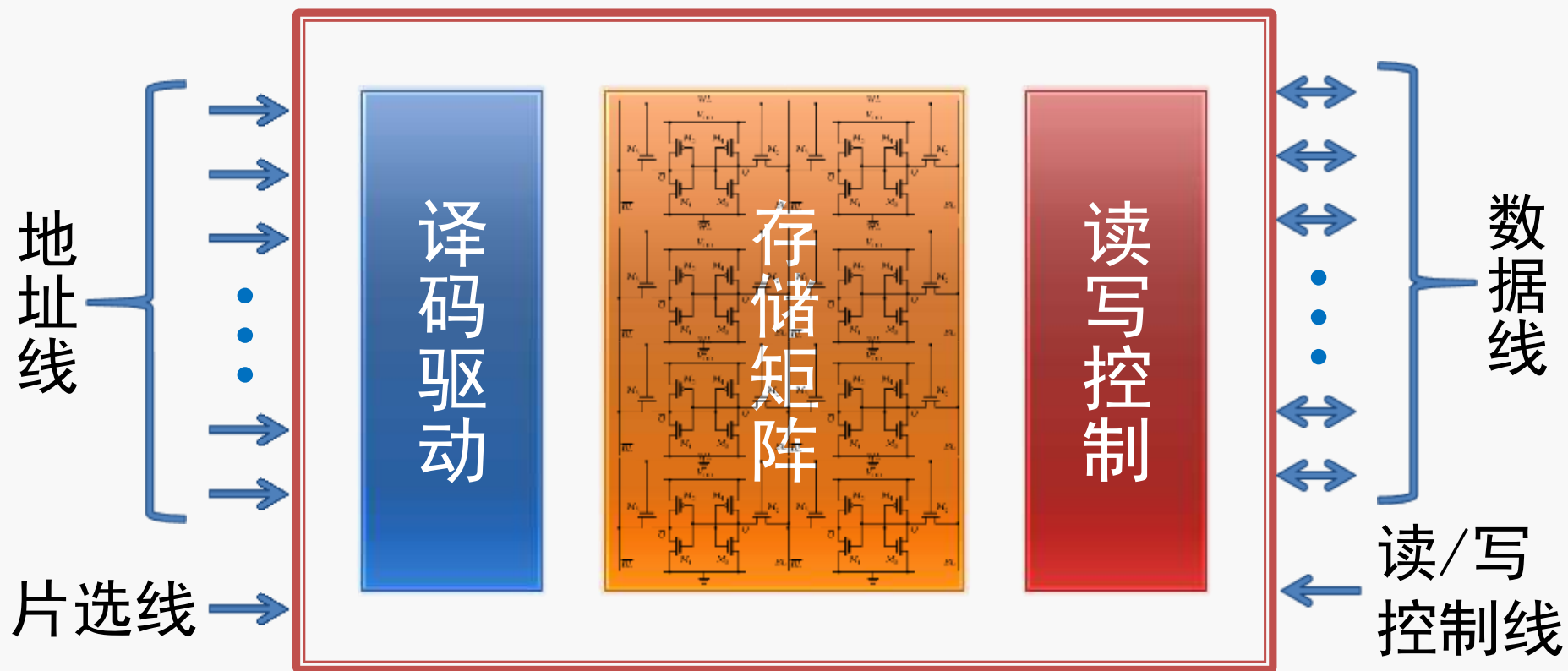
# SRAM的写入过程示例





读出“1”完成

# SRAM的基本结构



# 主要内容

通过学习本课程  
了解计算机的发展历程，理解计算机的组成原理，掌握计算机的设计方法

I 运算电路的数学基础

II 晶体管和门电路

III 时钟和触发器

IV 集成电路的制造过程



# 第一阶段（1）

## 🔍 关键词：硅

- 地壳内第二丰富的元素，半导体制造业的基础
- 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

沙子

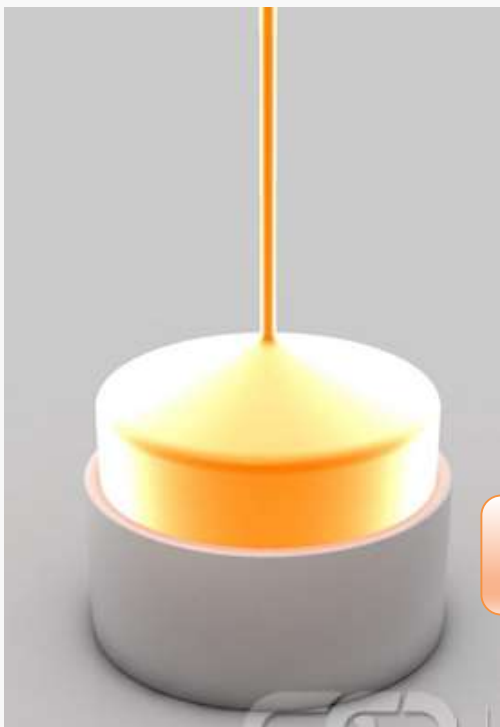




# 第一阶段（2）

## 🕒 关键词：硅锭（Ingot）

- 。通过多步净化熔炼，得到纯度99.9999%的单晶硅锭，基本呈圆柱形，重约100千克



硅熔炼

单晶硅锭  
Ingot

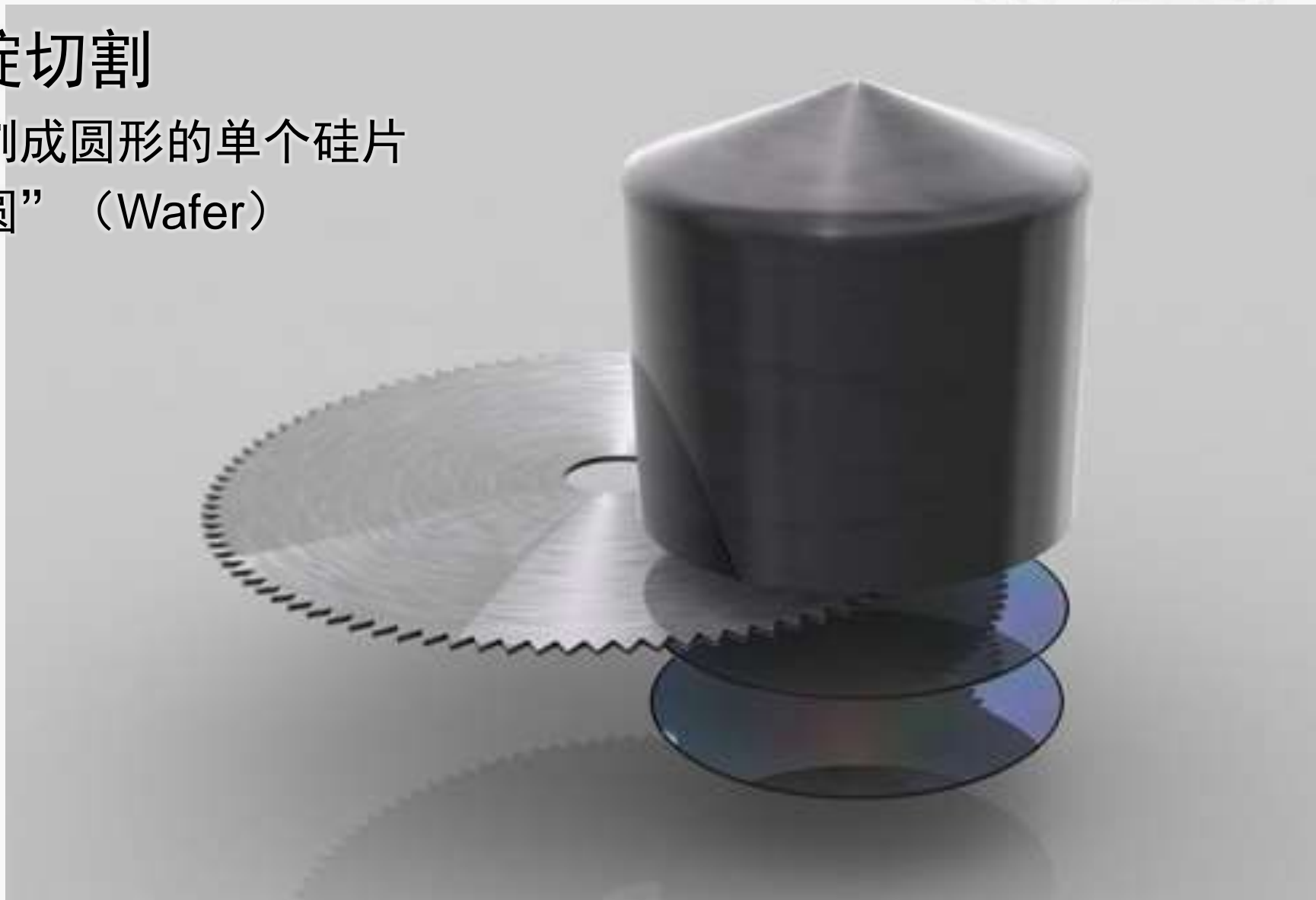
直径12英寸  
(300毫米)



## 第二阶段（1）

### 🔍 关键词：硅锭切割

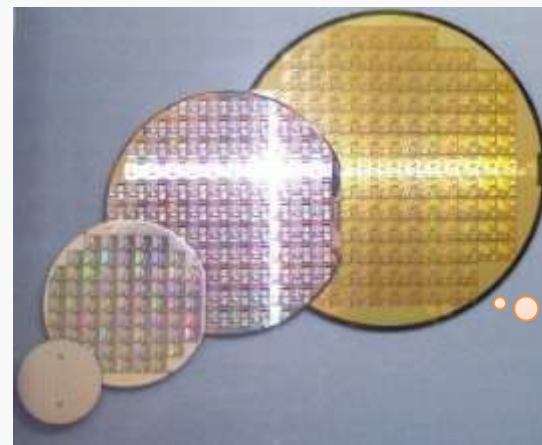
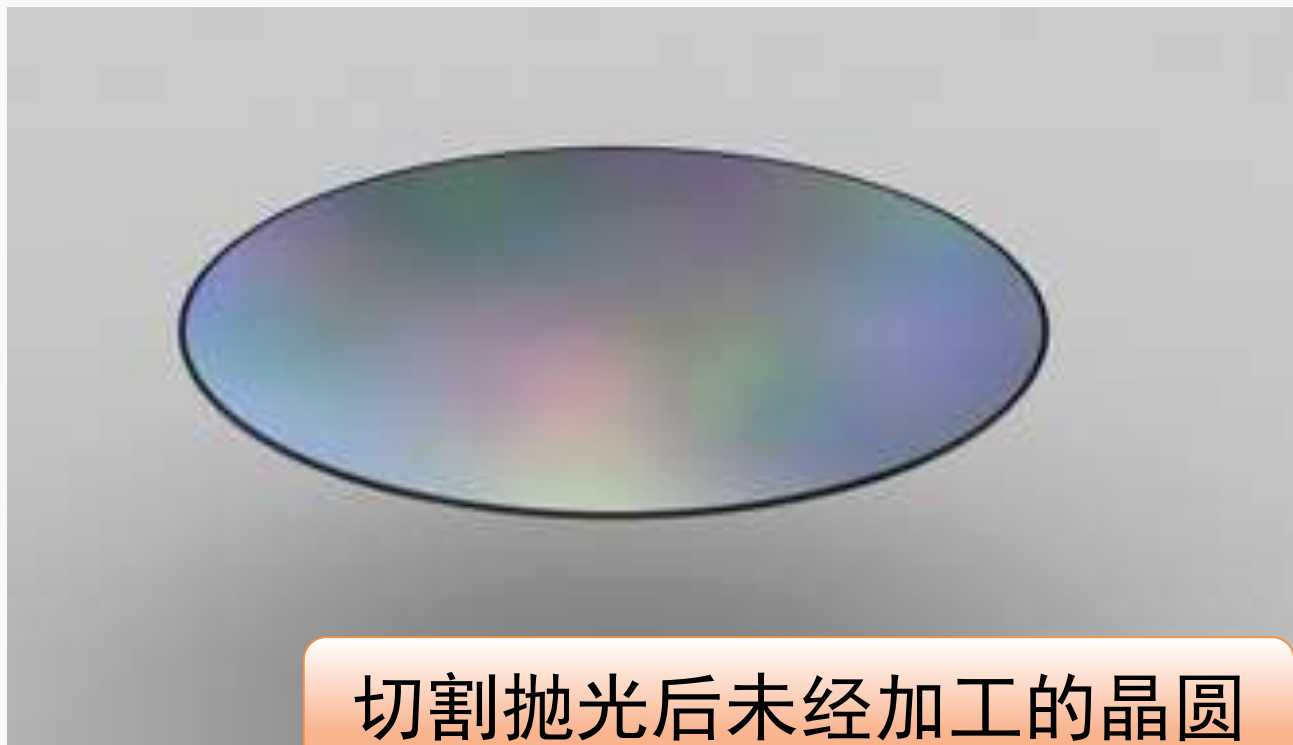
- 将硅锭横向切割成圆形的单个硅片
- 通常称为“晶圆”（Wafer）



## 第二阶段（2）

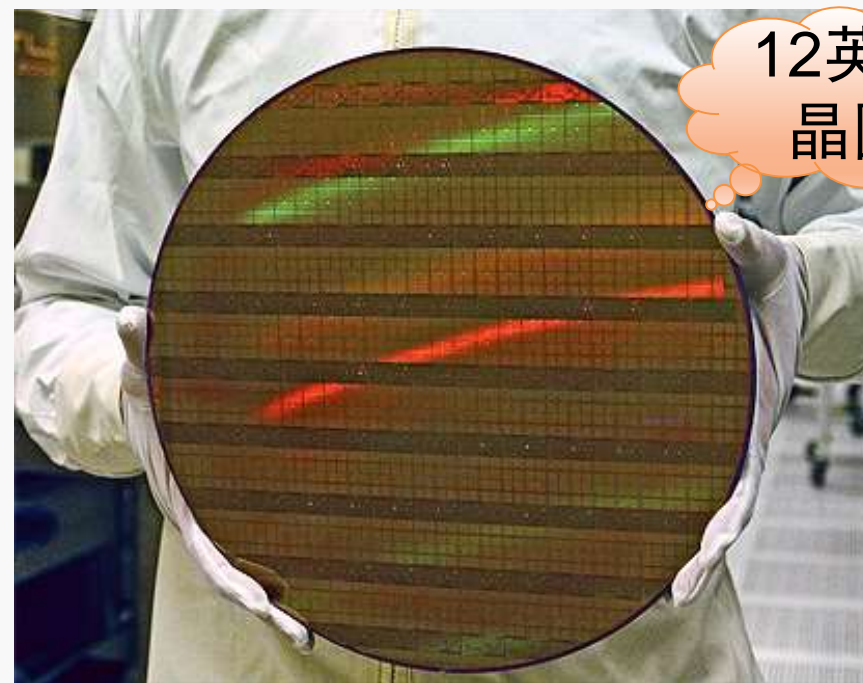
### 🔍 关键词：晶圆

- 切割出的晶圆需经过抛光
- 抛光后的晶圆如同镜面



制造完成  
后的晶圆

2/4/6/8  
英寸晶圆



12英寸  
晶圆

## 第三阶段（1）

🔍 关键词：

光刻胶 (Photo Resist)

- 。光刻胶是指通过紫外光等特定光照或辐射，其溶解度发生变化的耐蚀刻薄膜材料
- 。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

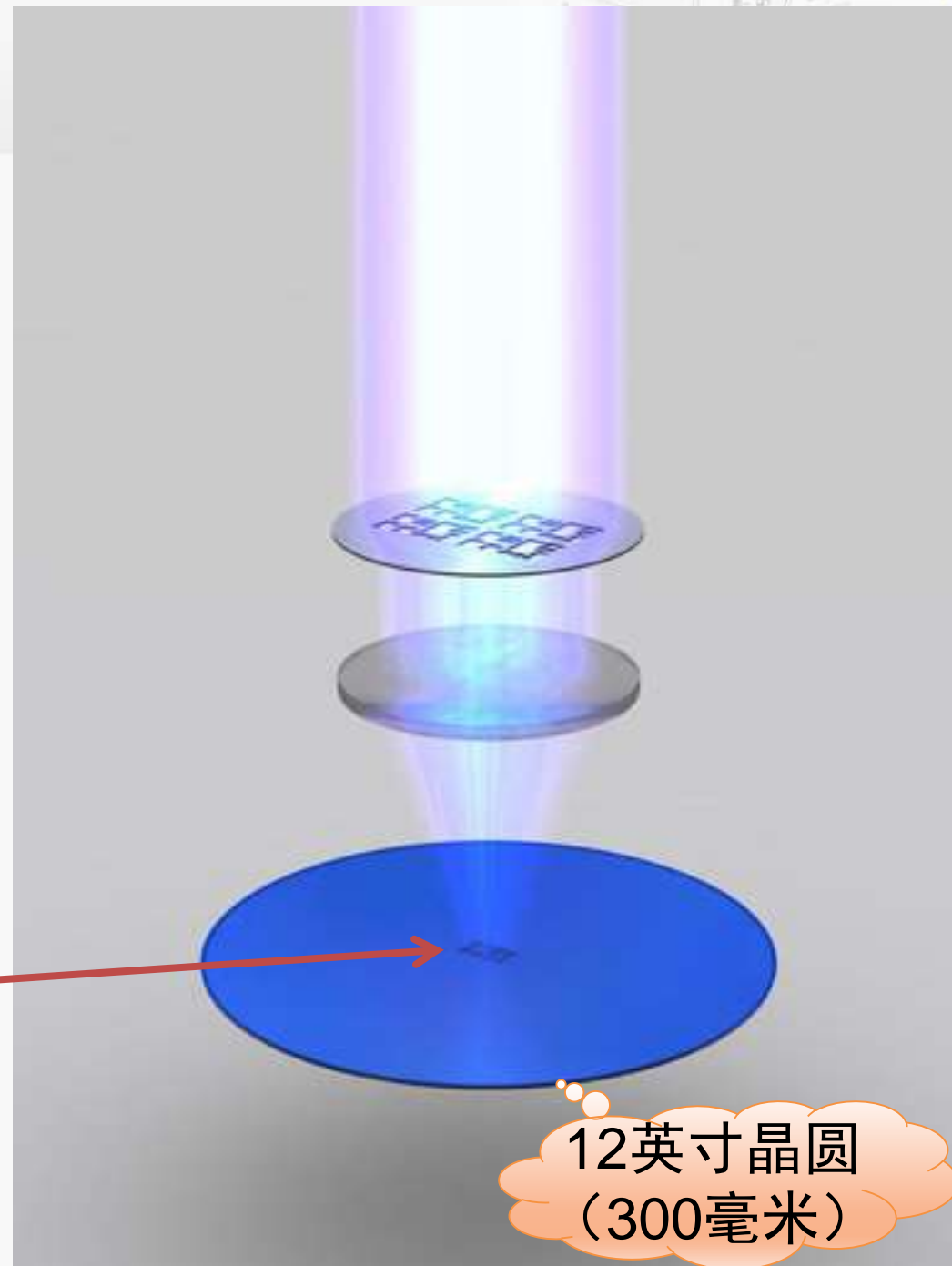
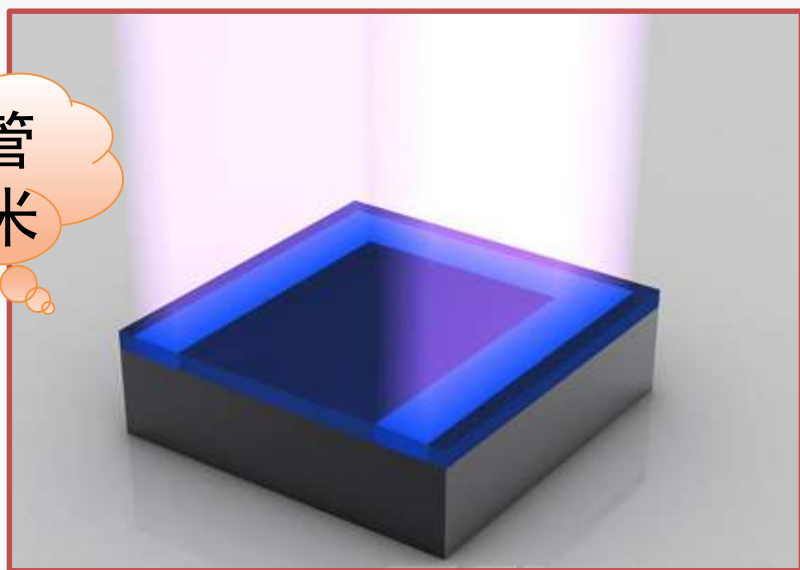


## 第三阶段（2）

### 🕒 关键词：光刻

- 掩模(Mask)上印着预先设计好的电路图案
- 光刻胶层透过掩模曝光在紫外线(UV)之下，变得可溶

单个晶体管  
50-200纳米



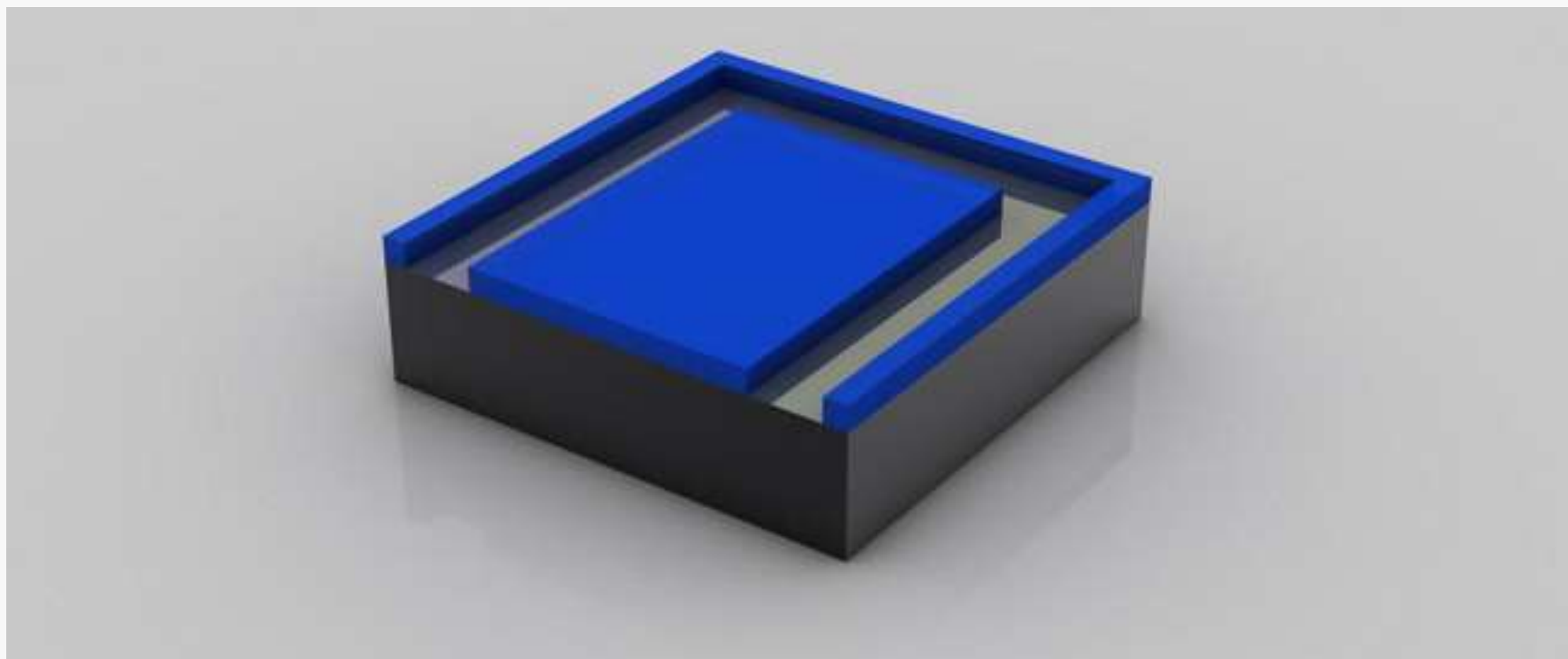
12英寸晶圆  
(300毫米)

## 第四阶段（1）



### 🔍 关键词：溶解光刻胶

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

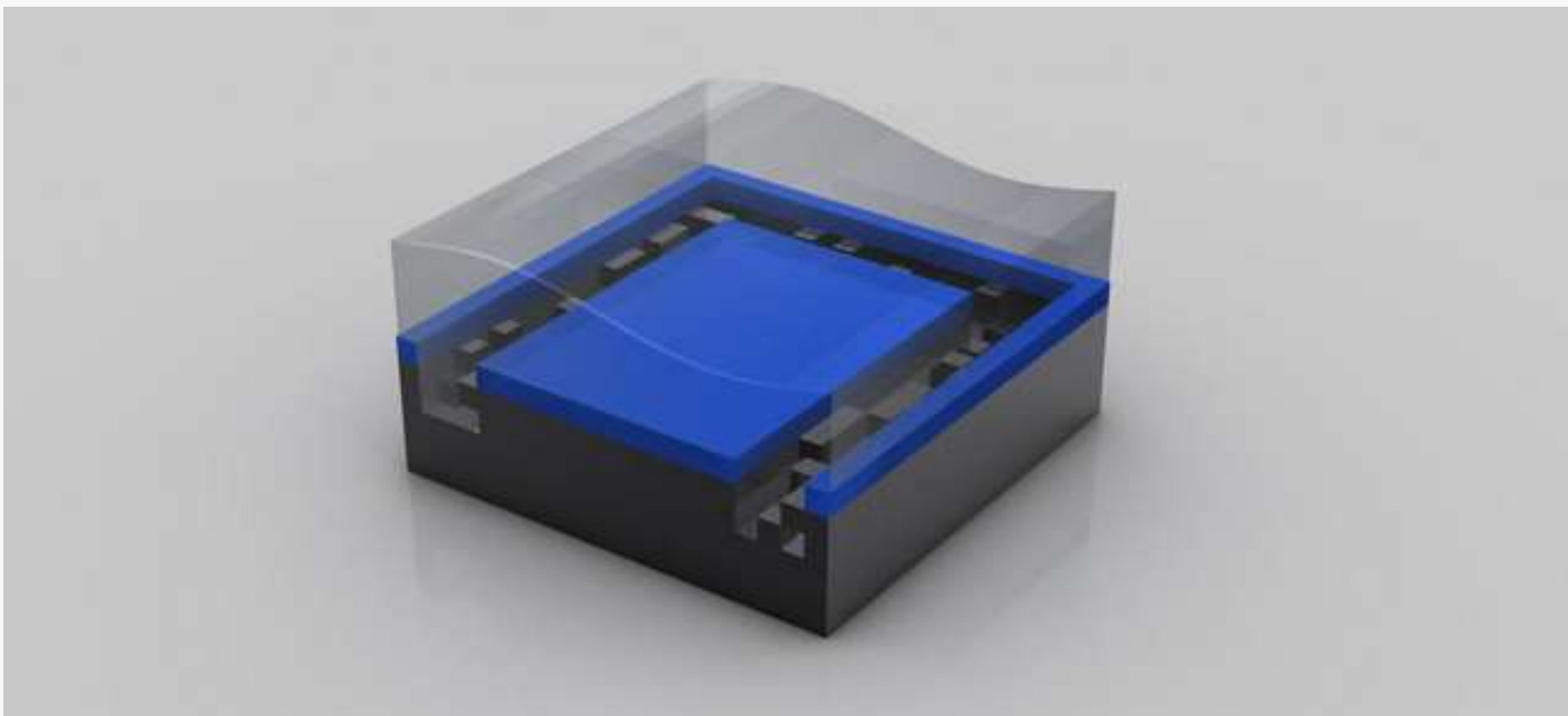




## 第四阶段（2）

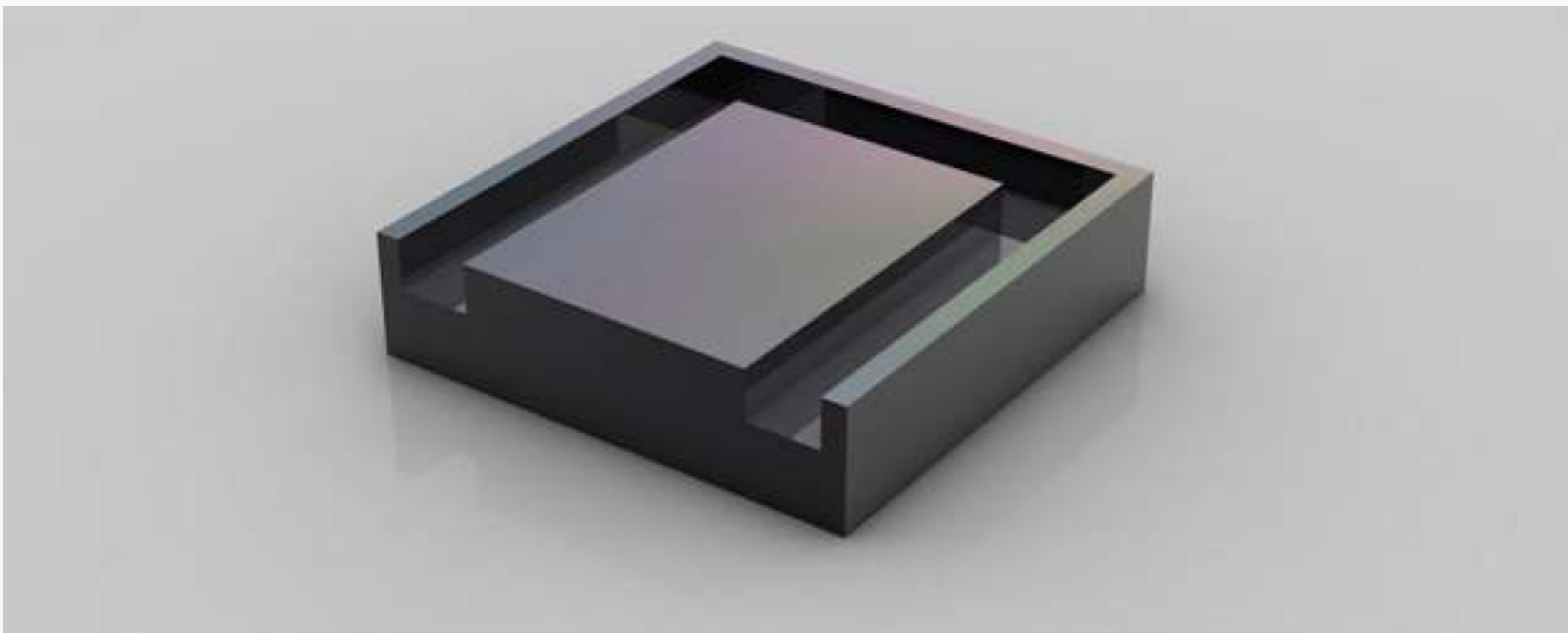
### 🔍 关键词：蚀刻

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



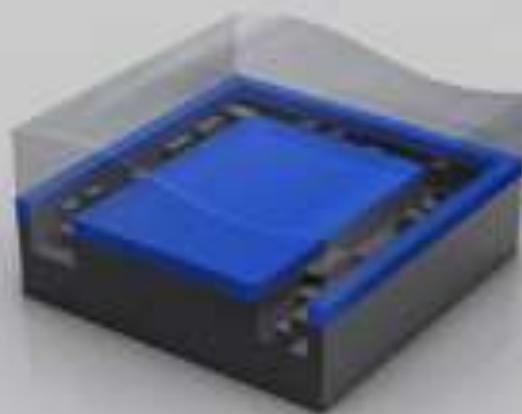
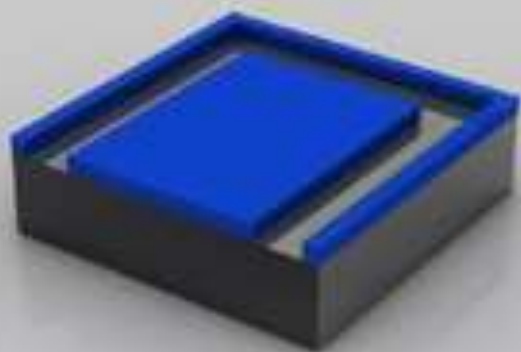
## 第四阶段（3）

- 🕒 关键词：清除光刻胶
  - 。蚀刻完成后，将光刻胶全部清除



## 第四阶段回顾

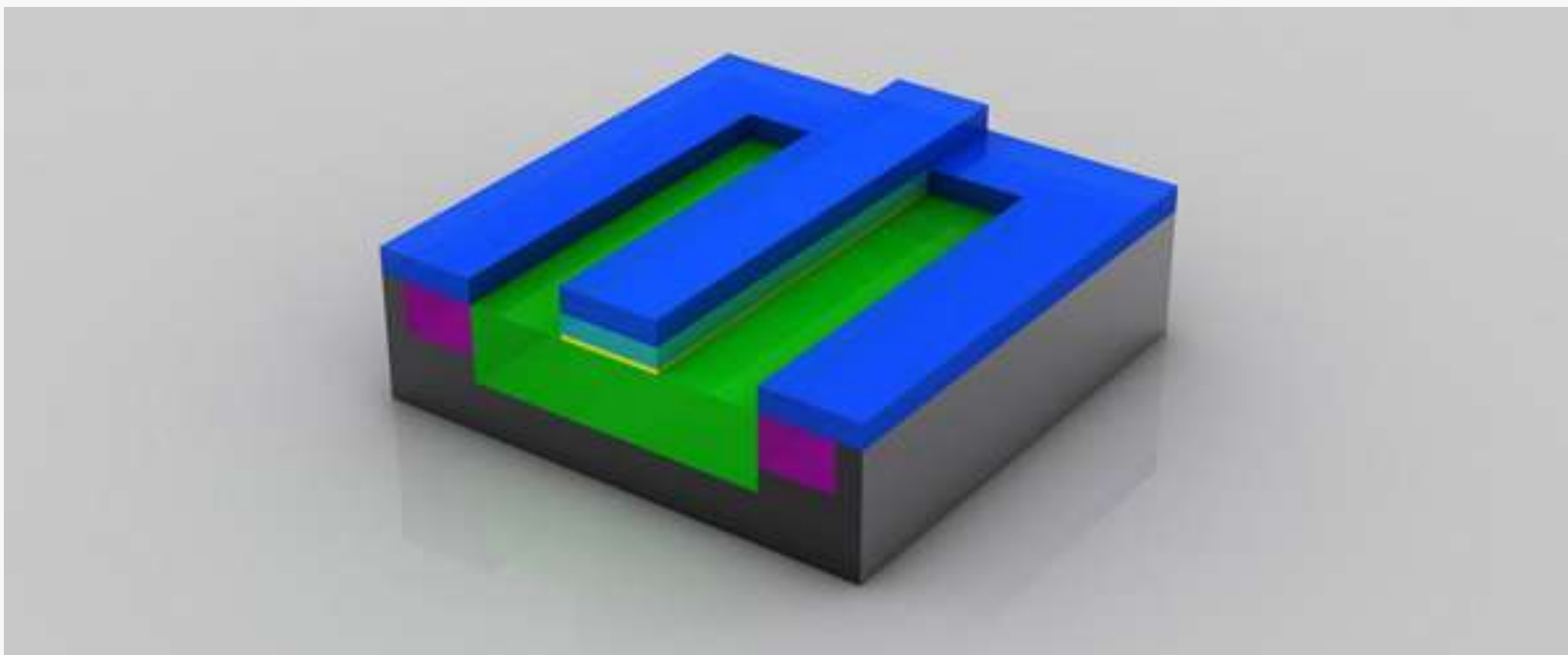
- ① 溶解光刻胶
- ② 蚀刻
- ③ 清除光刻胶



## 第五阶段（1）

### 🕒 关键词：光刻胶

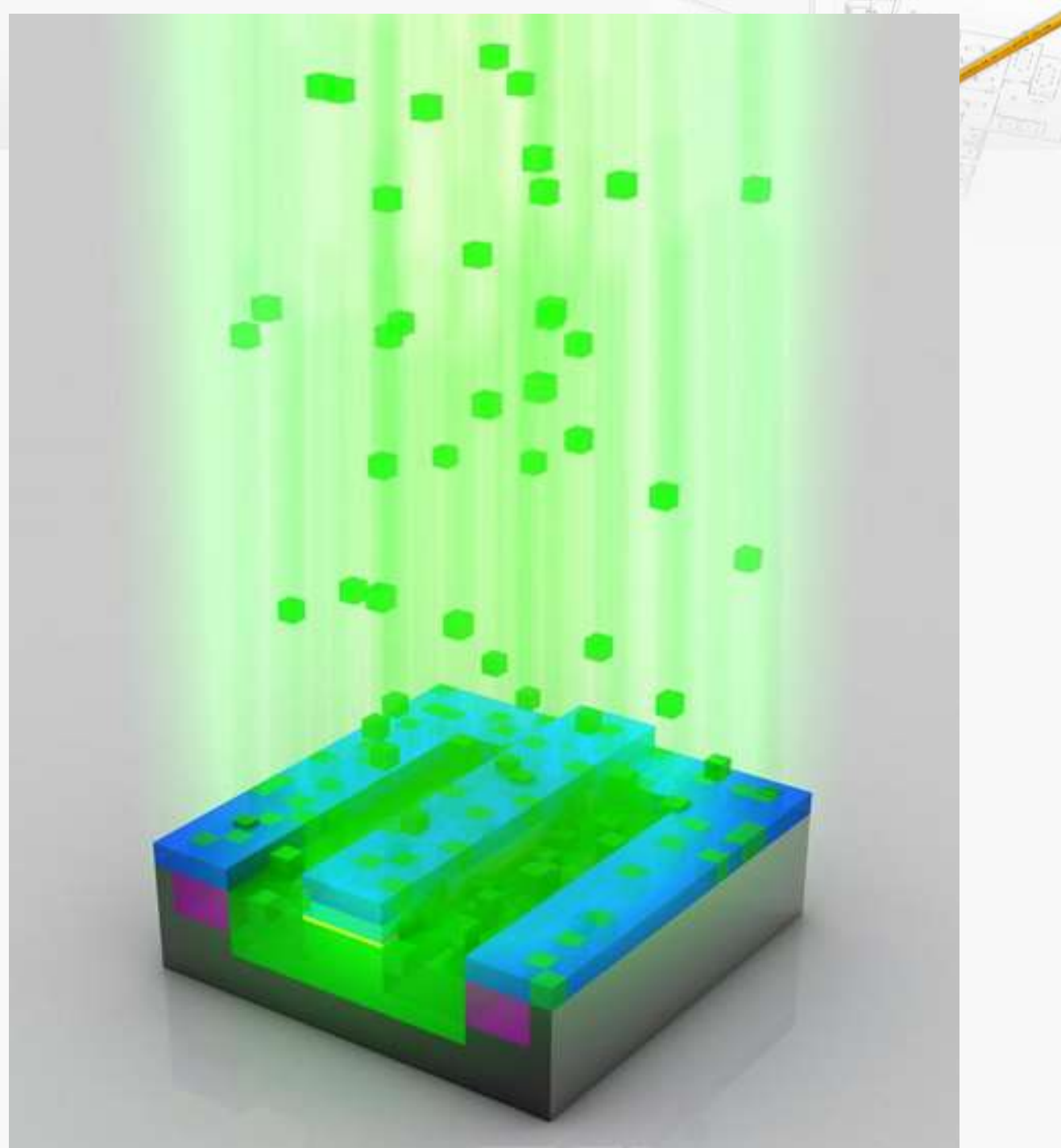
- 再次浇上光刻胶，然后光刻，并洗掉曝光部分
- 剩下的光刻胶（蓝色）用来保护不会离子注入的那部分材料



## 第五阶段（2）

### 🔍 关键词：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）
- 。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

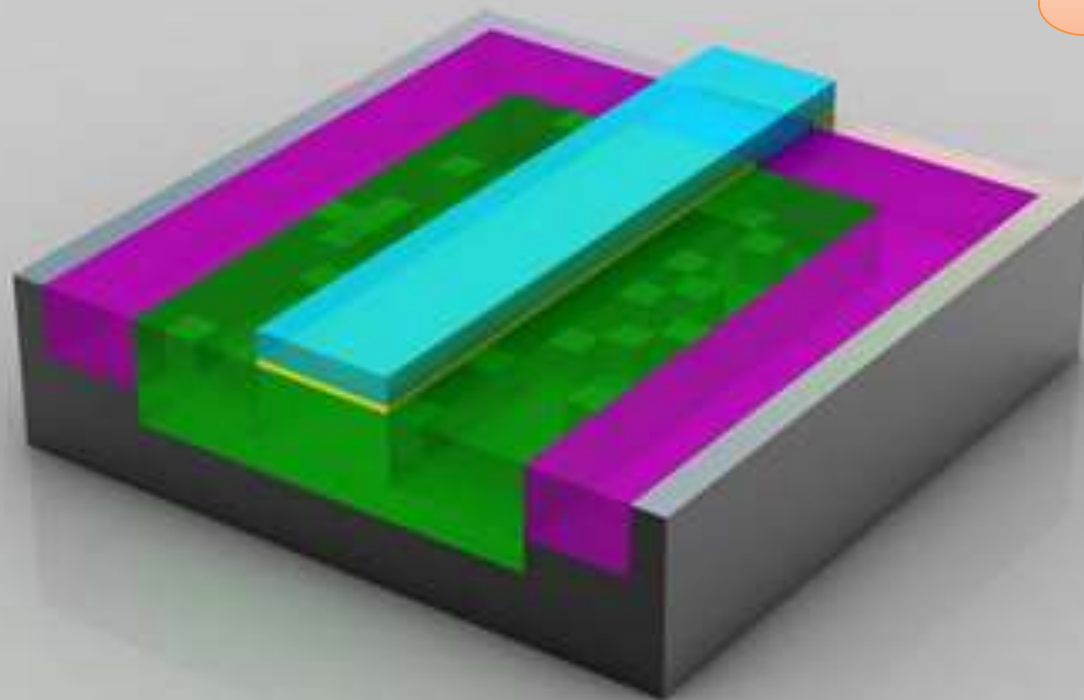


## 第五阶段（3）

### 🔍 关键词：清除光刻胶

- 离子注入完成后，光刻胶被清除
- 注入区域（绿色部分）已掺杂不同的原子

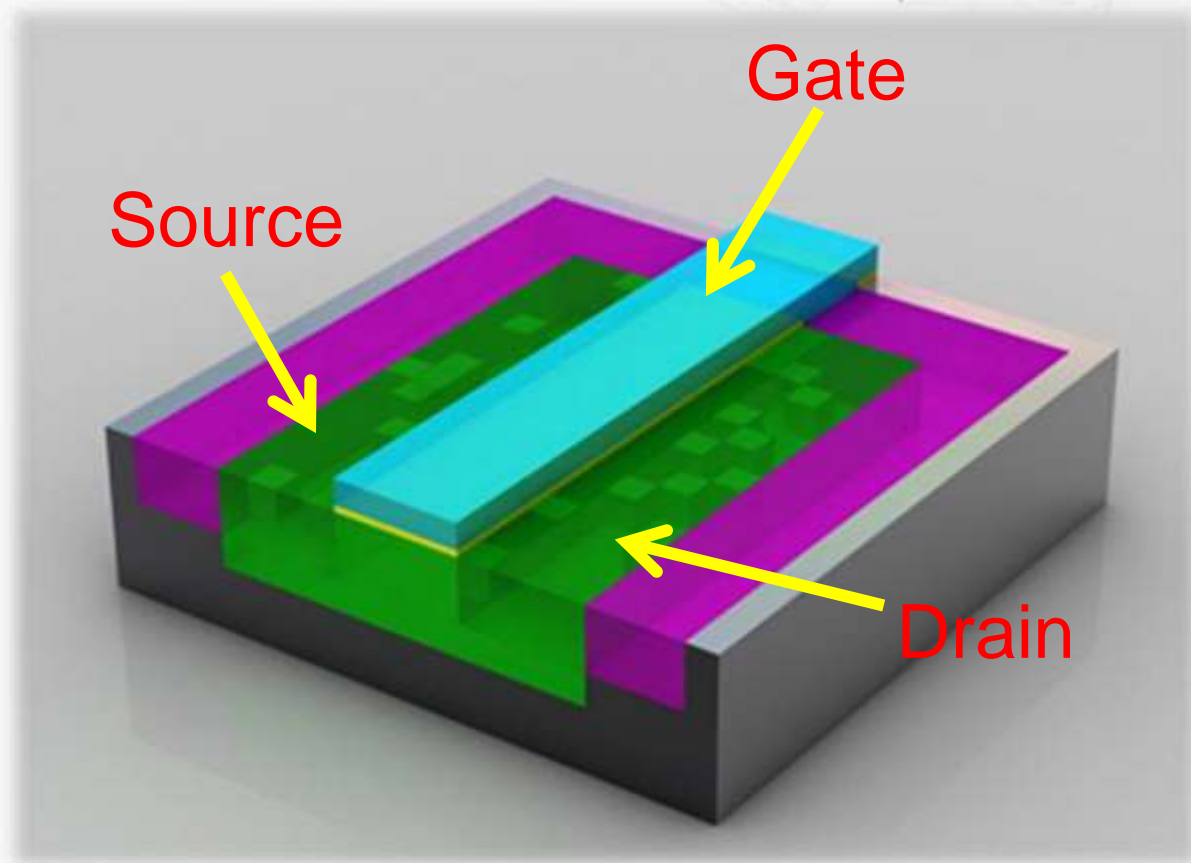
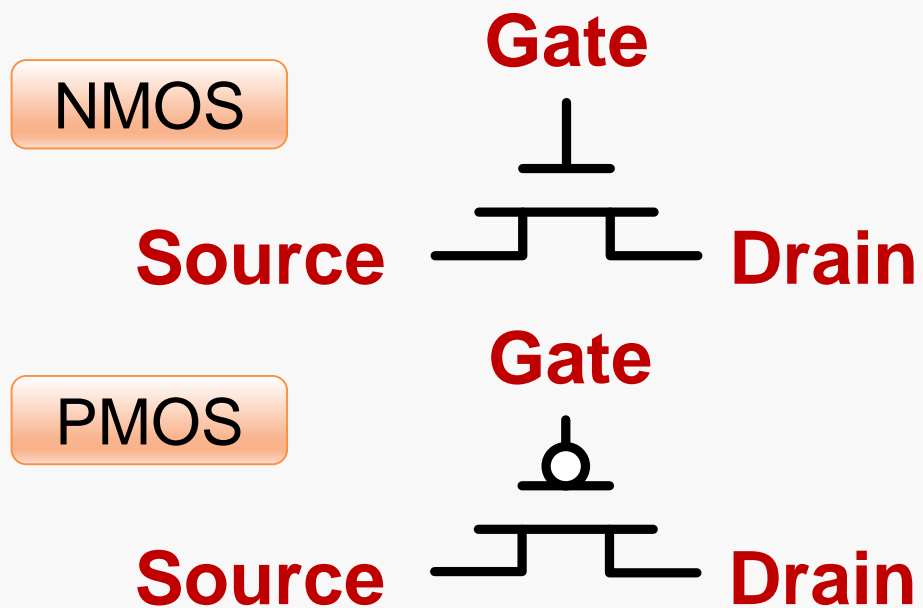
晶体管  
基本完成





# CMOS晶体管的基本特性

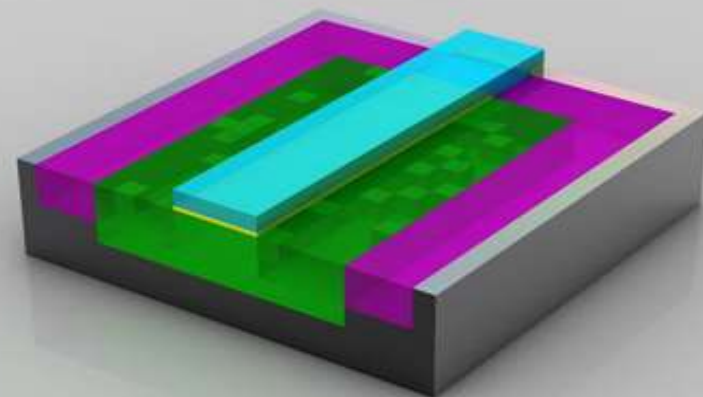
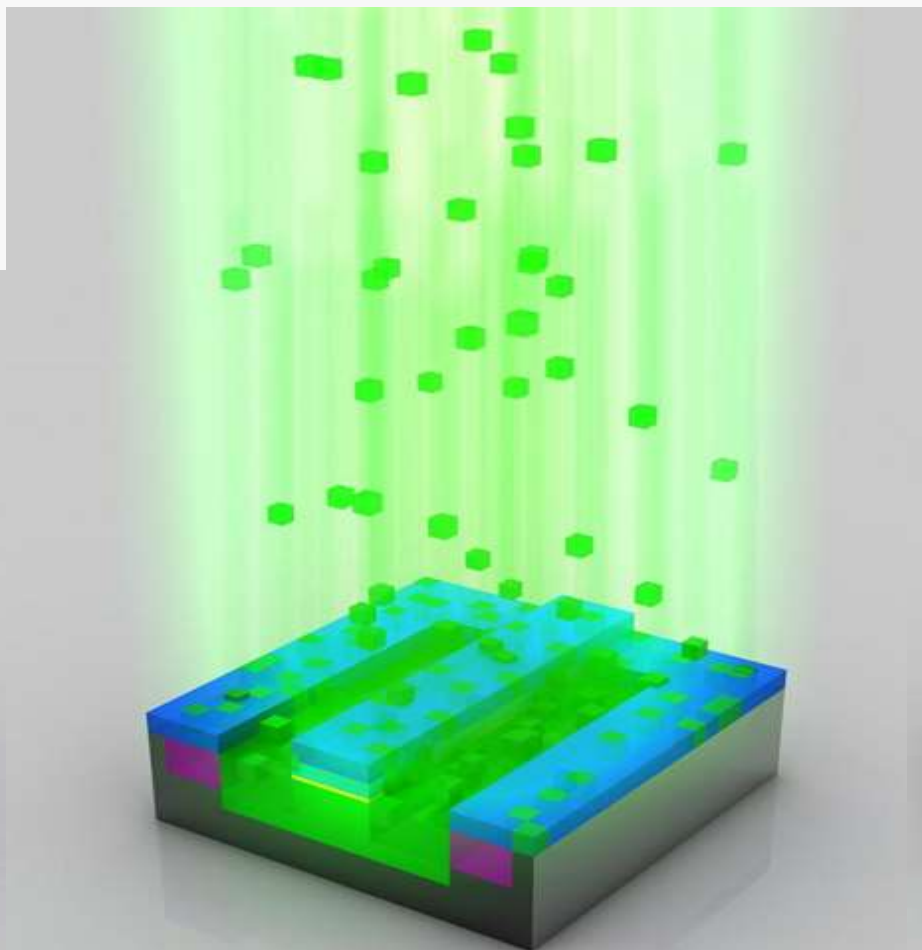
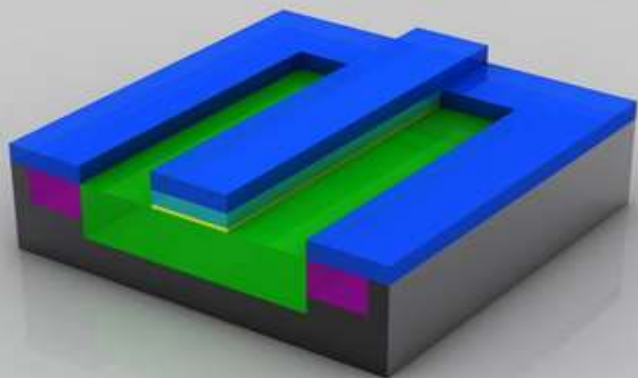
- 目前使用最广泛的晶体管
- 分N型和P型两种
  - NMOS: Gate为高电压时导通
  - PMOS: Gate为低电压时导通





# 第五阶段回顾

- ① 再次光刻
- ② 离子注入
- ③ 清除光刻胶

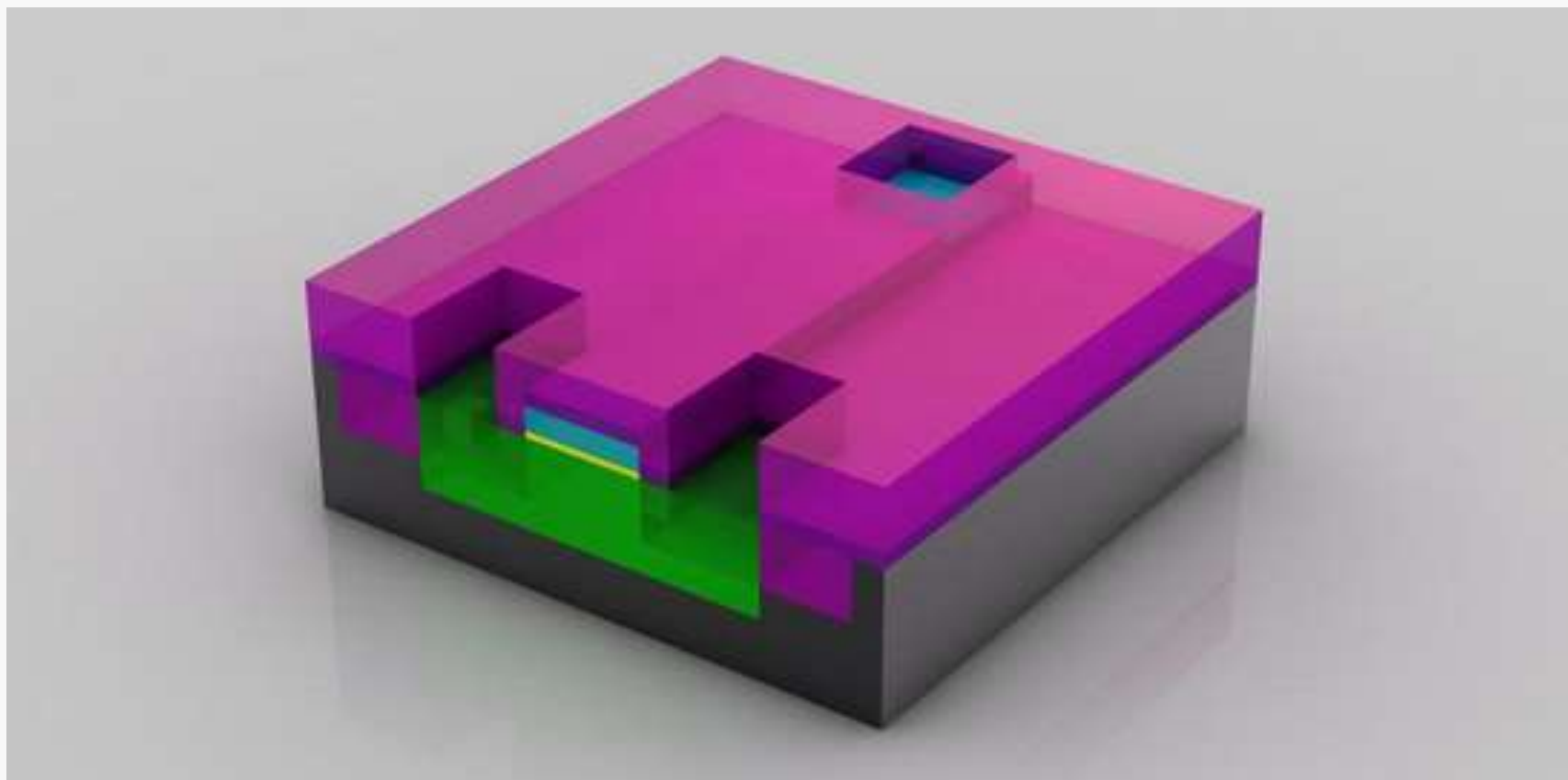


## 第六阶段（1）



### 关键词：绝缘体

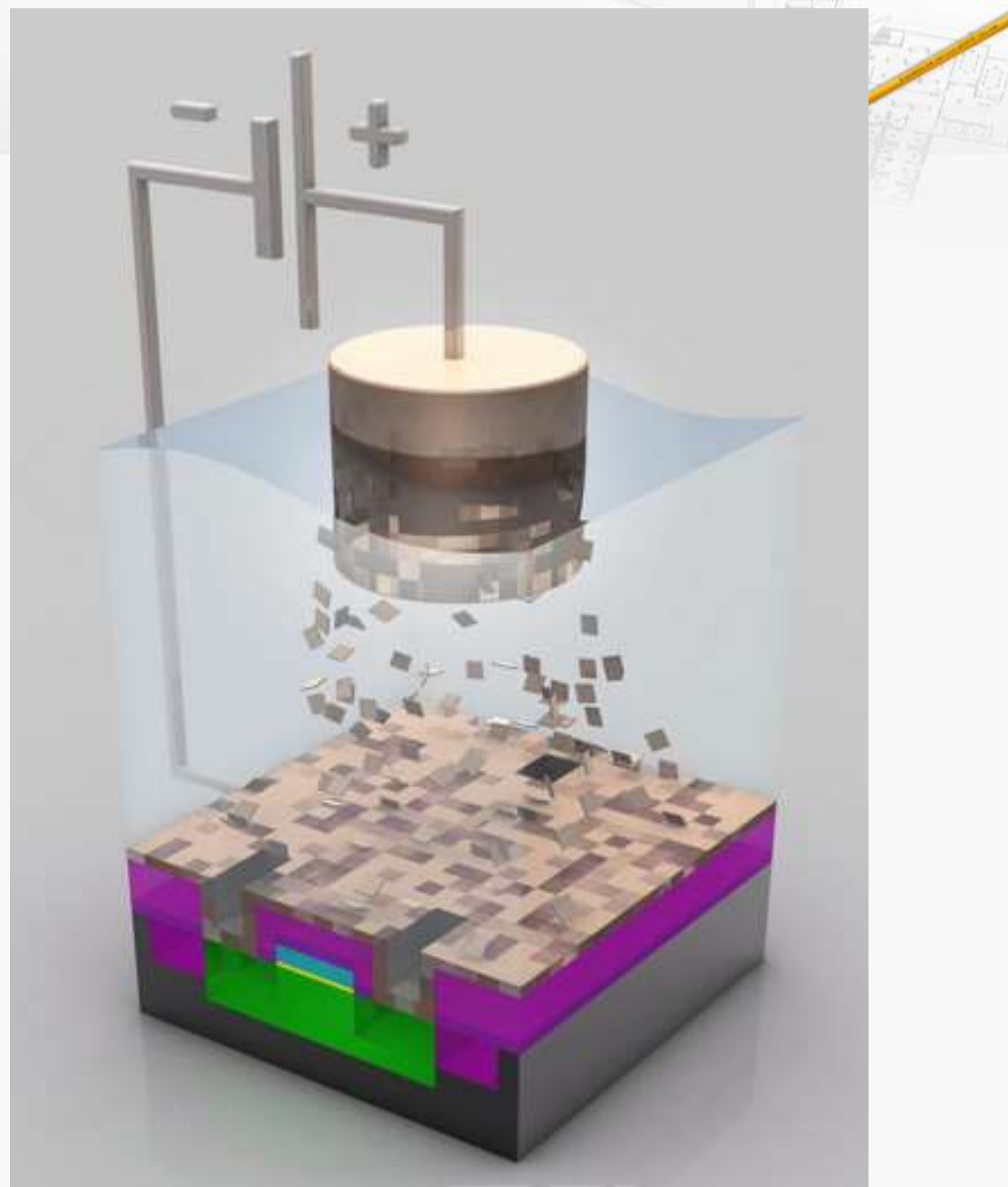
- 。在晶体管表面覆盖绝缘体（品红色）
- 。在绝缘体上蚀刻出三个孔洞，用于填充铜，以便和其它晶体管互连



## 第六阶段（2）

### 🔍 关键词：电镀

- 。在晶圆上电镀一层硫酸铜，铜离子会从正极走向负极，沉淀到晶体管上

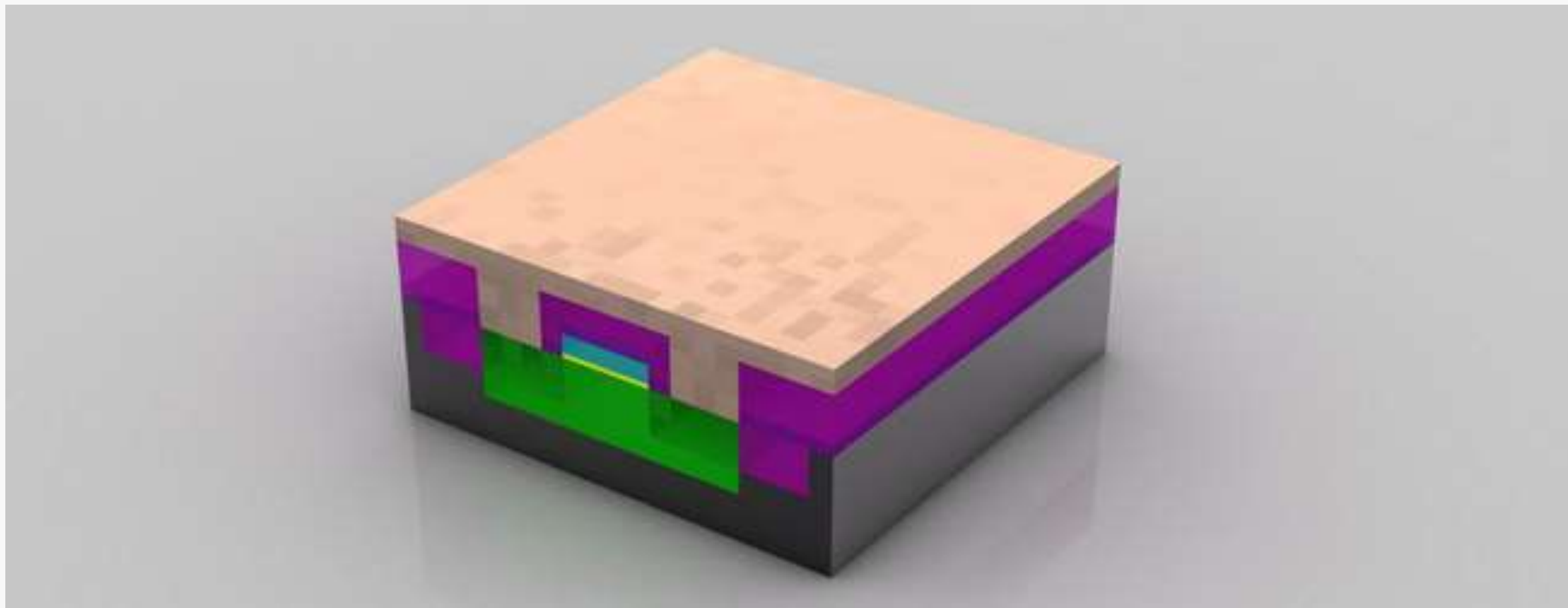


## 第六阶段（3）



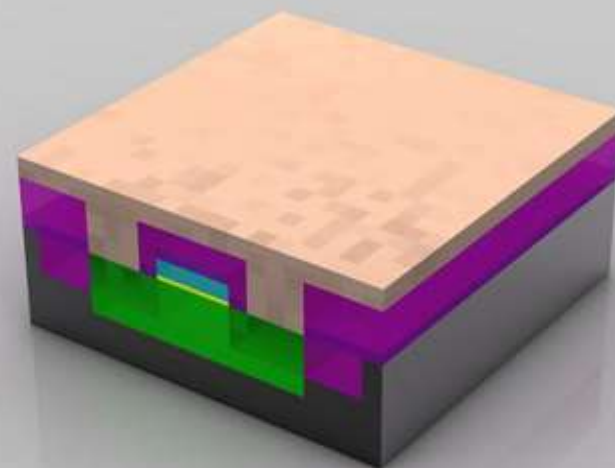
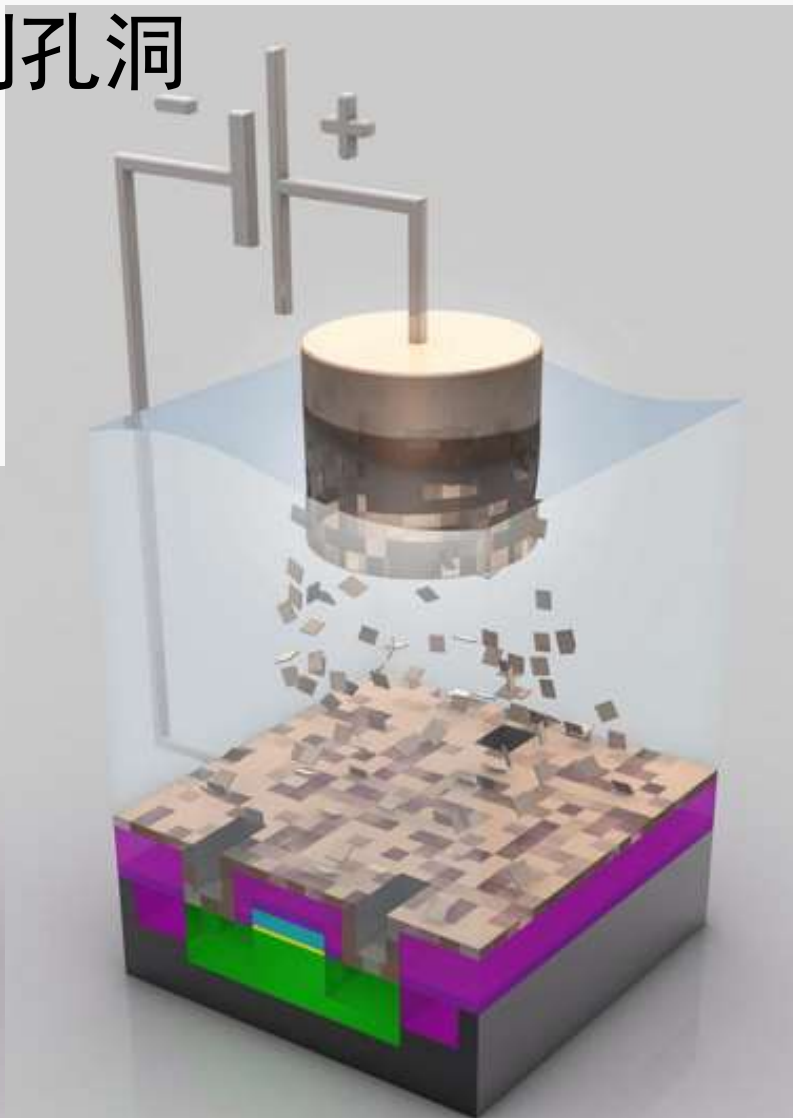
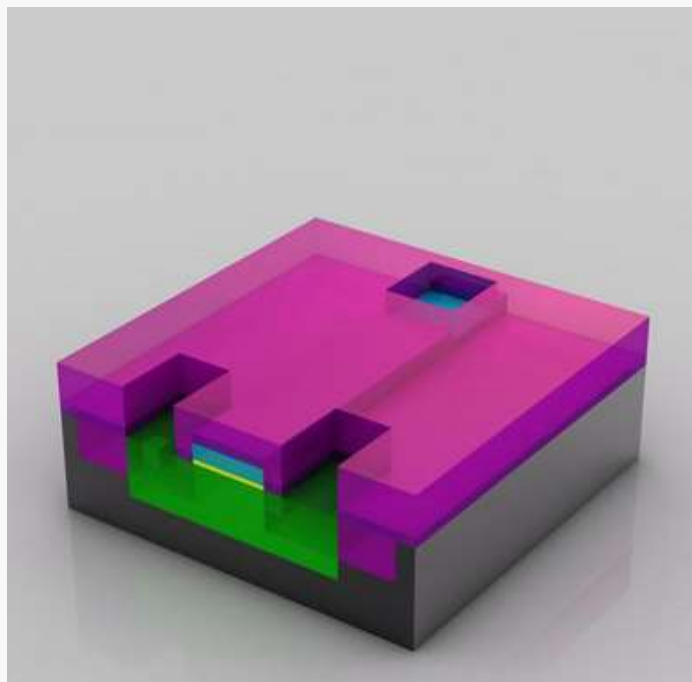
### 关键词：铜层

- 电镀完成后，铜离子沉积在晶圆表面，形成一个薄薄的铜层



# 第六阶段回顾

- ① 覆盖绝缘体并蚀刻孔洞
- ② 电镀
- ③ 形成铜层

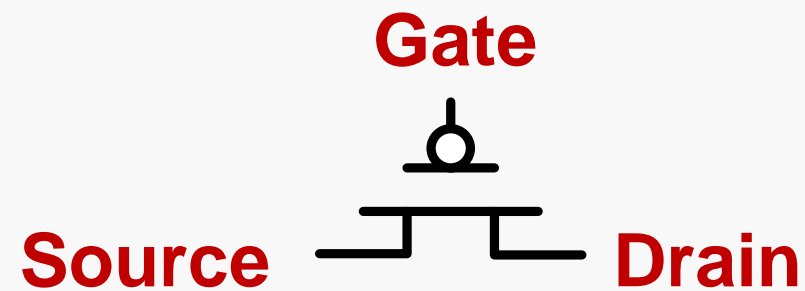
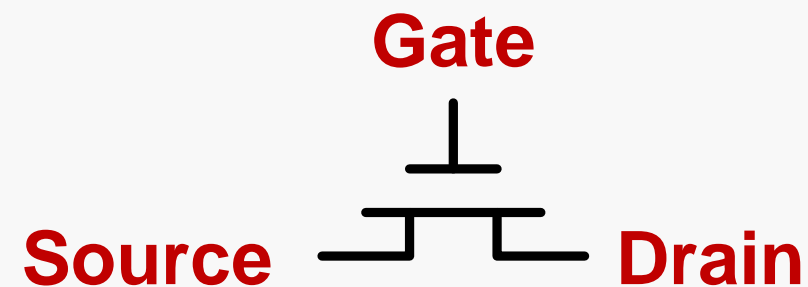
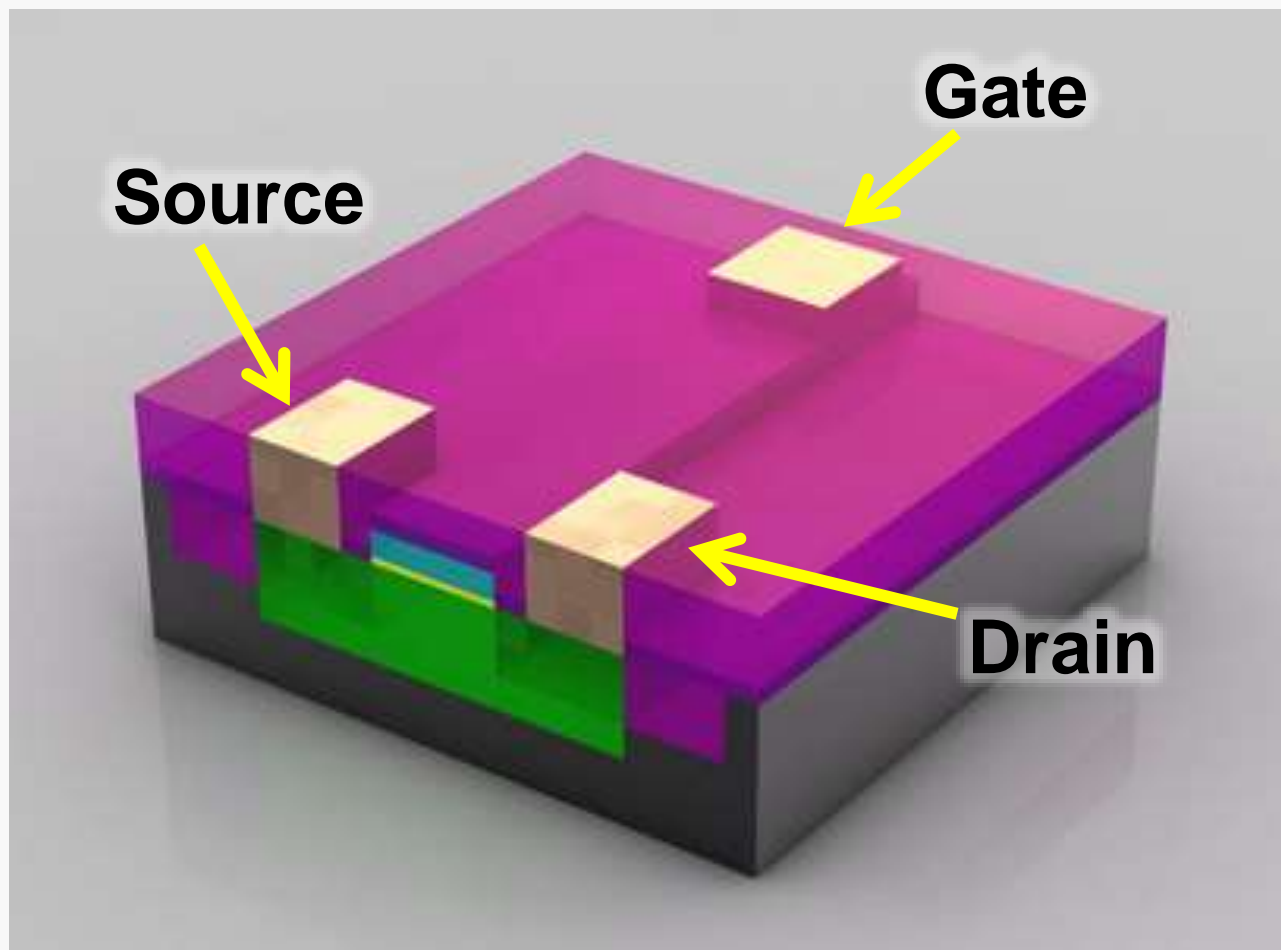




# 第七阶段（1）

## 关键词：抛光

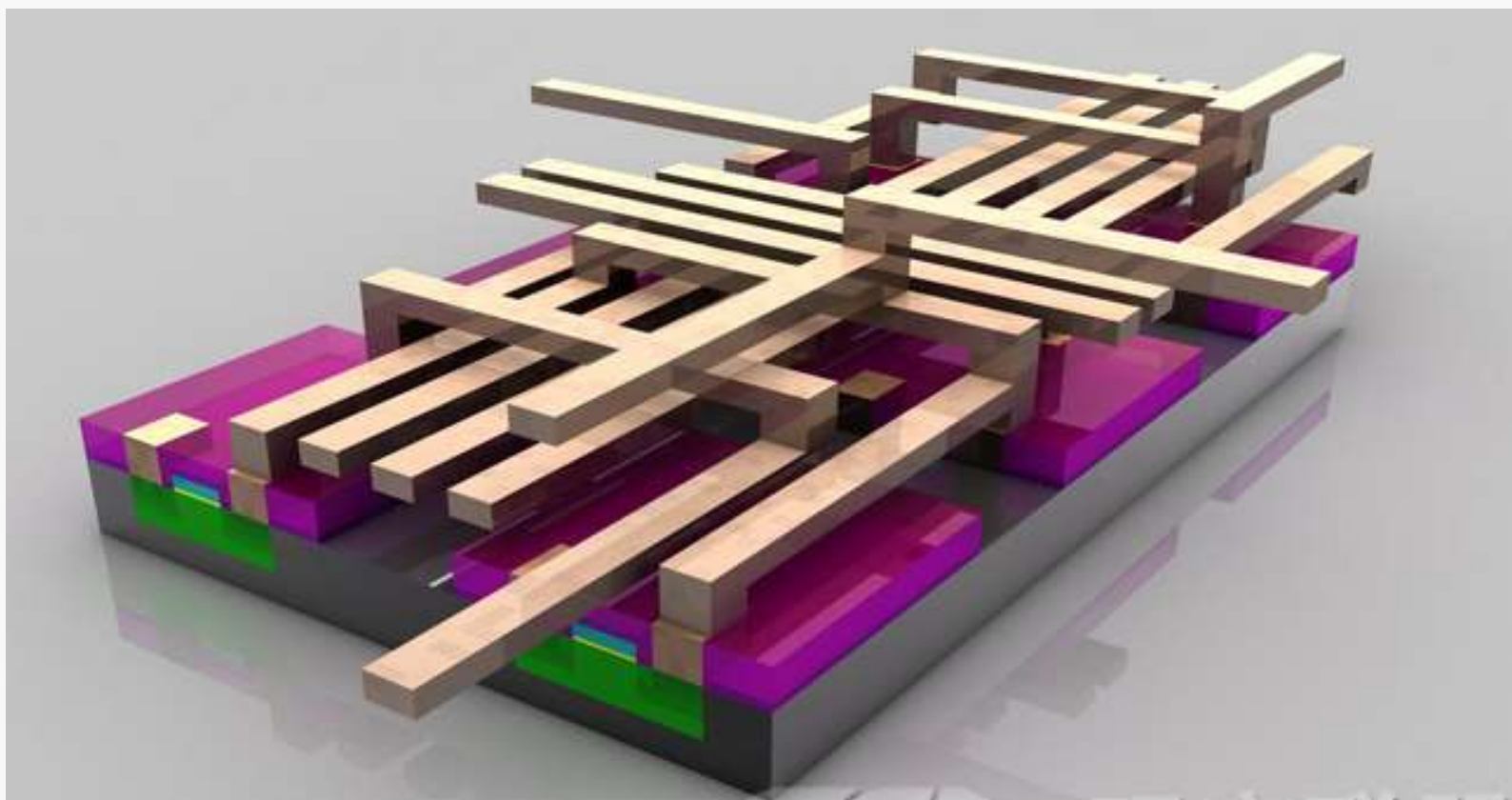
。通过磨光晶圆表面，将多余的铜抛光



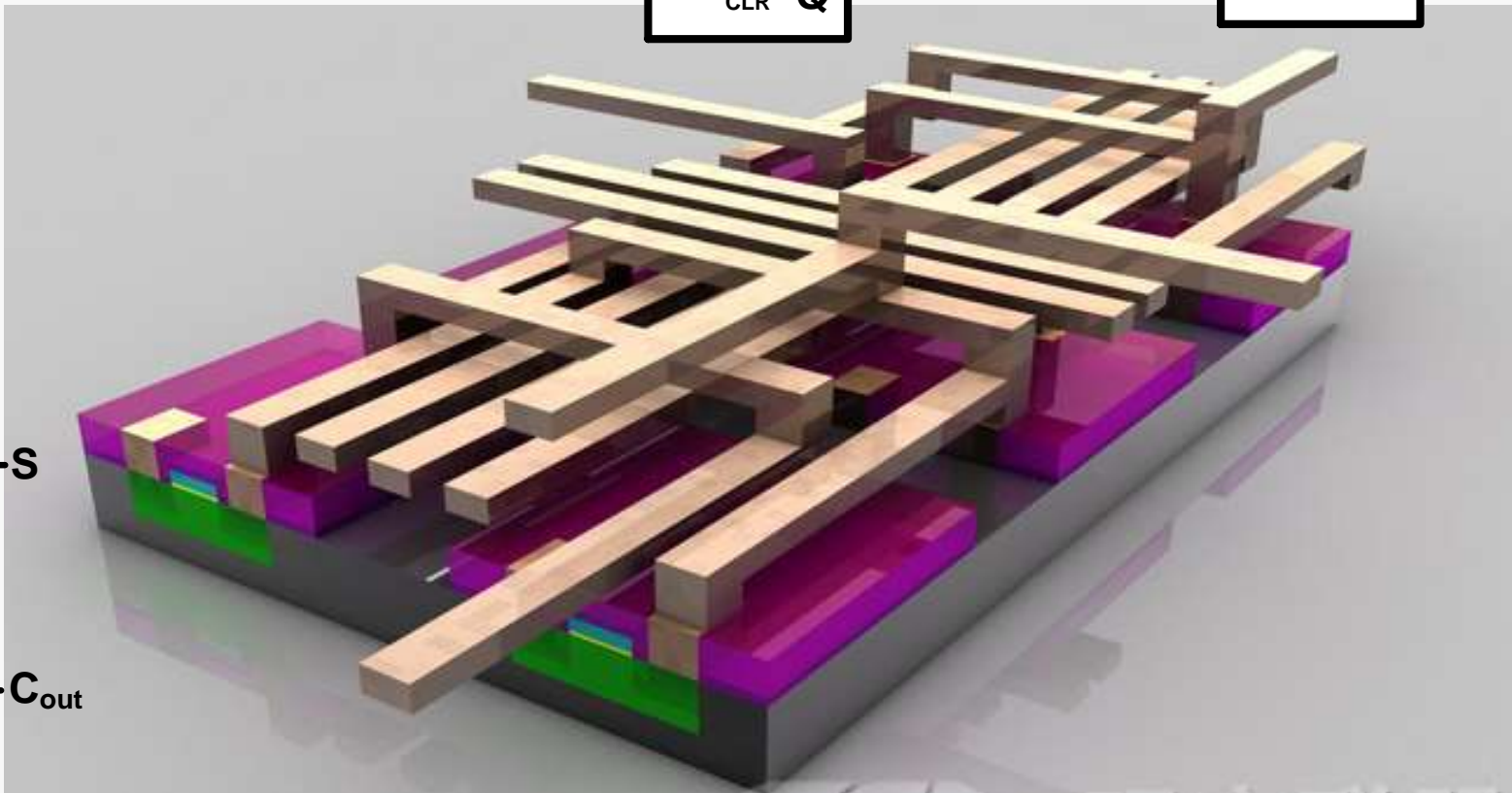
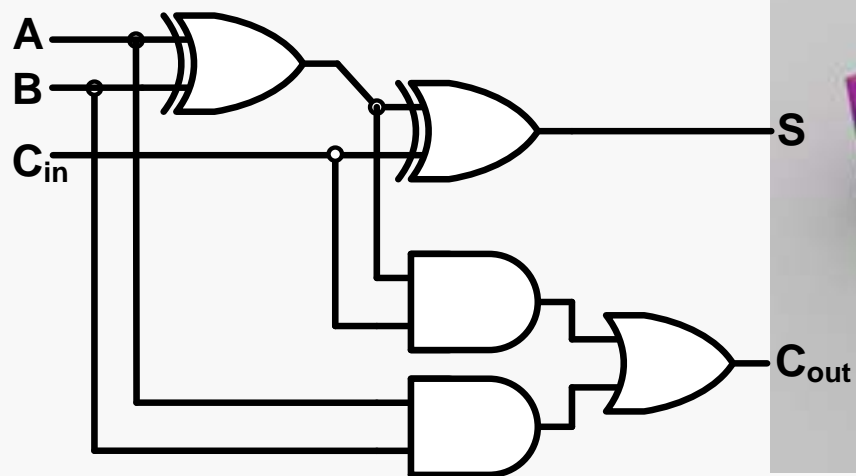
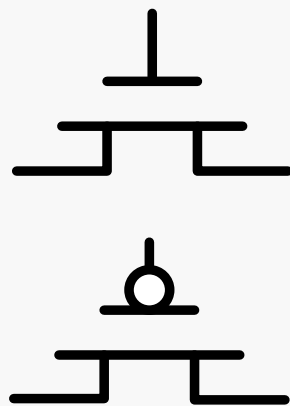
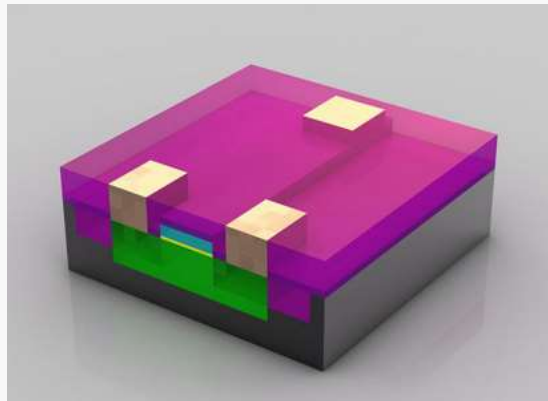
## 第七阶段（2）

### 🔍 关键词：金属层

- 。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CPU所需要的不同功能



# 第七阶段回顾

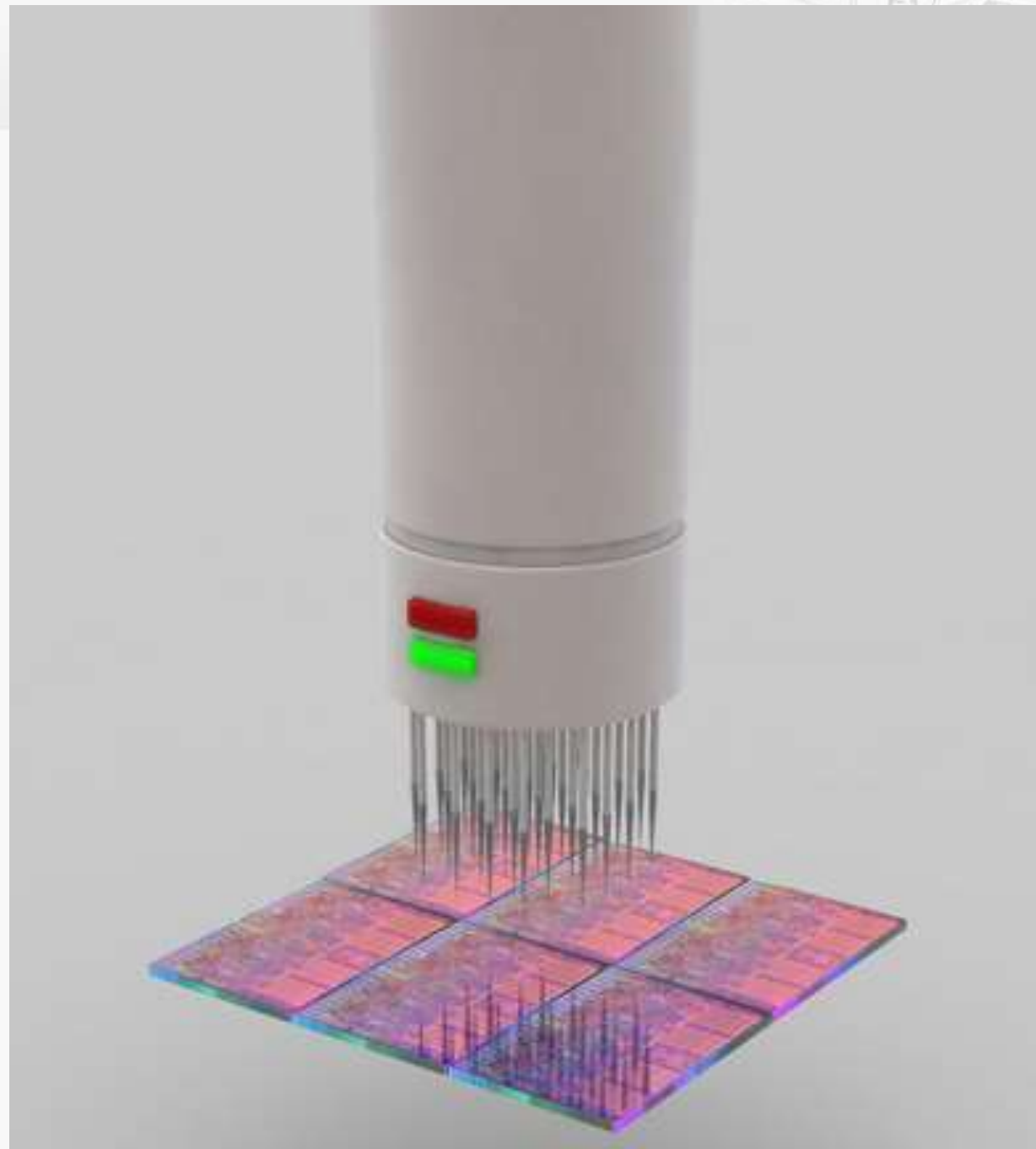




# 第八阶段（1）

## 晶圆测试

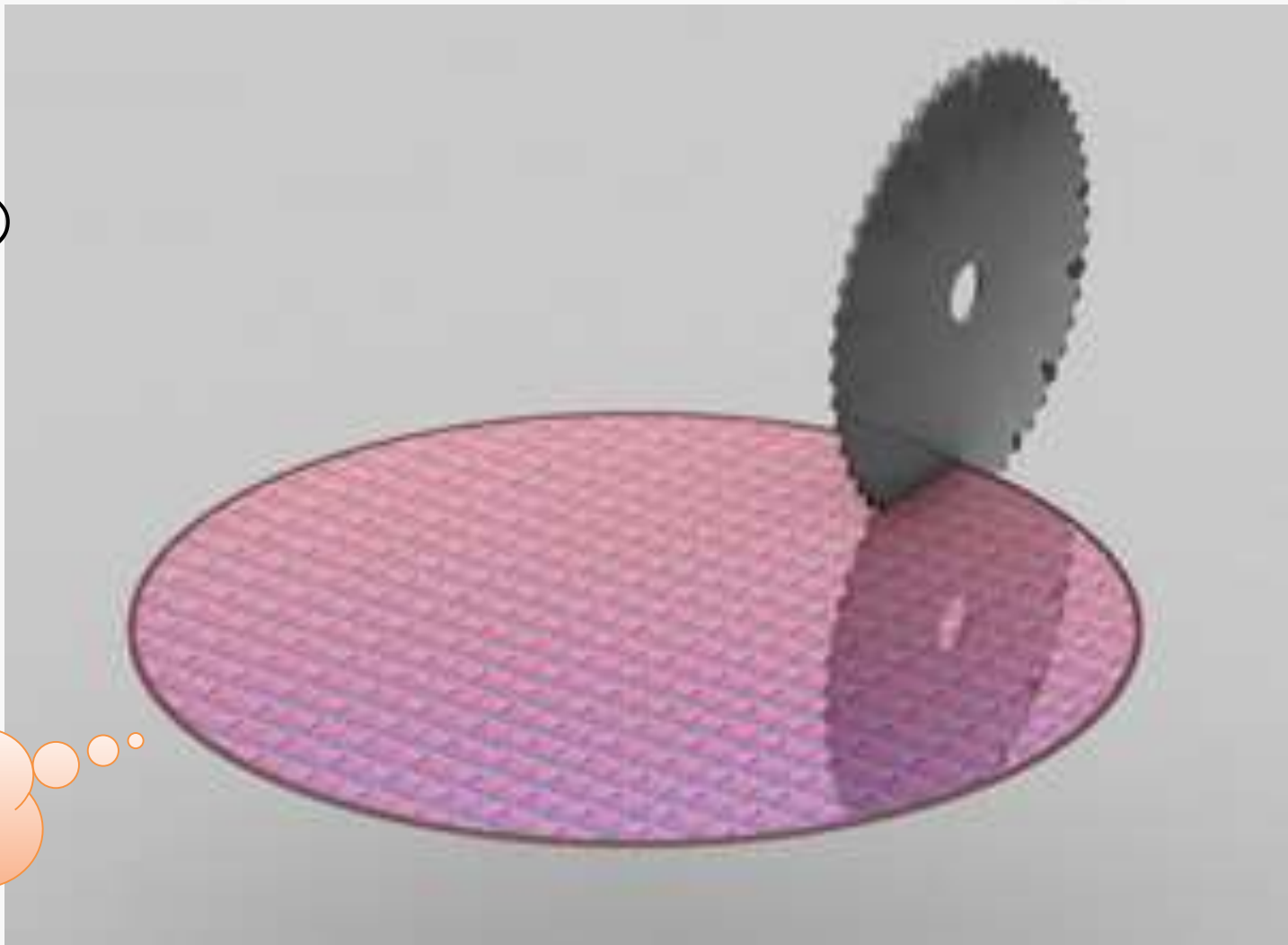
- 。图中是晶圆局部的六个CPU，每个CPU的尺寸约在0.5英寸（10毫米）量级
- 。功能性测试时，使用参考电路图案和每一块芯片进行对比



## 第八阶段（2）

- ④ 晶圆切片（Slicing）
  - 将晶圆切割成块
  - 每一块称为一个裸片（Die）
  - 裸片即是CPU的内核

12英寸  
(300毫米)  
晶圆



## 第八阶段（3）

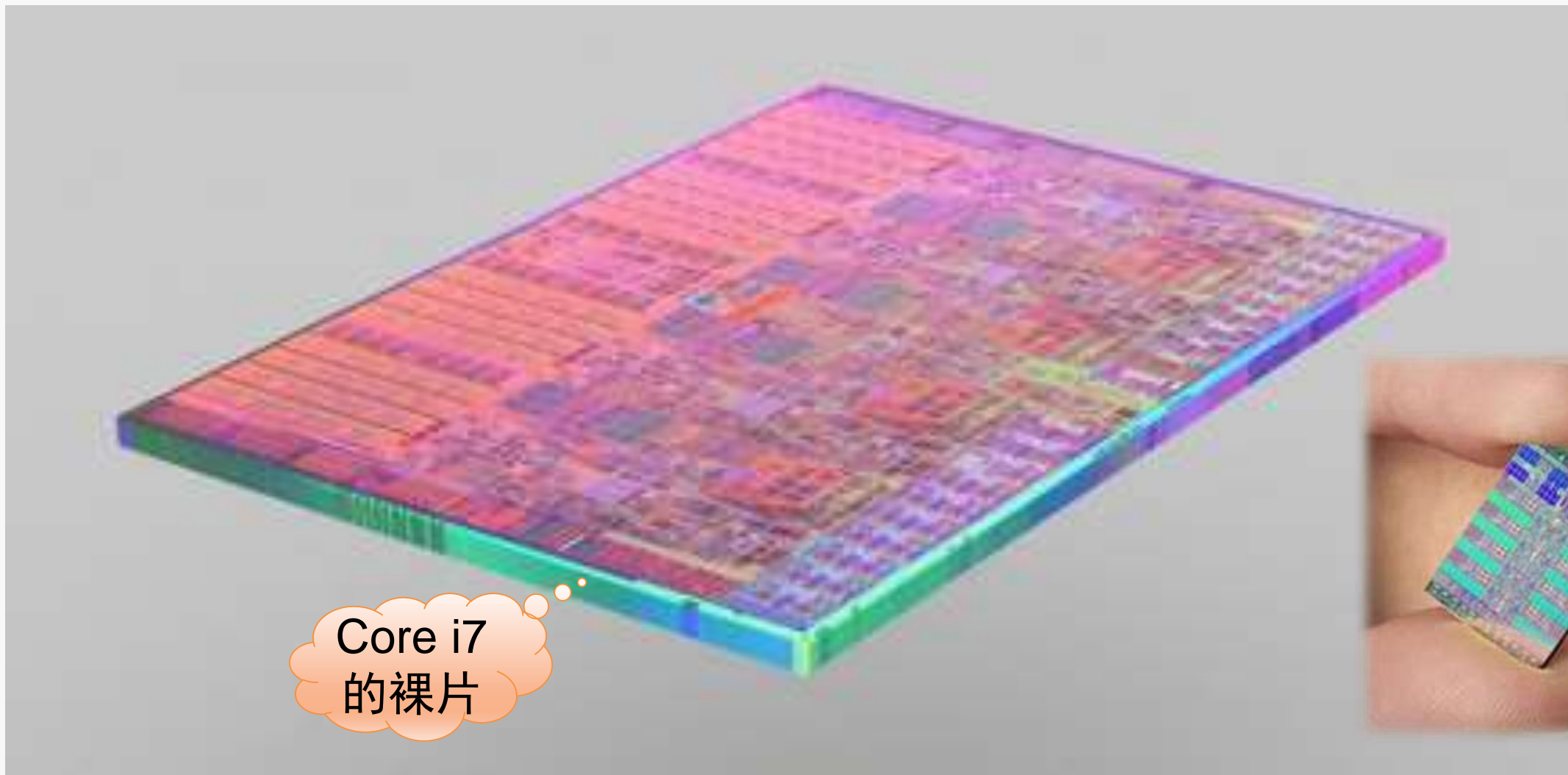
### 🔍 丢弃瑕疵内核

- 。测试过程中发现的有瑕疵的CPU裸片被抛弃，留下完好的准备进入下一步



## 第九阶段（1）

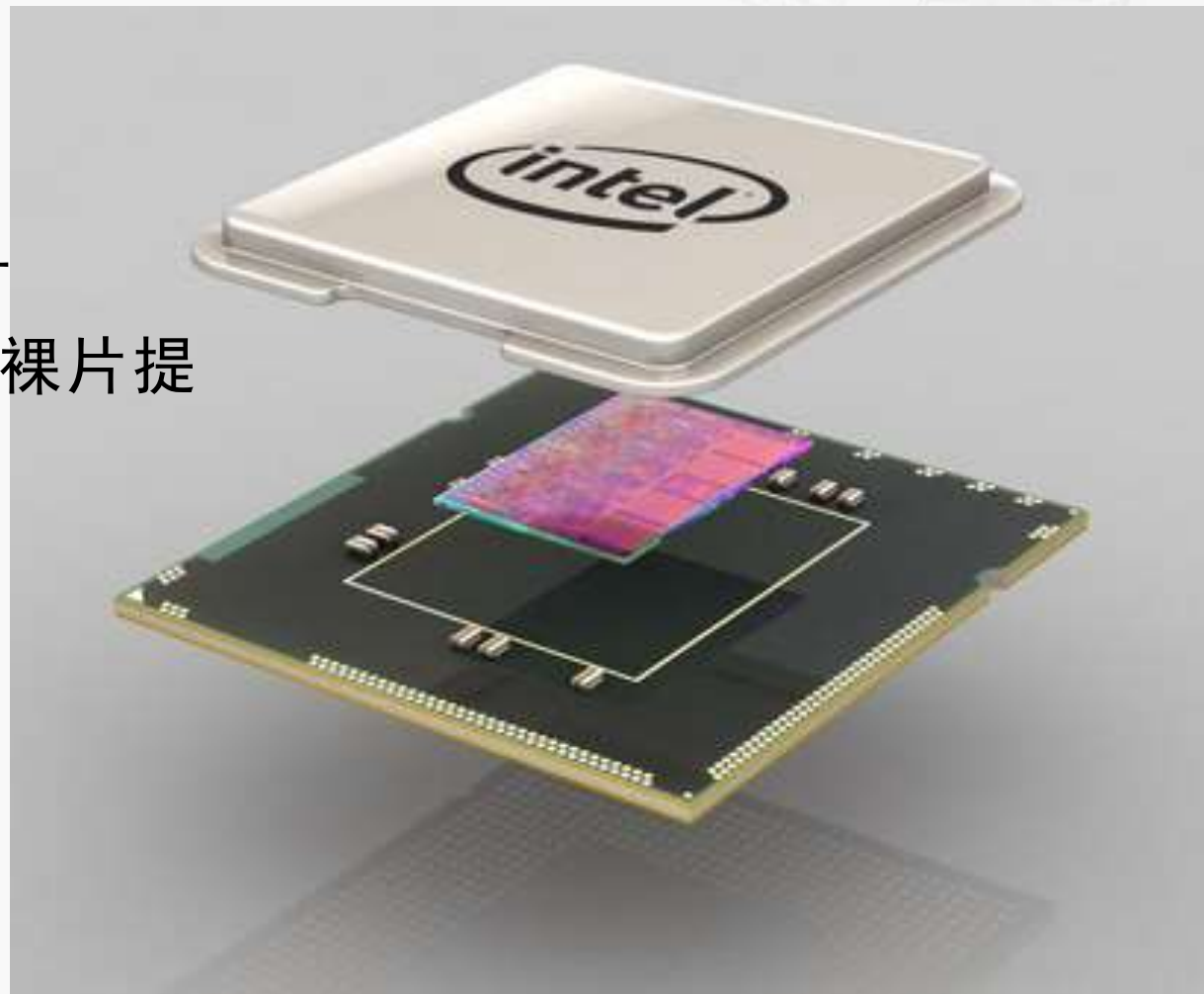
从晶圆上切割下来的单个CPU裸片



## 第九阶段（2）

### 封装

- 。封装尺寸在1英寸（20毫米）量级
- 。封装包括衬底、CPU裸片、散热片
- 。衬底相当于一个底座，并为CPU裸片提供电气与机械接口
- 。散热片为CPU裸片散热





# 第十阶段（1）

## 等级测试

- 。鉴别每颗CPU的关键特性，如最高频率、功耗、发热量等
- 。据此决定CPU等级（高端型号还是低端型号）



## 第十阶段（2）

### 🎯 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
- 。交付OEM厂商，或进入零售市场

实际的CPU制造过程包括数百个步骤，这里只是展示了其中的一些关键步骤





# 本讲到此结束，谢谢 欢迎继续学习本课程

计算机组织与体系结构 Computer Architectures  
主讲：陆俊林