

2021-2022学年秋季学期

## 第三部分 CMOS门电路

授课团队：宋威

助    教：薛子涵

# CMOS门电路

现在的超大规模逻辑电路（VLSI: Very Large Scale Integration）基本都是由CMOS门电路构成的（数字部分）。

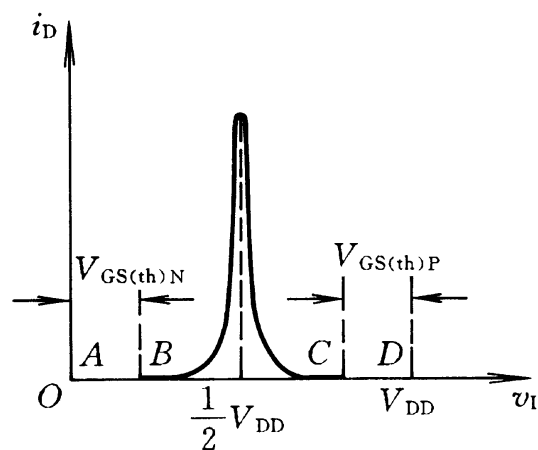
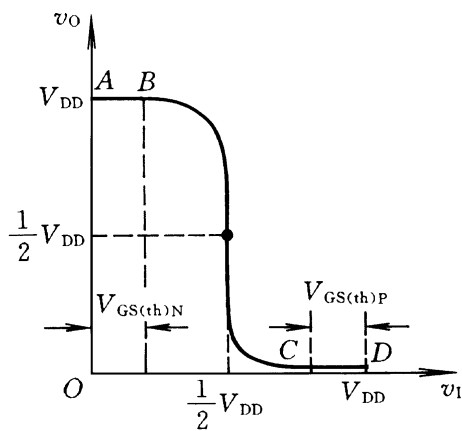
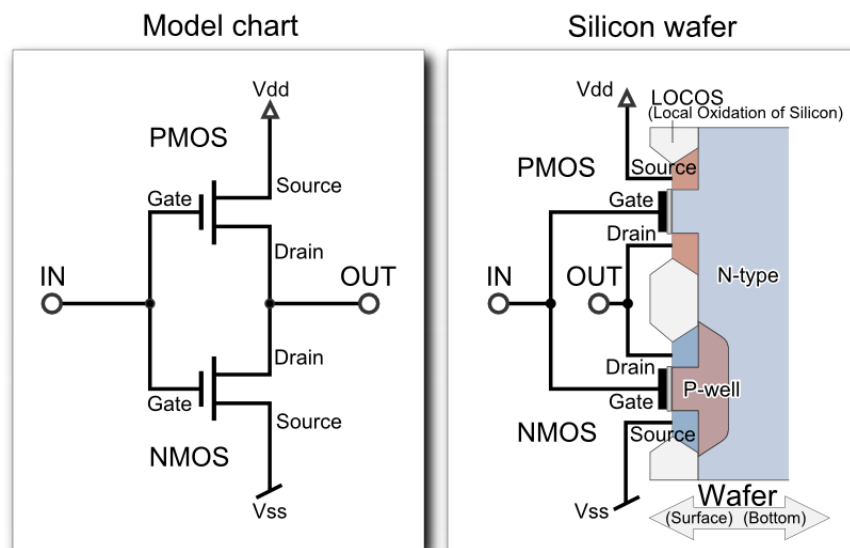
在这门课中，我们只介绍CMOS门电路，有关TTL门电路或者BiMOS门电路，请参阅教材第三章的对应部分。有关使用CMOS/TTL电路构造模拟电路，请参考模拟电路的相关教材。

CMOS: Complementary metal-oxide-semiconductor  
互补MOS工艺，或者互补金属氧化物半导体工艺。

# CMOS反门

## CMOS反门就是用CMOS工艺构造的反门

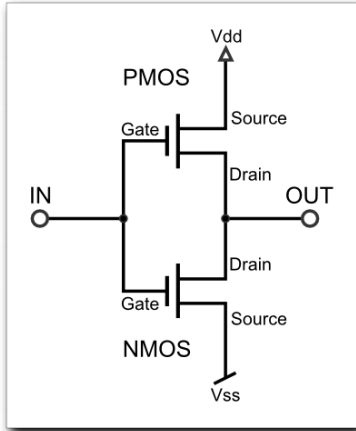
CMOS inverter



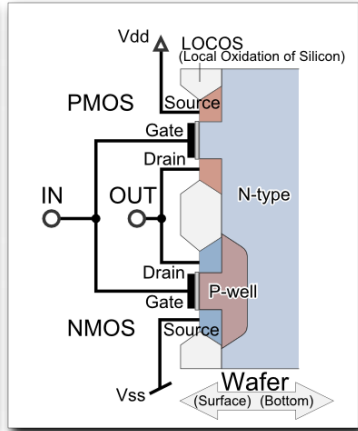
# CMOS反门

CMOS inverter

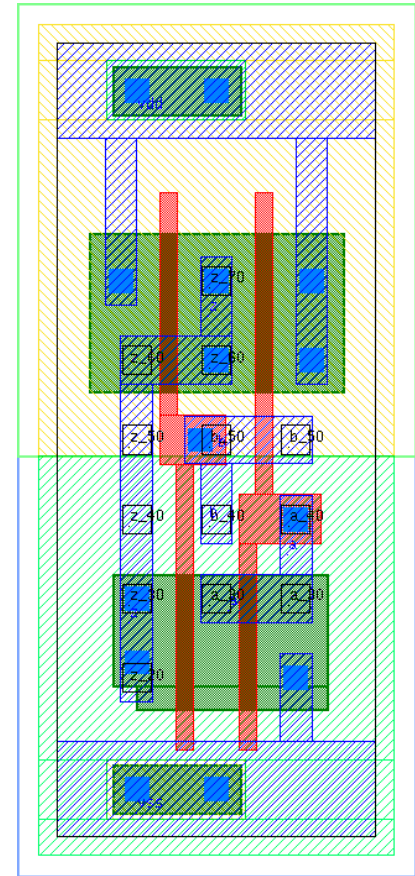
Model chart



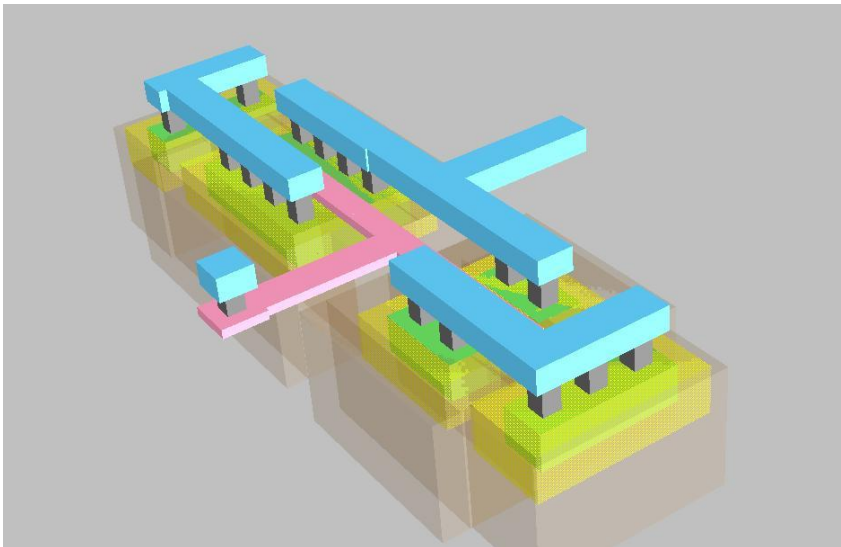
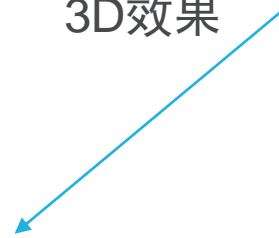
Silicon wafer



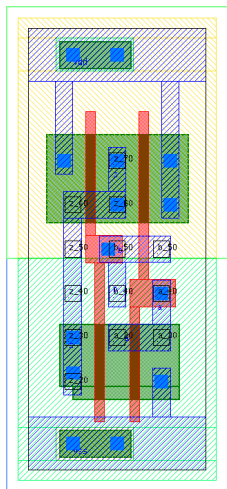
版图



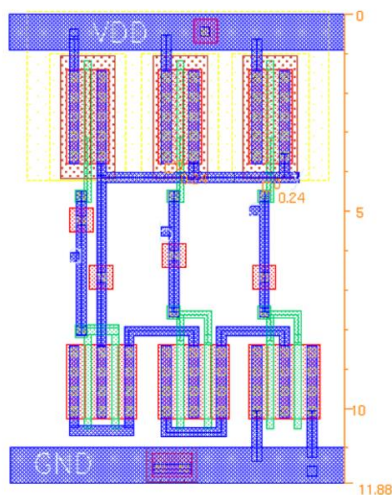
3D效果



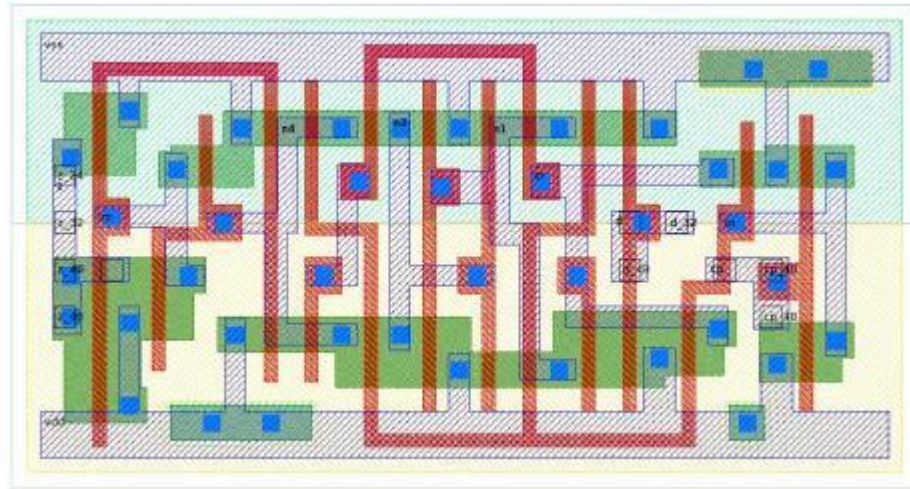
# CMOS门



反门



三输入与非门



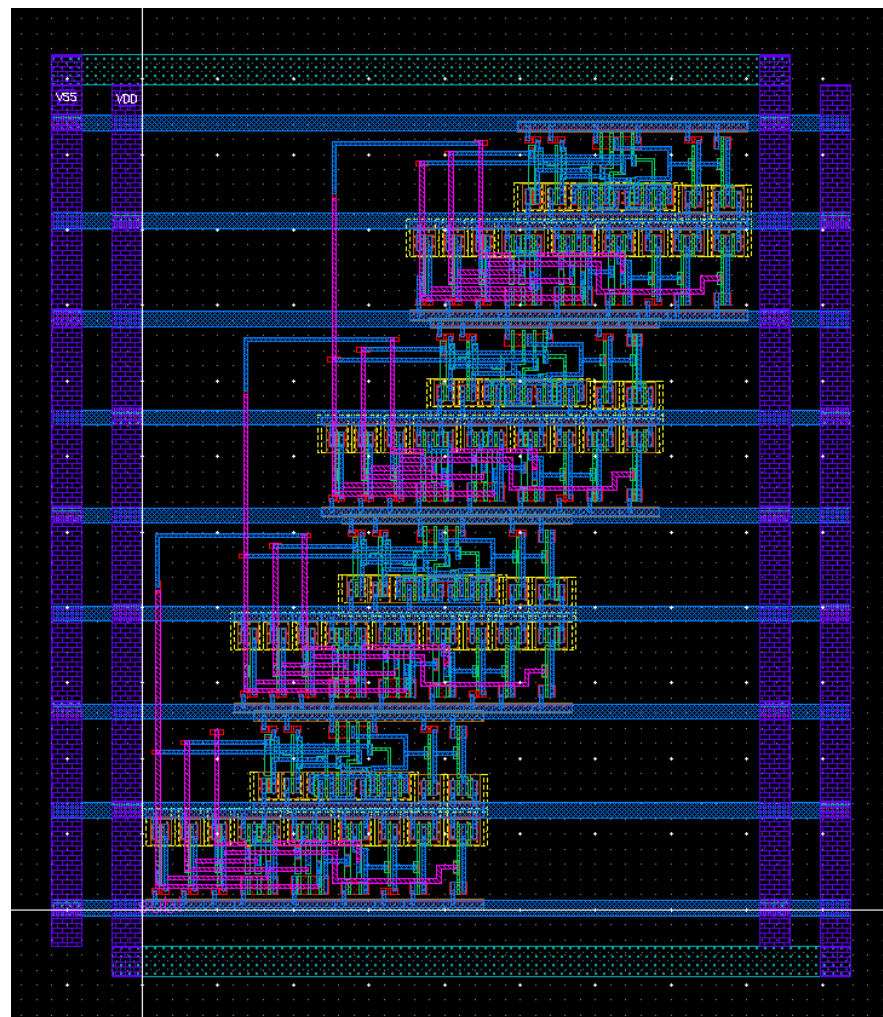
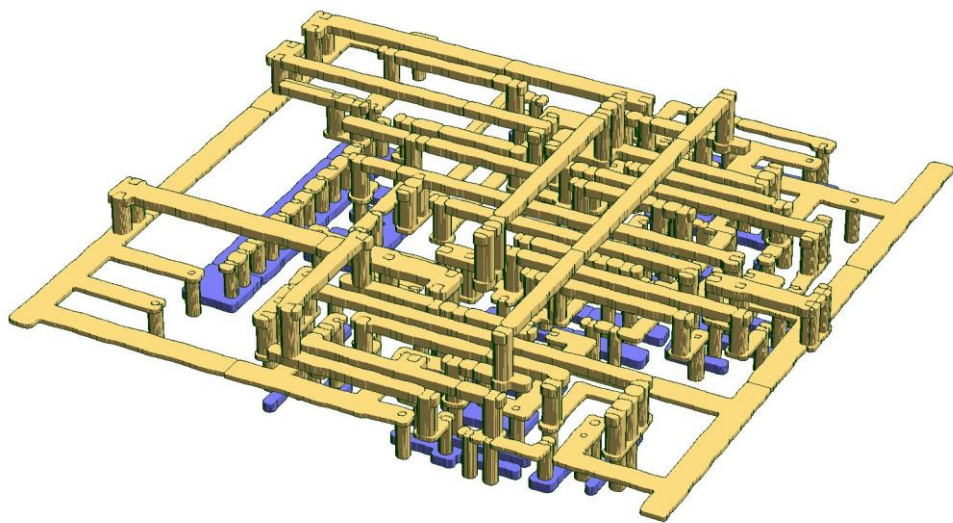
寄存器

- 高度一样，一边VDD一边GND。
- 根据复杂度的区别，宽度不一样。
- VDD一边都是PMOS晶体管，GND一边都是NMOS晶体管
- 晶体管之间用poly或者第一层金属层(M1)连接
- 第一层金属宽度一样，可以拐弯（越来越难）



# CMOS门电路

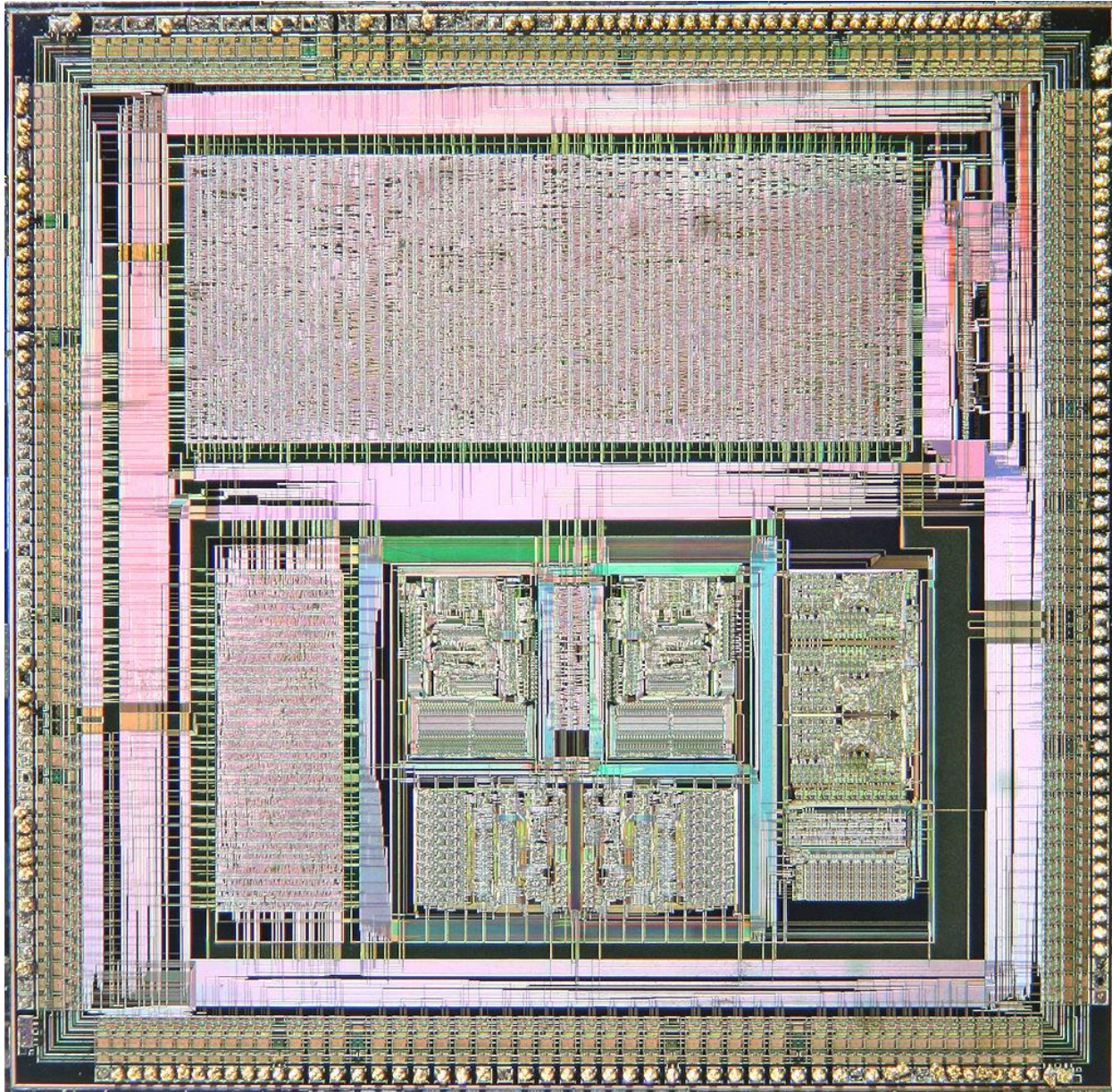
- 利用多个CMOS门搭建更复杂的CMOS电路。
- CMOS门被放置在一排一排平行的row中，相邻的row共享VDD或GND。
- 相邻row的CMOS门方向相反。
- CMOS门之间通过多层金属导线连接
- 底层的金属导线较细，用于信号连接。
- 不同层的金属导线方向正交。
- 不同层之间用via连接。
- 顶层的导线较粗，用于电源（VDD/GND）连接。



Booth 乘法器



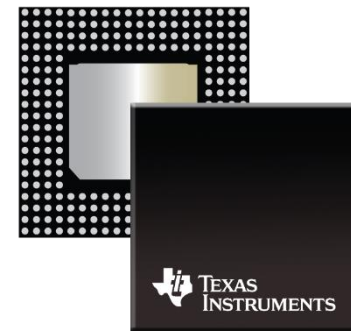
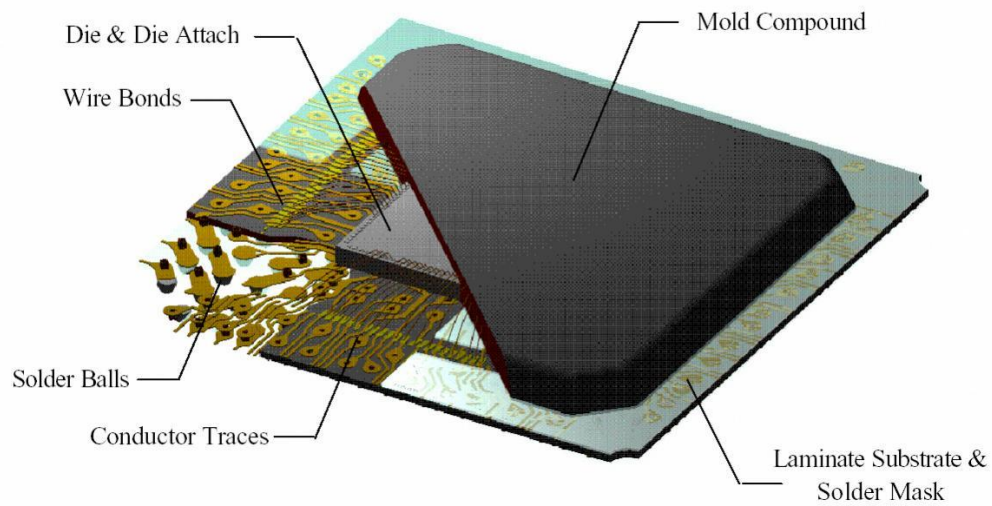
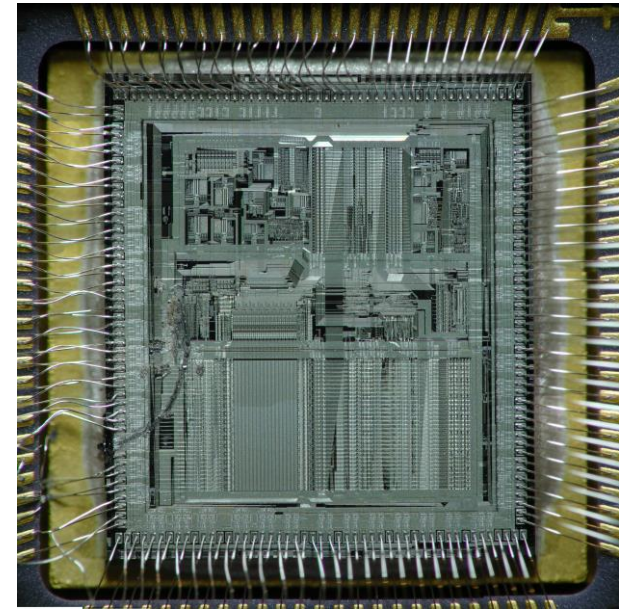
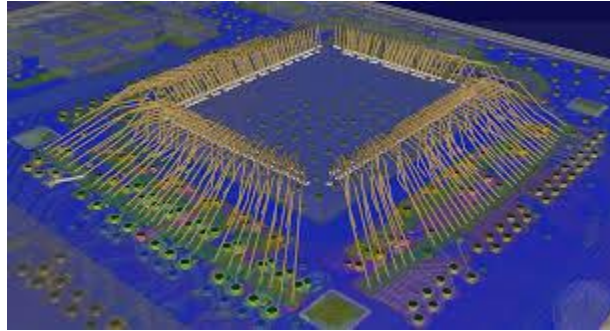
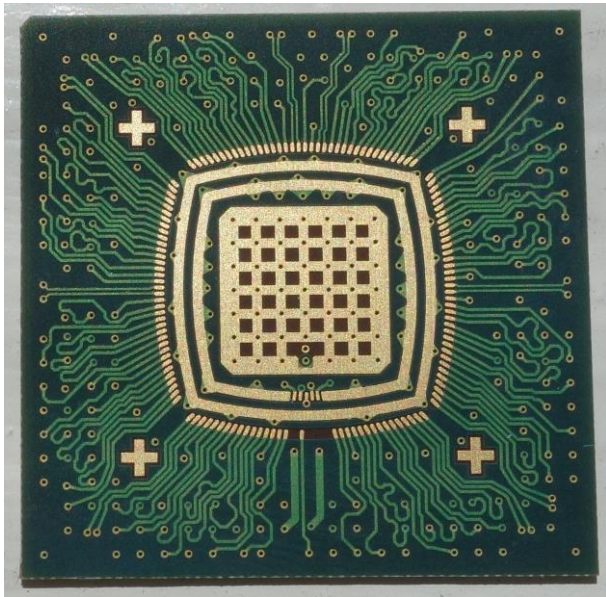
# CMOS集成电路芯片



- die
- 放置IP， 布局布线
- IO pad
- Power ring/rail
- routing

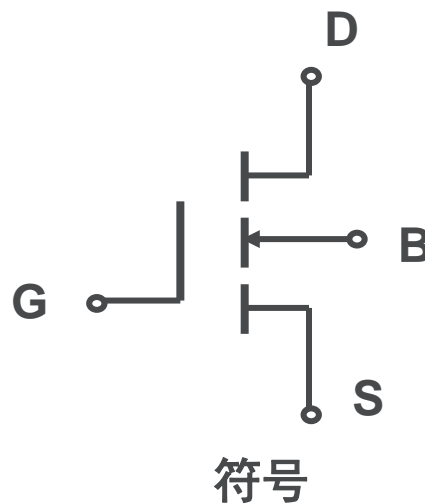
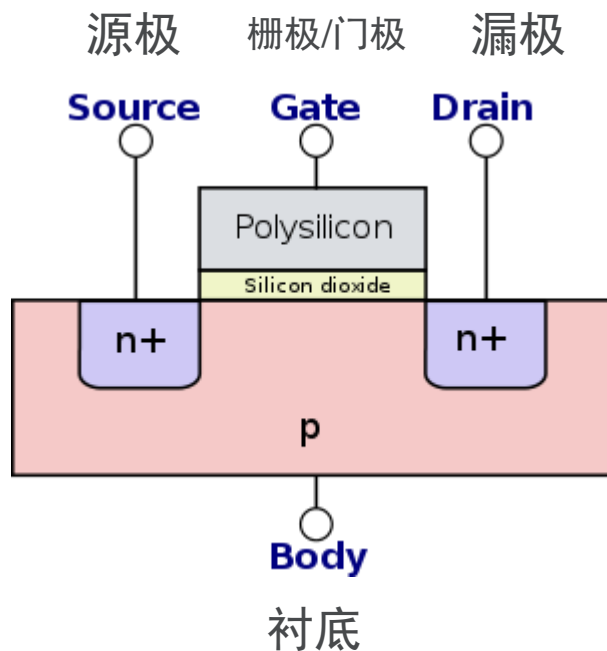


# CMOS集成电路芯片

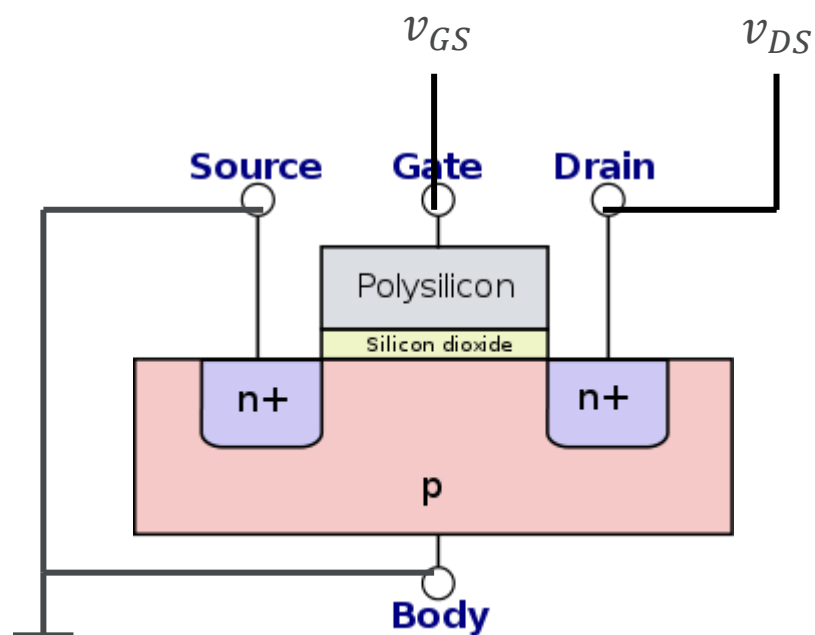




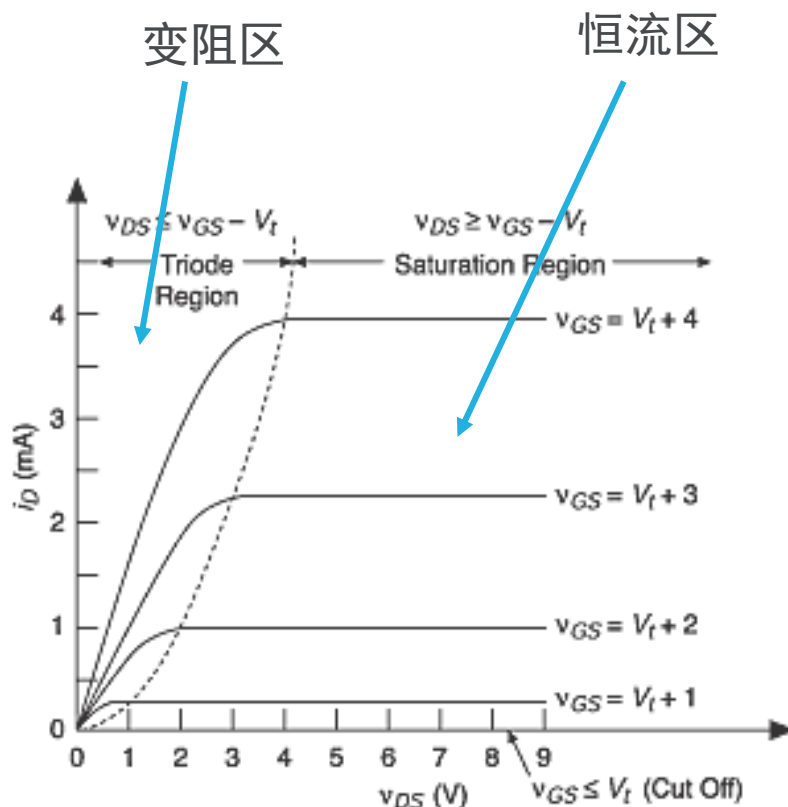
# MOS晶体管—NMOS



# NMOS基本特性

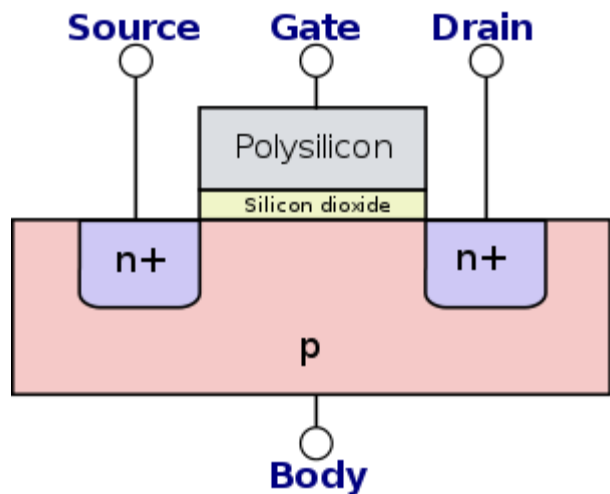


当 $v_{GS} > 0$ 时，衬底中的电子被G吸引，形成N型沟道。联通S和D。

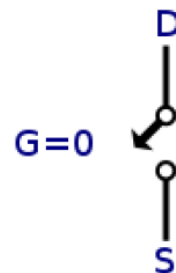


在数字电路中，NMOS管工作在变阻区和截止区。状态稳定时， $v_{GS}$ 要么接近于0，要么大于阈值电压 $v_t$ ，电流 $i_{DS}$ 总是接近于0。

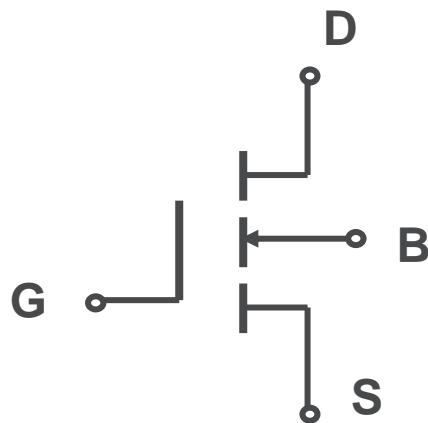
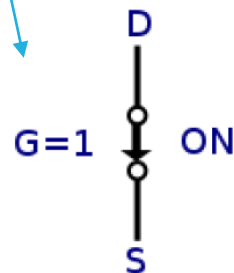
# NMOS开关电路



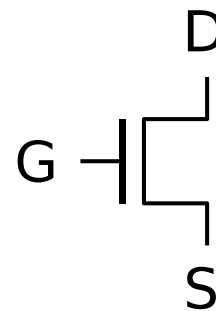
$v_{GS} = 0$



$v_{GS} = VDD$



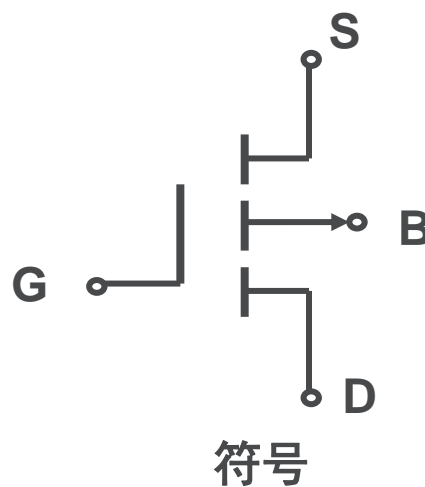
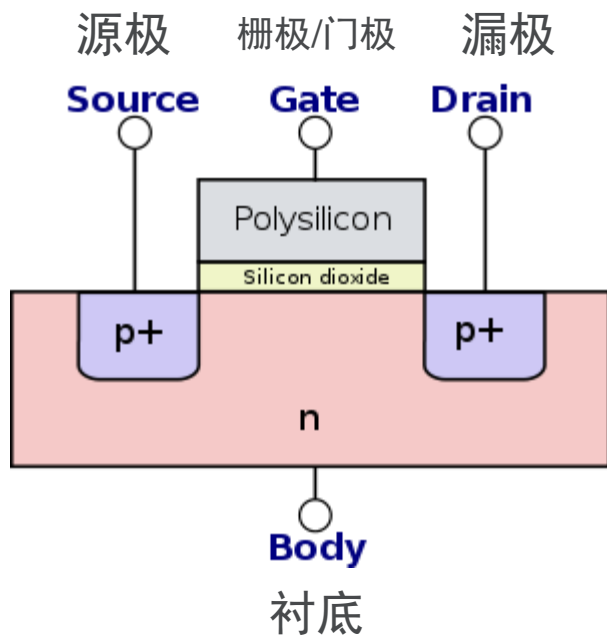
符号



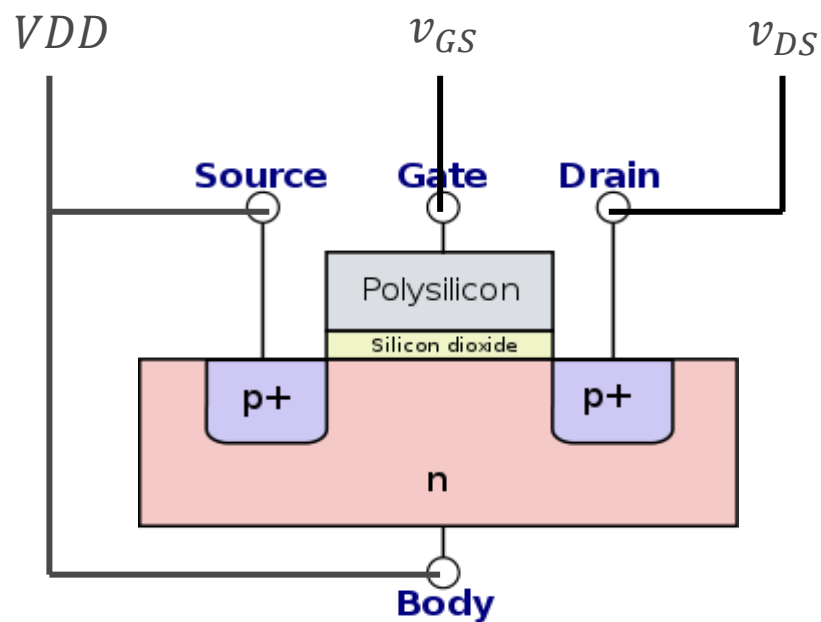
NMOS的简化符号



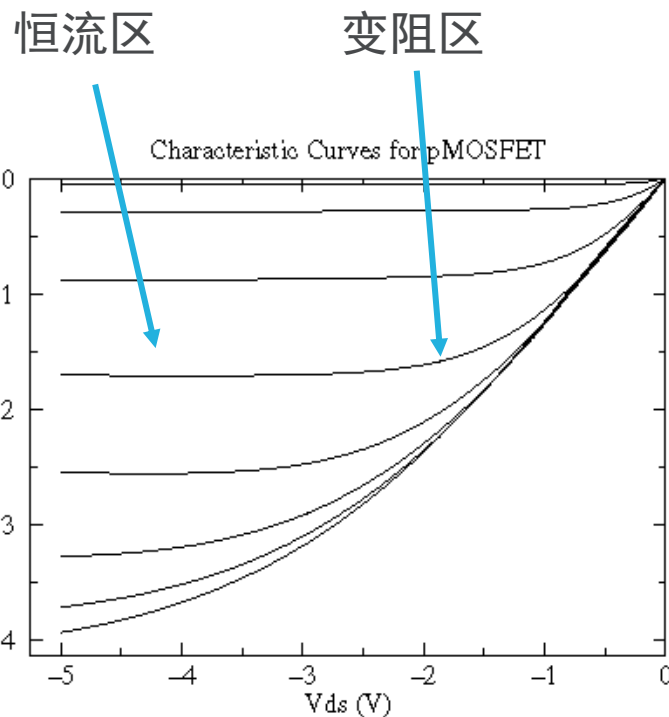
# MOS晶体管—PMOS



# PMOS基本特性



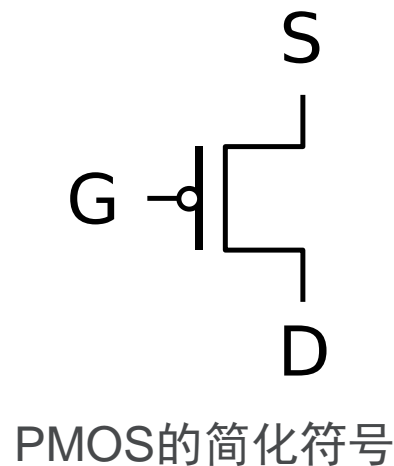
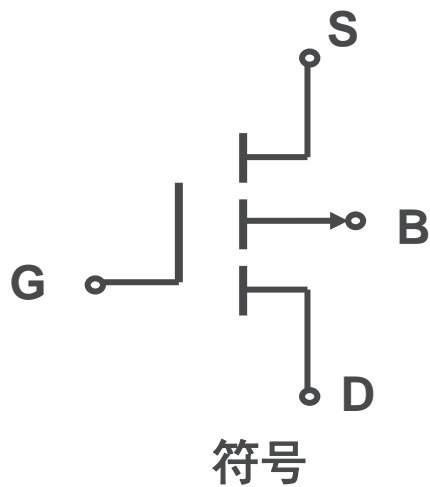
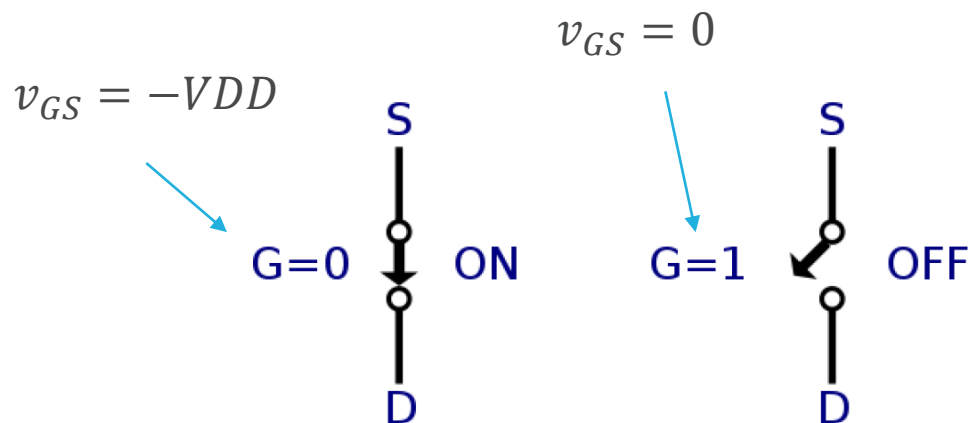
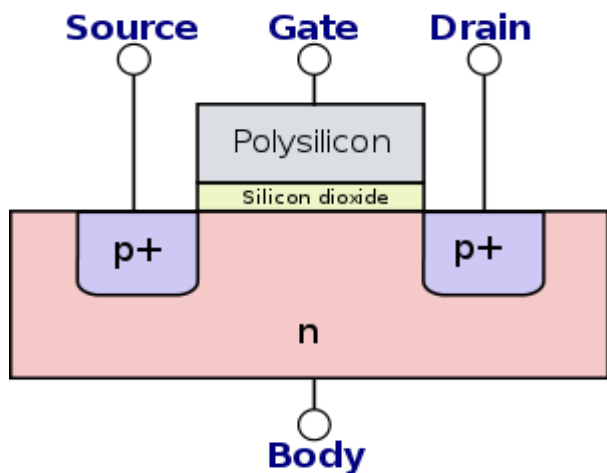
当  $v_{GS} < 0$  时，衬底中的空穴被G吸引，形成P型沟道。连通S和D。



在数字电路中，PMOS管工作在变阻区和截止区。状态稳定时， $v_{GS}$  要么接近于0，要么小于阈值电压  $-v_t$ ，电流  $i_{DS}$  总是接近于0。

这里的描述和教材上的略有区别，注意这里连的是VDD，书上用的GND。

# PMOS开关电路





## ○ NMOS

- 当  $v_{GS} > 0$  时D和S导通。
- 相当于一个门级在高电压（1状态）时闭合的开关电路。

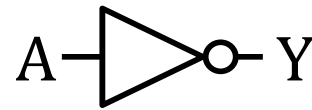
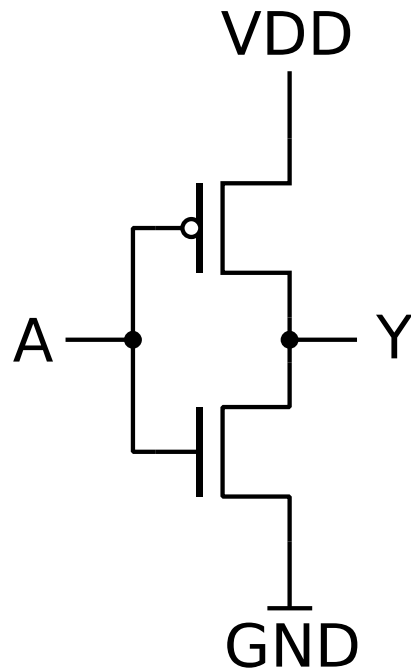
## ○ PMOS

- 当  $v_{GS} < 0$  时D和S导通。
- 相当于一个在低电压（0状态）时闭合的开关电路。

## ○ 在数字电路中，MOS管工作在截止区和可变电阻区

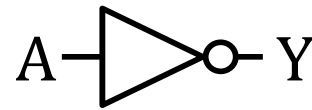
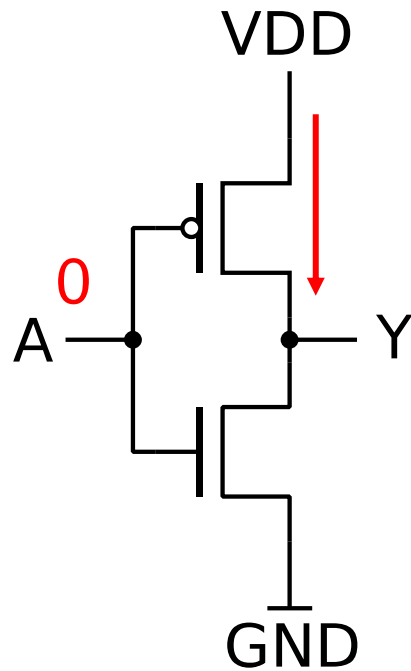
- 非闭即开
- 不讨论电压电流模型
- 不讨论可变电阻区/恒流区的物理特性

# CMOS反门



A	Y
0	1
1	0

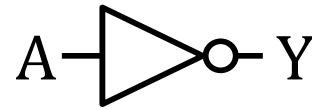
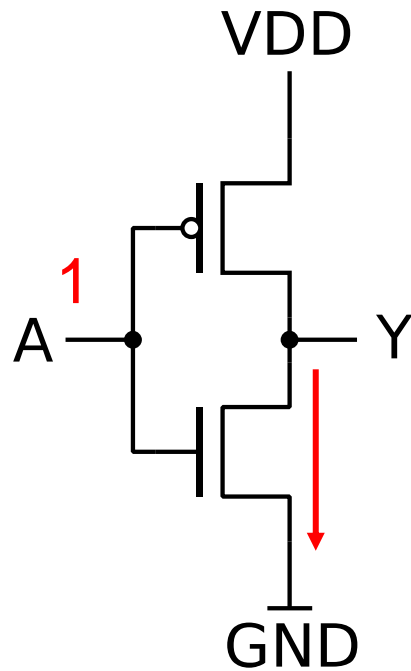
# CMOS反门—0



A	Y
0	1
1	0

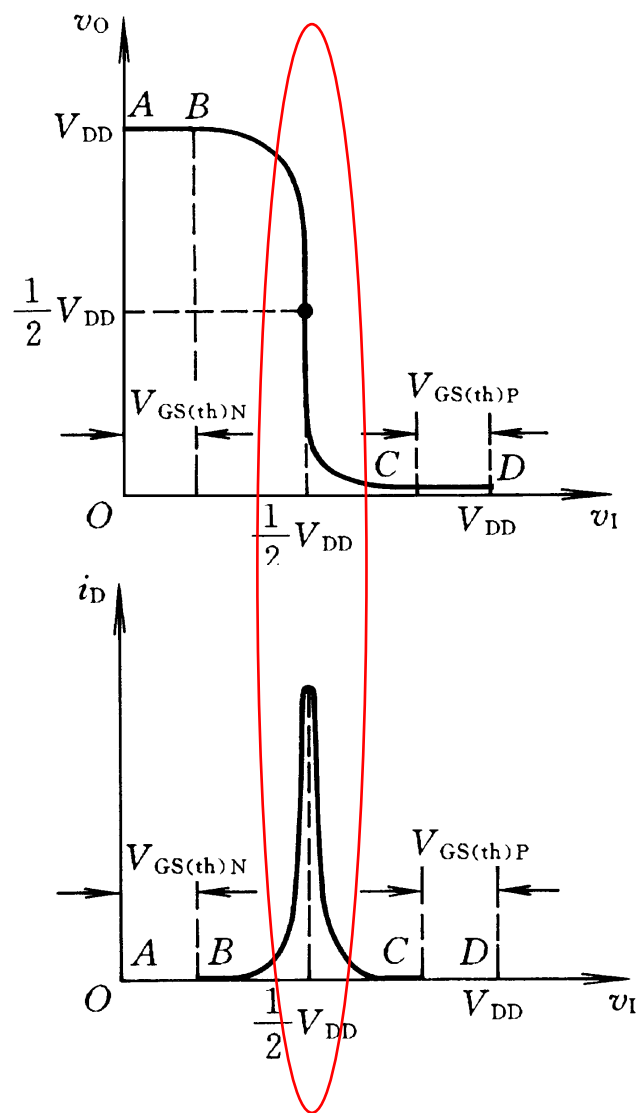
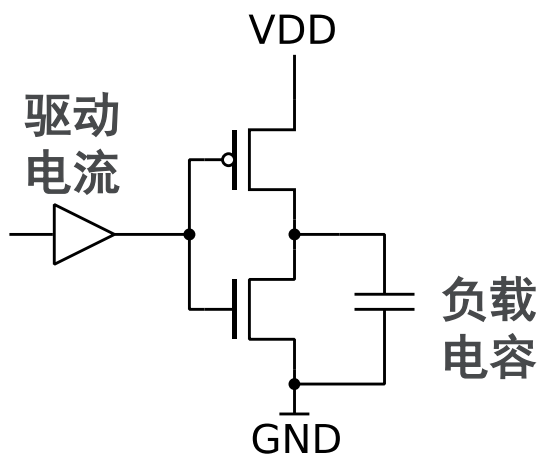
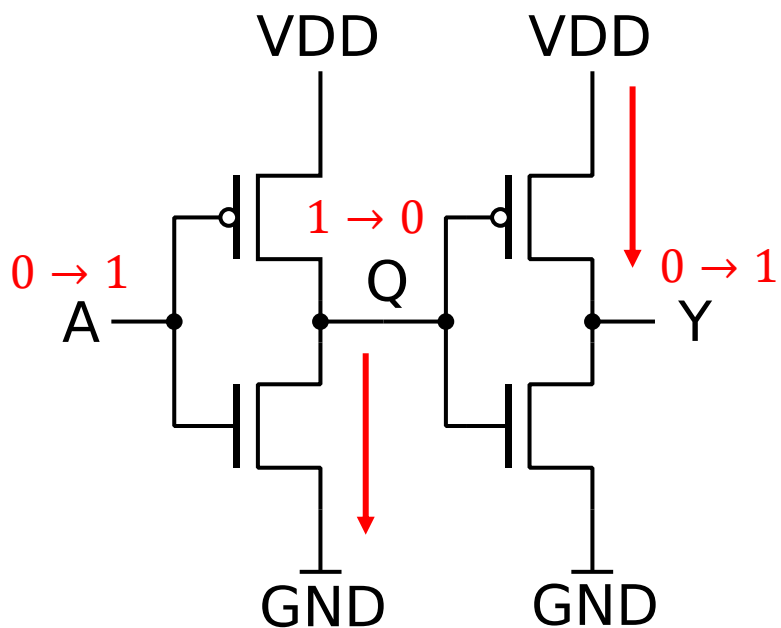


# CMOS反门—1



A	Y
0	1
1	0

# CMOS反门—电压电流特性



# CMOS反门总结

## ○互补型结构

- 所有的CMOS门电路都是互补型结构
- VDD接PMOS, GND接NMOS

## ○工作在截止区和可变电阻区

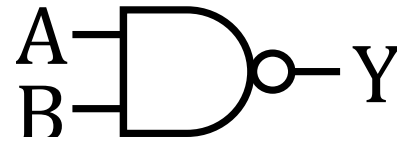
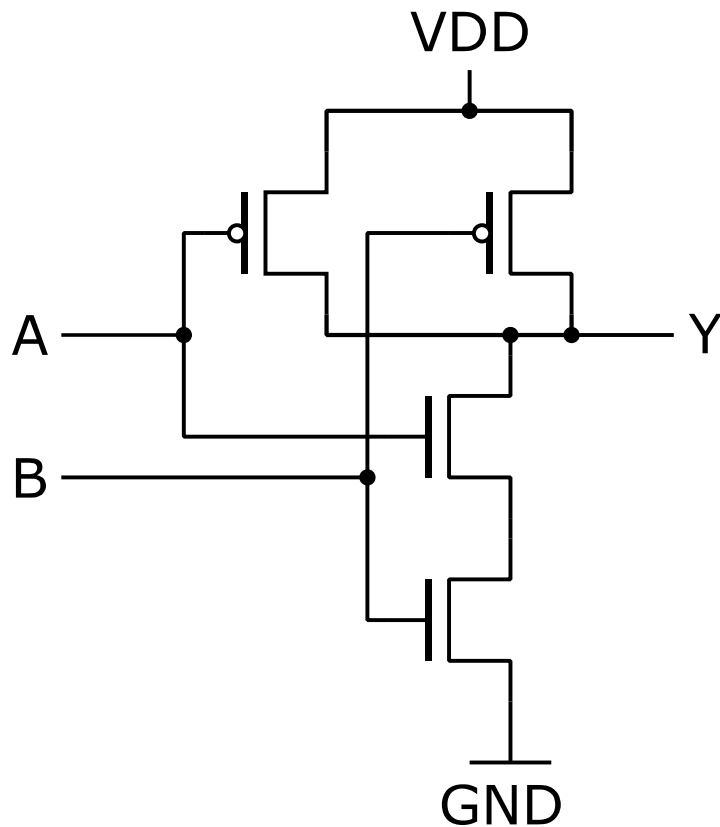
- 状态稳定（输入输出无变化）时电流极小
- 状态改变时产生从VDD到GND的瞬时大电流

## ○驱动和负载模型

- 驱动主要讨论电流供给能力, 即给电容充电的强度
- 负载主要是各门电路的门级到源极的等效电容
- 驱动和负载决定了门的反应时间 (transition time)

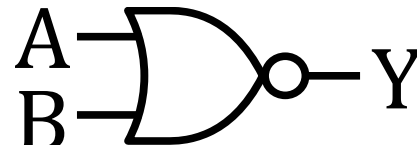
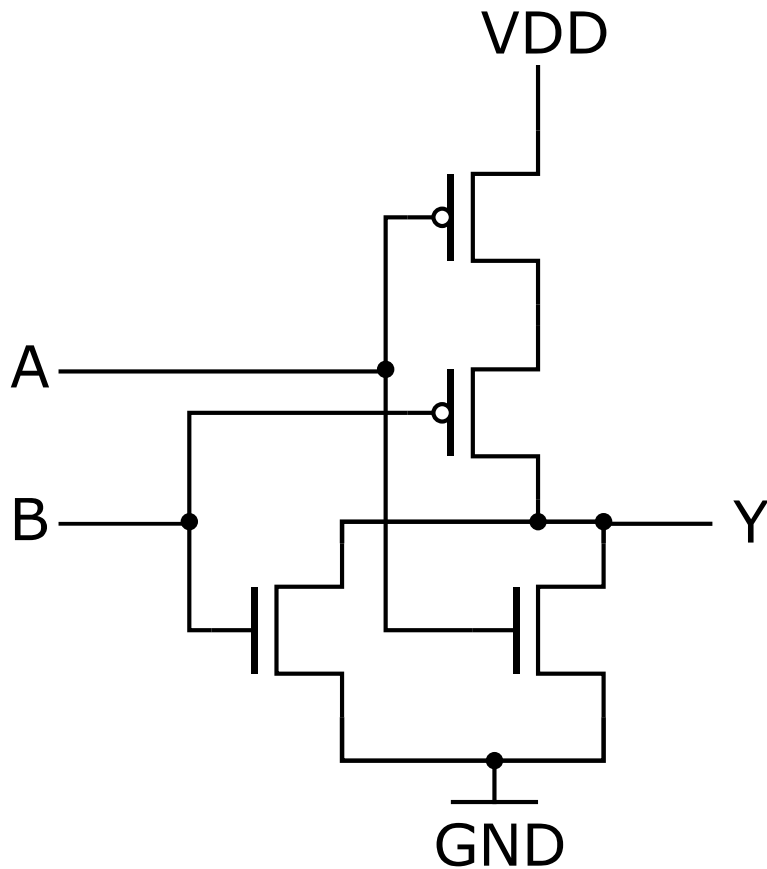


# CMOS与非门



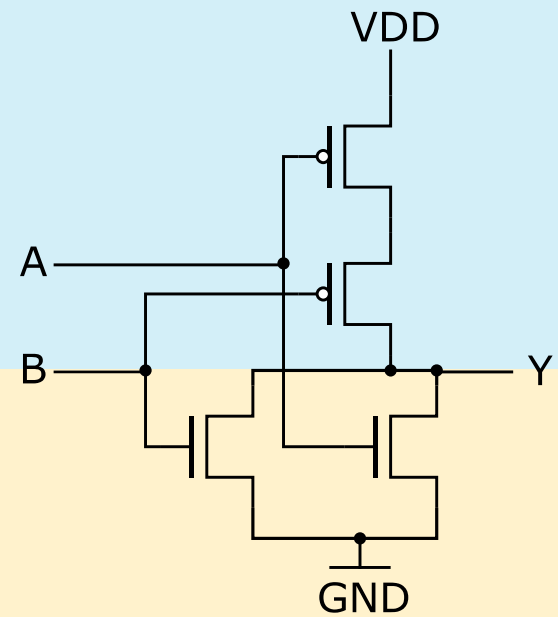
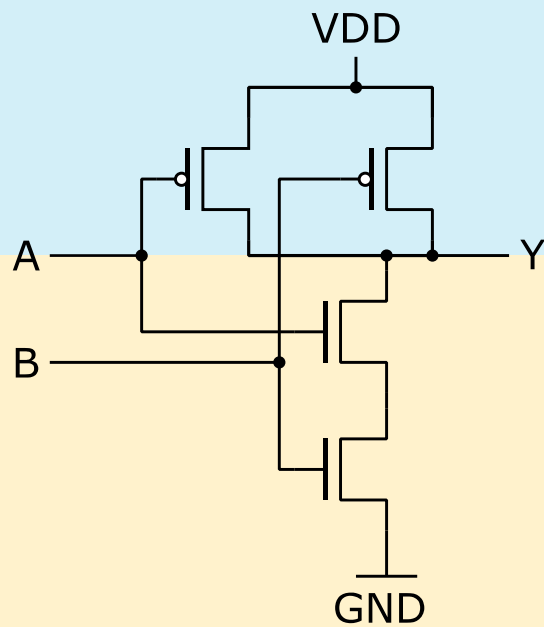
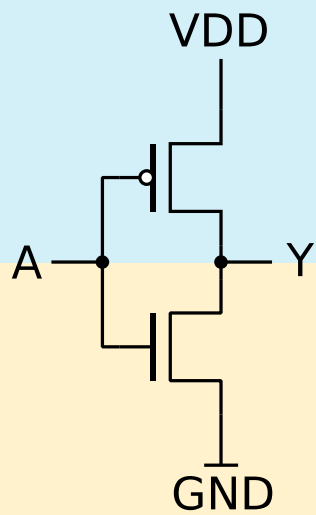
A	B	Y
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

# CMOS或非门

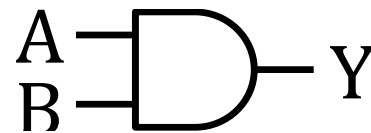
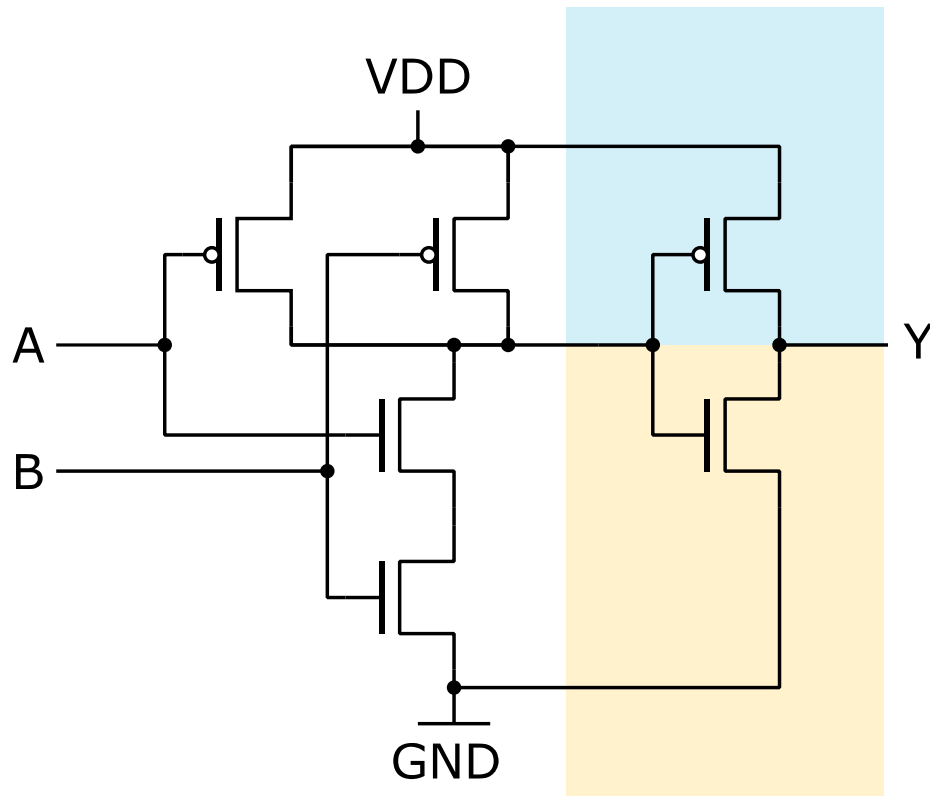


A	B	Y
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

# CMOS反门、与非门、或非门



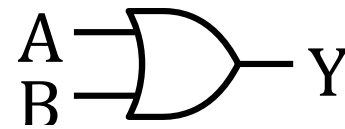
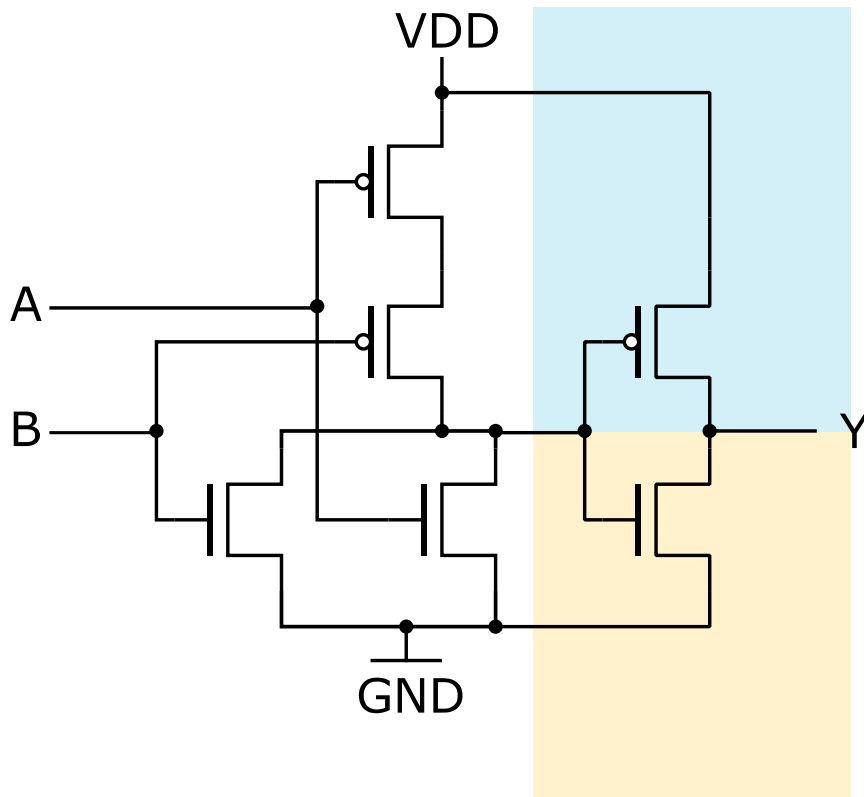
# CMOS与门



A	B	Y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

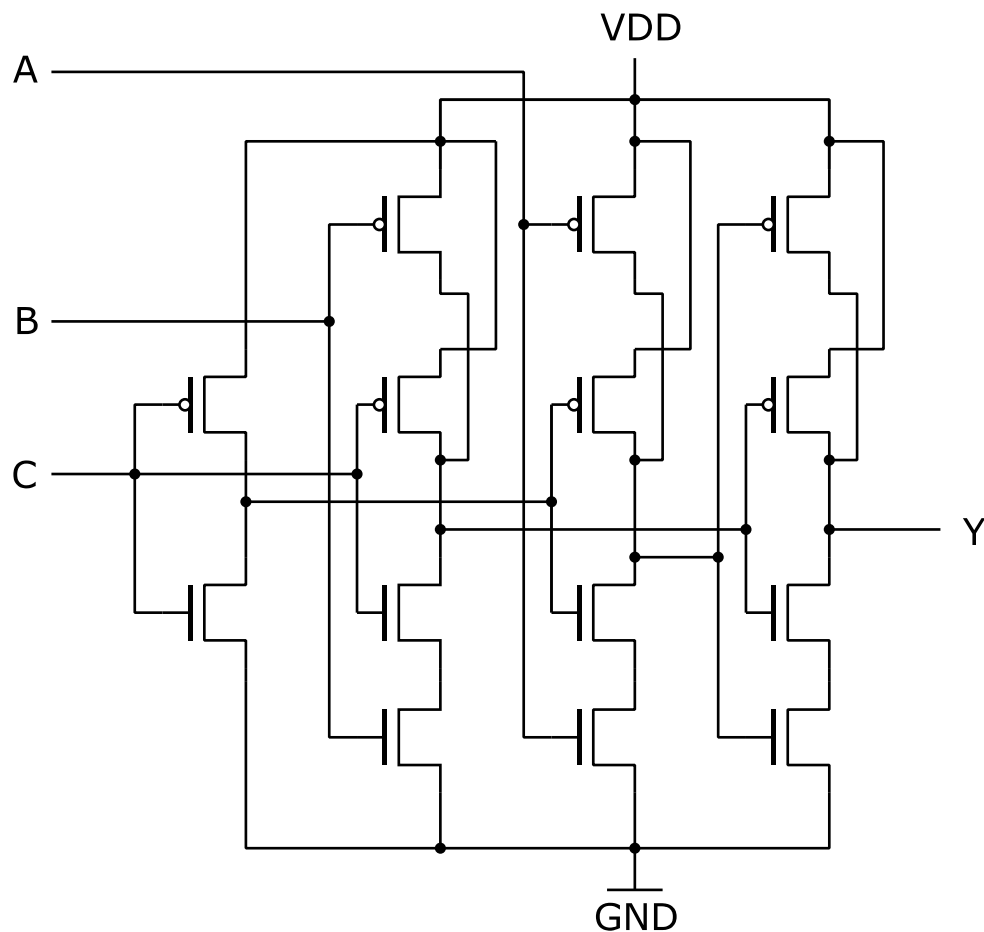


# CMOS或门



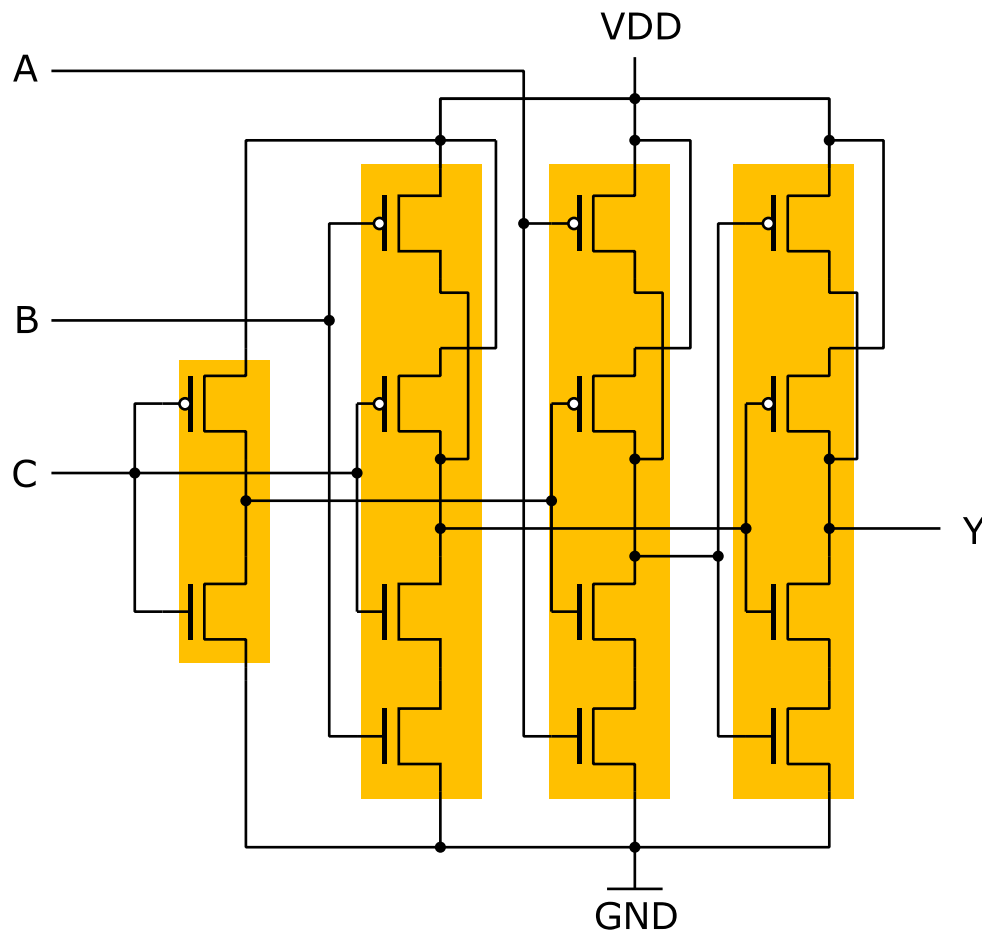
A	B	Y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

# CMOS门电路识别—真值表



A	B	C	Y
0	0	0	
0	0	1	
0	1	0	
0	1	1	
1	0	0	
1	0	1	
1	1	0	
1	1	1	

# CMOS门电路识别—门识别



$$Y = \overline{\overline{CB} \cdot \overline{CA}}$$



$$Y = \overline{CA} + CB$$

# CMOS门电路总结

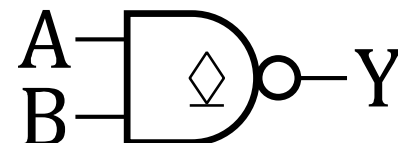
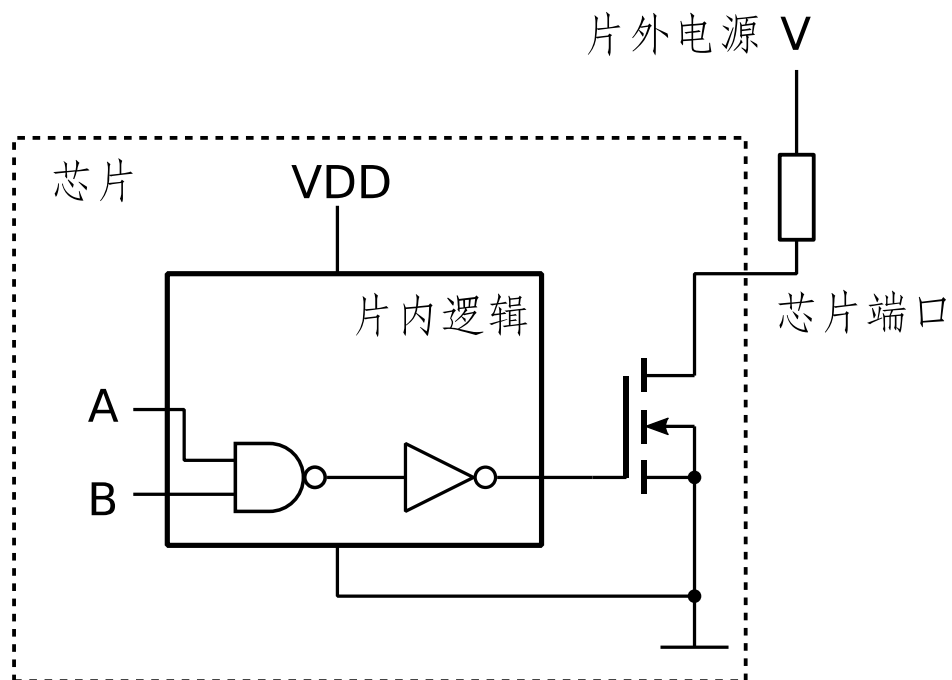
## ○ 互补型结构

- 所有的CMOS门电路都是互补型结构
- VDD接PMOS, GND接NMOS
- MOS管的总数量一定是偶数
- PMOS和NMOS的结构一定是对应存在的

## ○ 判别一个较复杂门电路的功能

- 利用真值表
- 利用简单门的判别

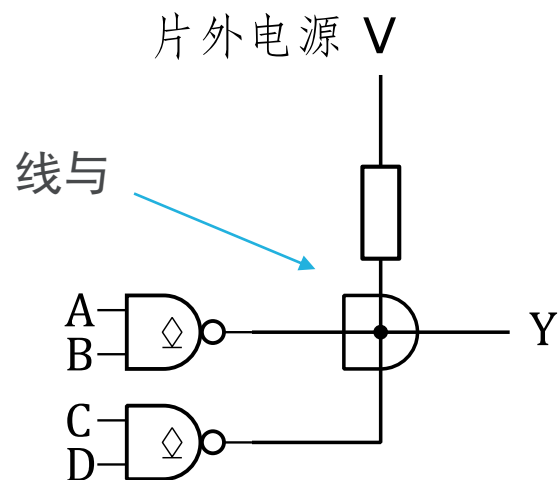
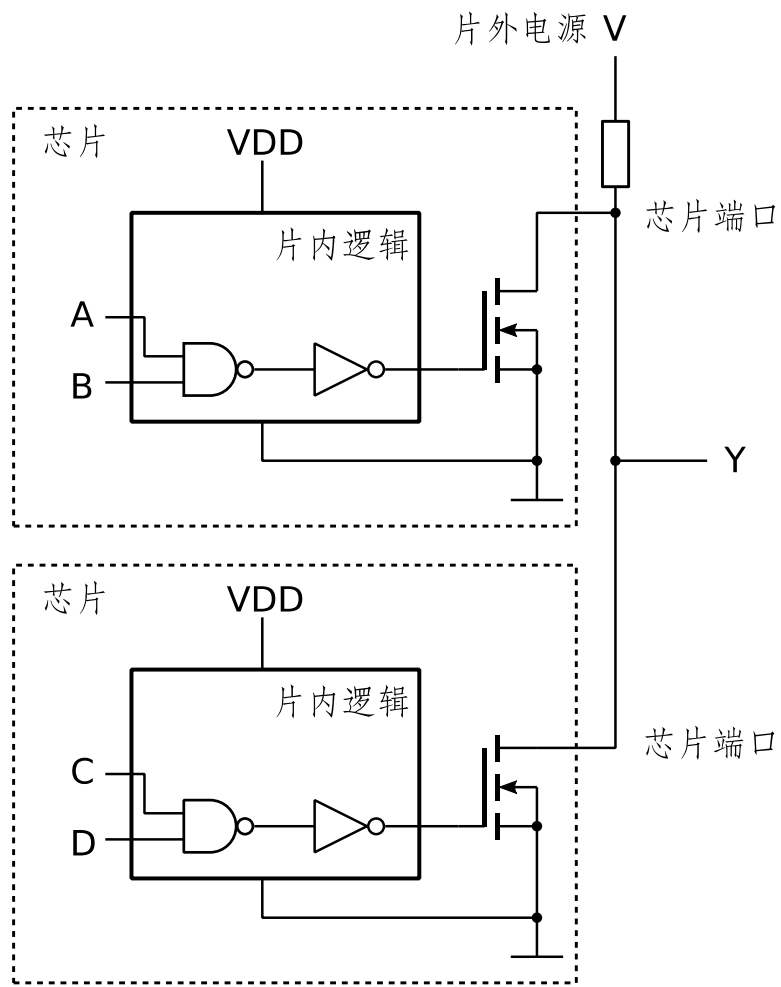
# 其他电路：漏极开路输出门（OD门）



A	B	Y
0	0	V
0	1	V
1	0	V
1	1	0

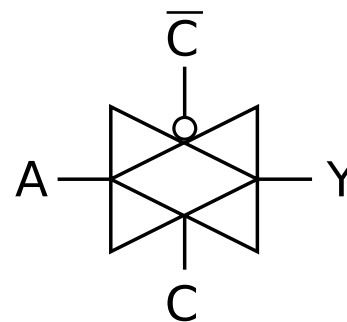
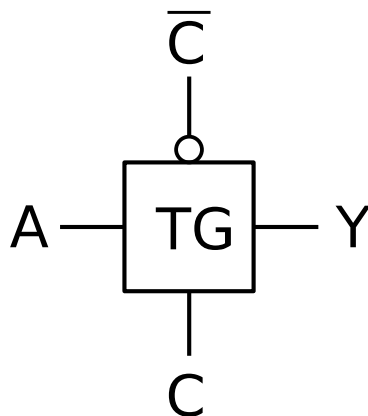
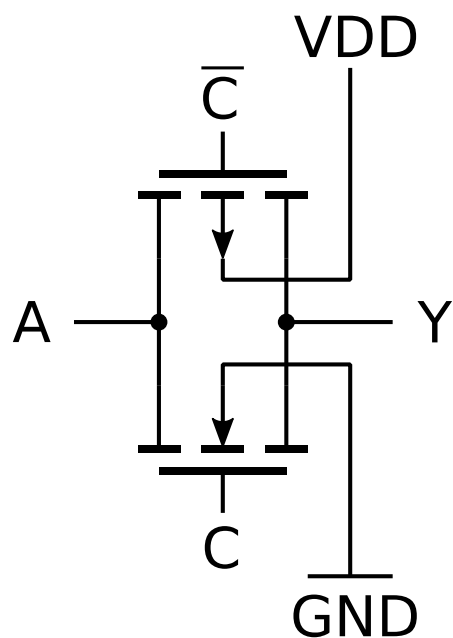


# 漏极开路输出 (OD门) — 使用



- 漏极开路
- 实现片外的电压转换
- 实现片外片与逻辑

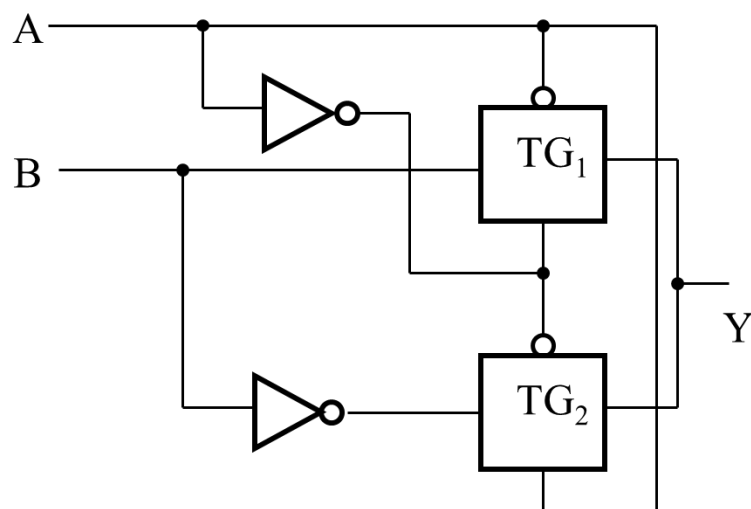
# 其他电路：CMOS传输门



A	C	Y
0	1	0
1	1	1
0	0	Z
1	0	Z

- 片内可以使用，必须成对出现
- 有时候可以用于简化电路
- Y和A之间会产生一个压降，相当于电阻（电阻型负载）

# CMOS传输门— 简化异或门

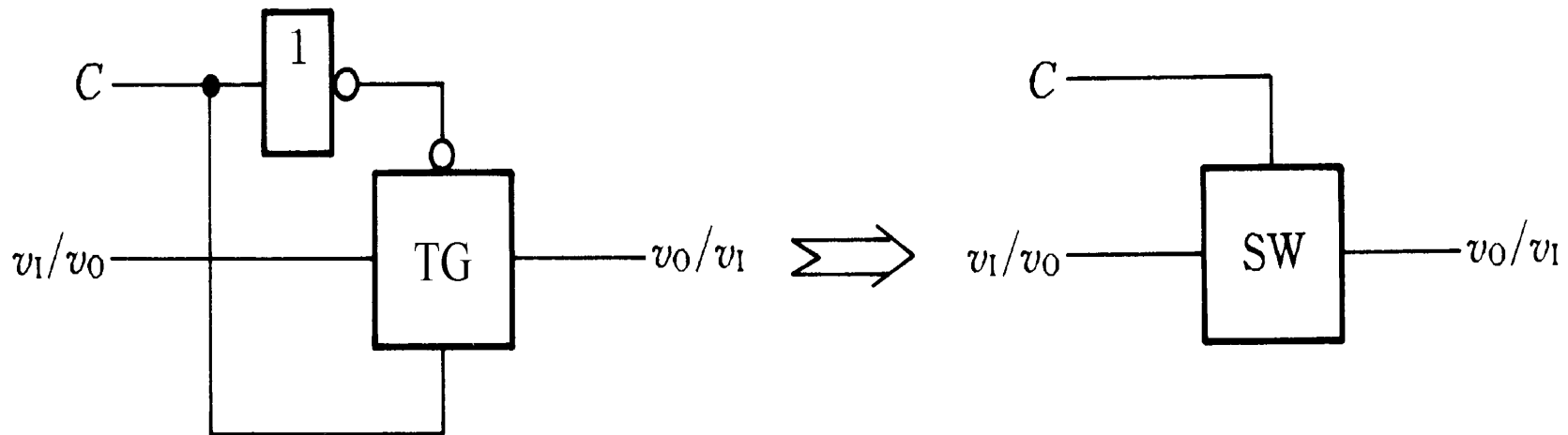


8个MOS管

$$Y = A \oplus B = A\bar{B} + \bar{A}B = \overline{\overline{A\bar{B}} \cdot \overline{\bar{A}B}}$$

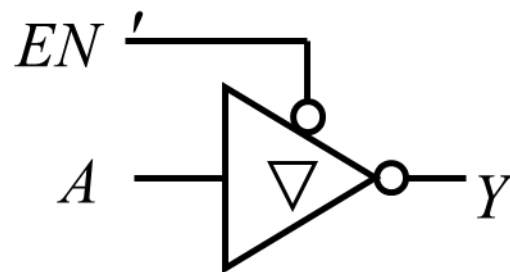
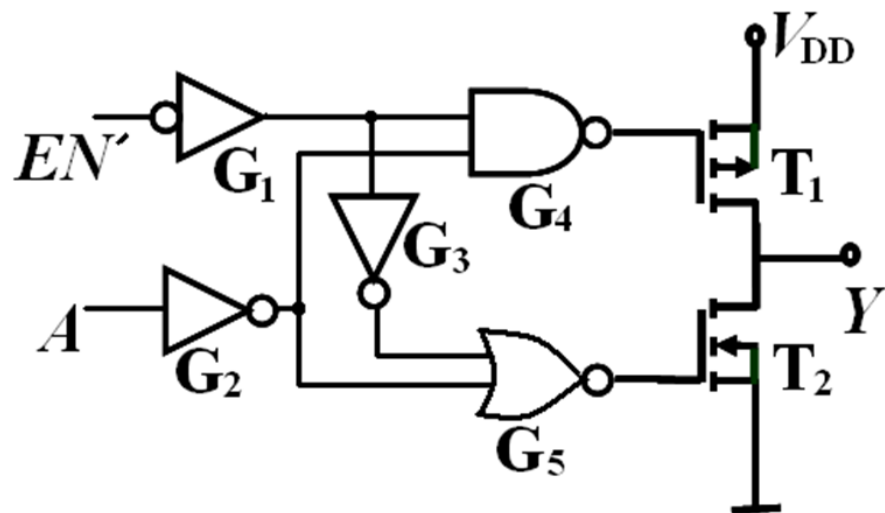
2个反门，3个二输入与非门， $2 \times 2 + 3 \times 4 = 16$ 个MOS管。

# CMOS传输门— 开关电路



闭合时双向导通

# 其他电路：CMOS三态输出



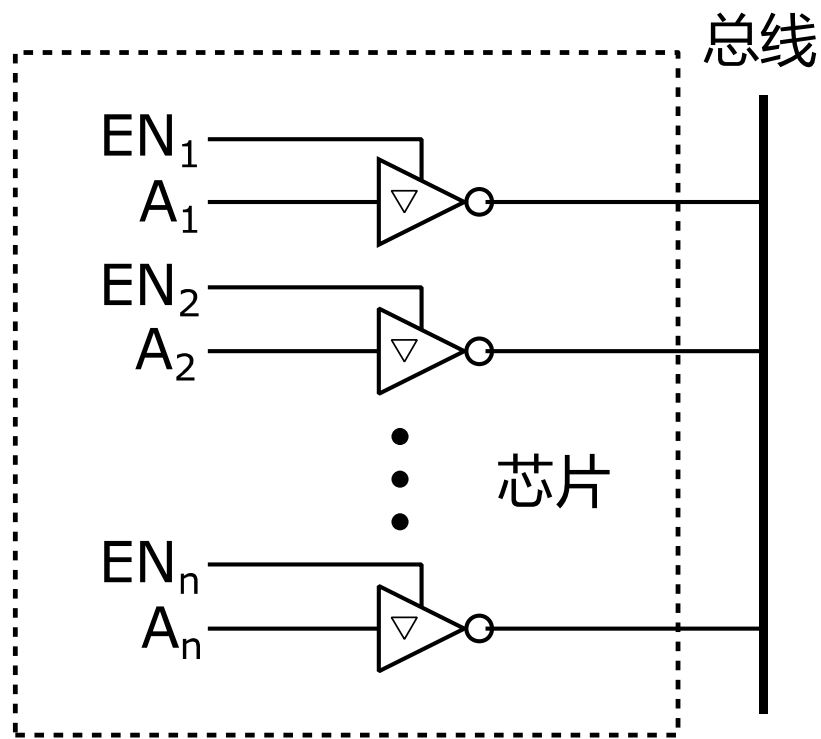
逻辑符号

A	EN	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	Z
1	1	Z

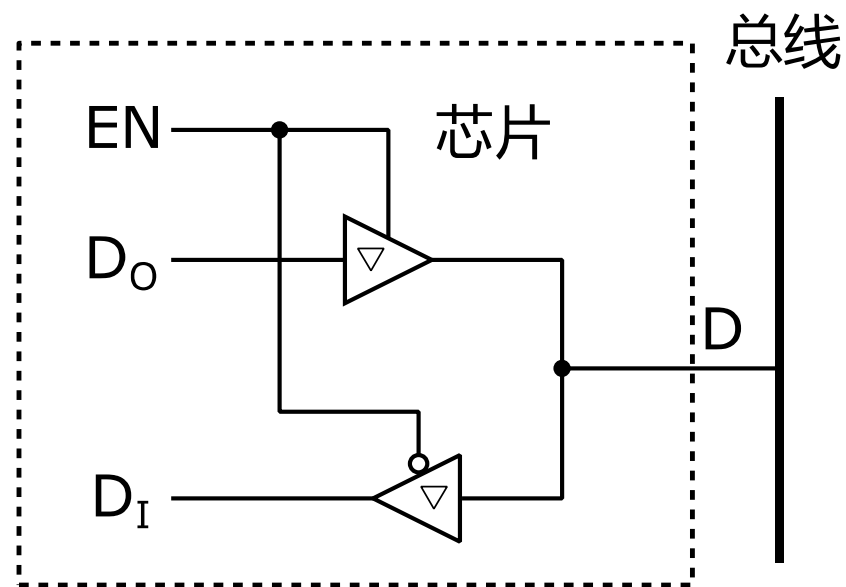
- 一般只能在芯片的I/O端口上使用。
- 当不导通时，输出高阻。



# CMOS三态输出—使用



片外总线



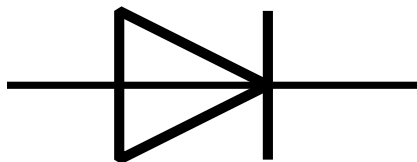
双向端口

# 总结：考试范围

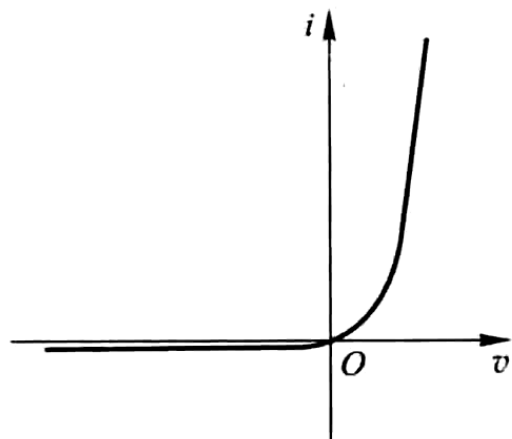
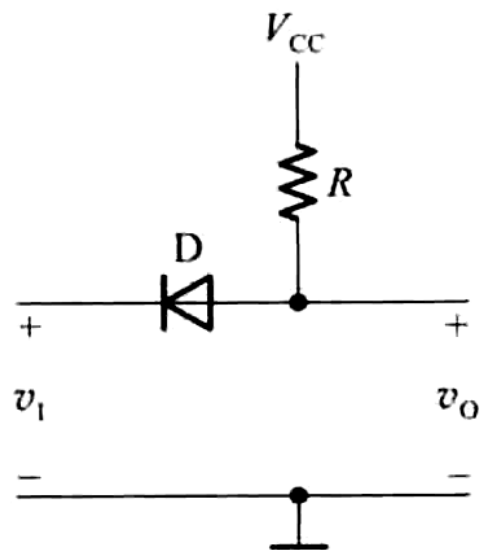
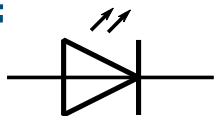
- 集成电路芯片（非考试范围）
  - 理解集成电路芯片的大概内部结构
- MOS晶体管
  - NMOS和PMOS的构造、基本电流电压特性
- CMOS门电路
  - 反相器的内部构造、基本电流电压特性
  - 基本门电路的内部构造
  - 从CMOS结构识别电路功能
- 其他的门电路
  - 漏极开路(OD)电路
  - 传输门
  - 三态门

# 二极管

## ○ 半导体二极管 (diode)

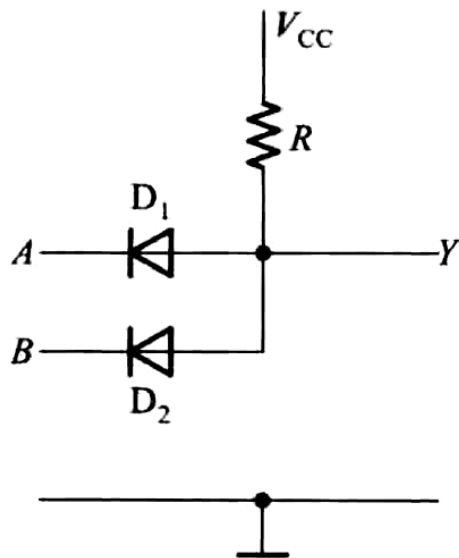


- 单向导通
- 关闭时电流极小
- 开启时正向有一定压降和电阻效应
  - 一般不可忽略
- 可用做开关电路和保护电路
- 发光二极管

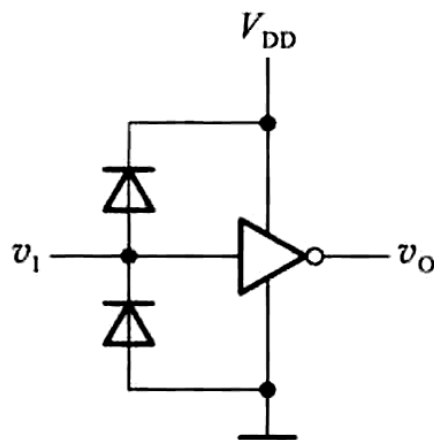


# 二极管构成的电路

## ○二极管与门

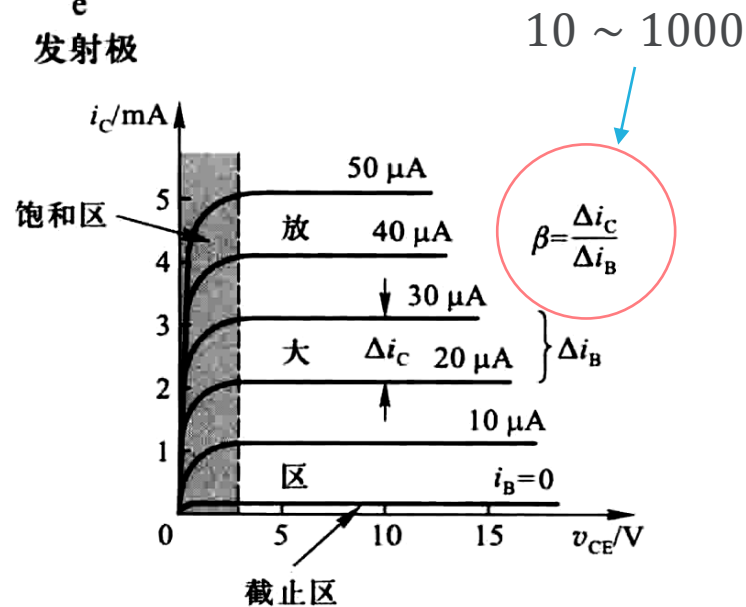
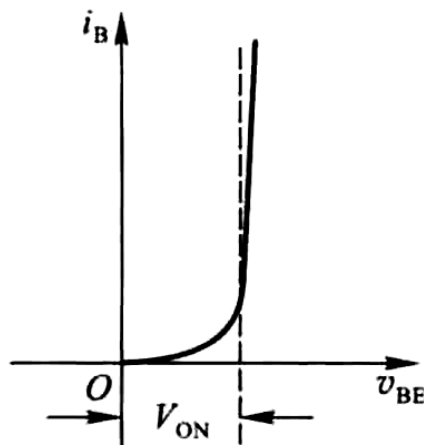
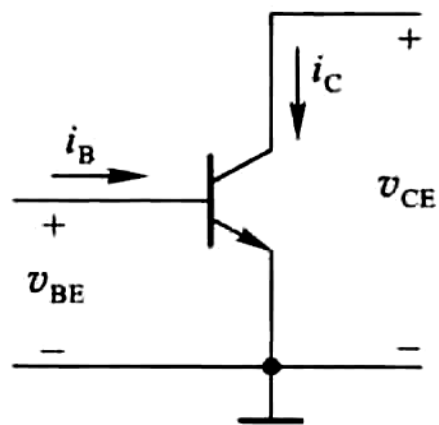
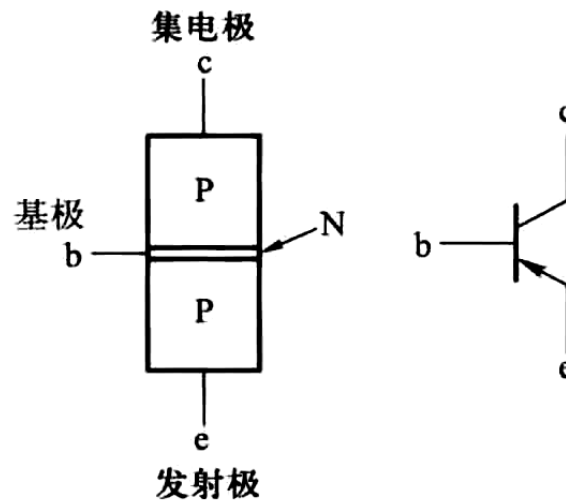
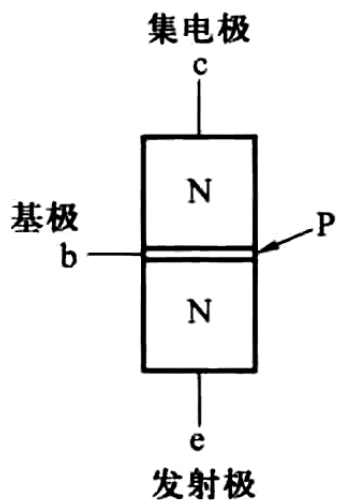


## ○保护电路



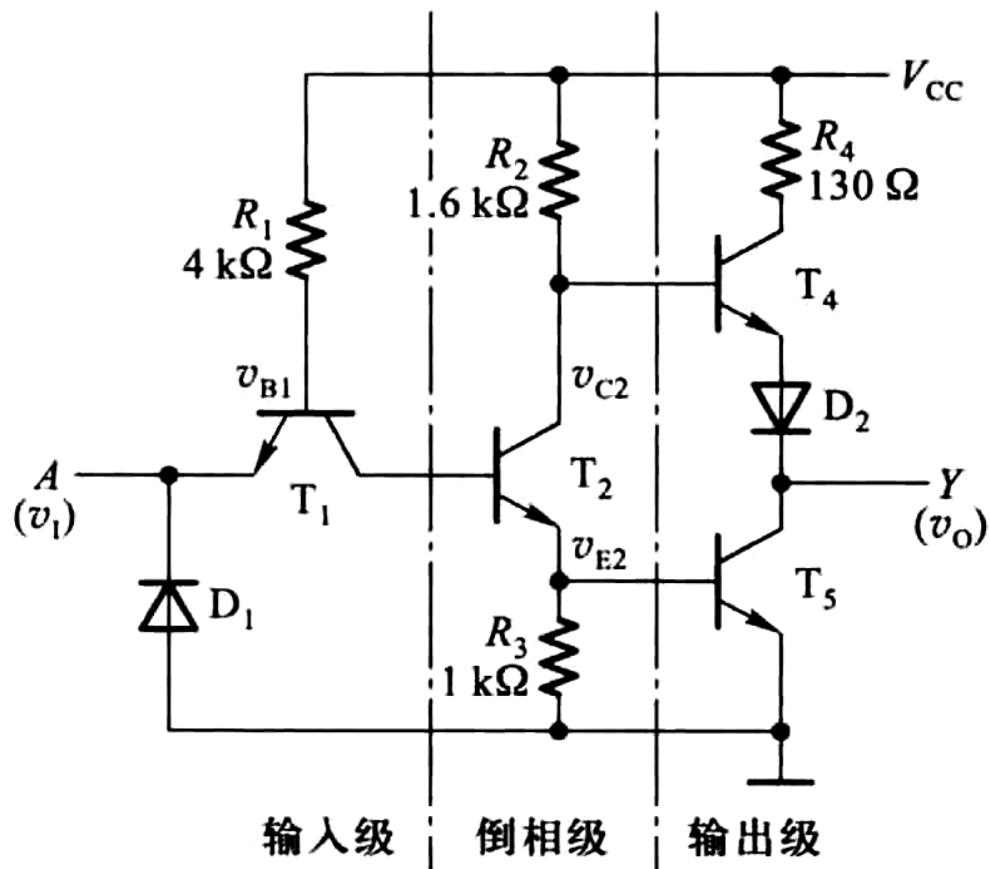
# 三极管

## 三极管 (transistor)



# 三极管组成的TTL电路

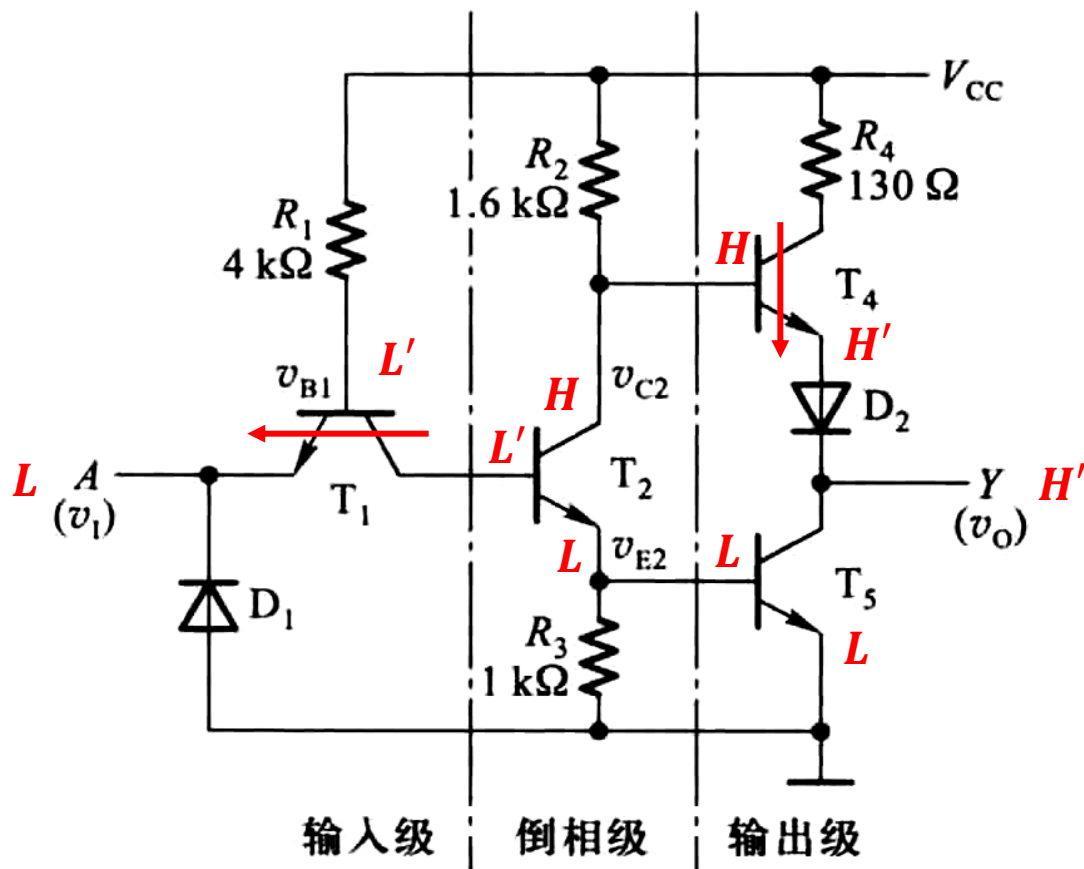
## ○TTL (transistor-transistor-logic) 反相器





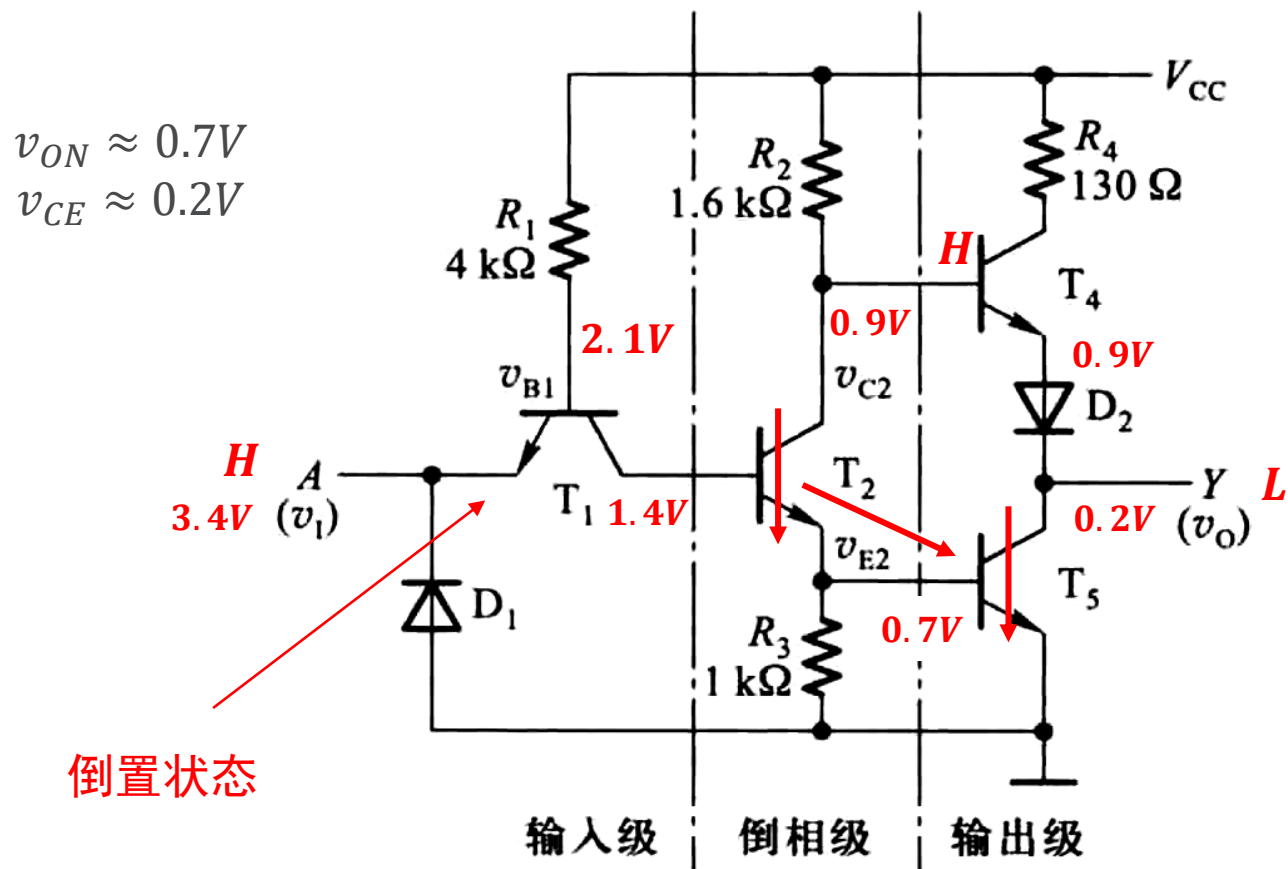
# 三极管组成的TTL电路

## ○TTL (transistor-transistor-logic) 反相器

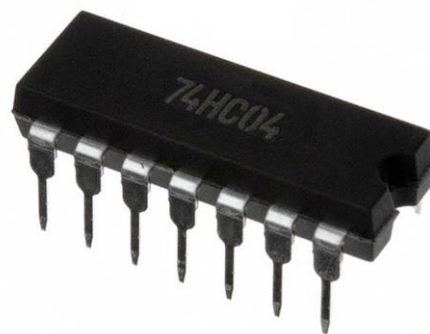
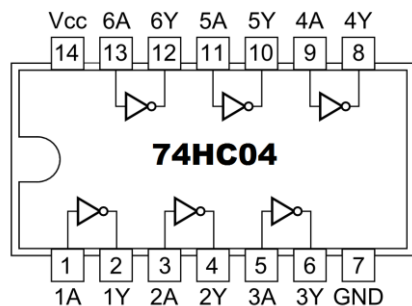


# 三极管组成的TTL电路

## ○TTL (transistor-transistor-logic) 反相器



# CMOS集成电路模块系列



Philips Semiconductors

Product specification

4-bit arithmetic logic unit

74HC/HCT181

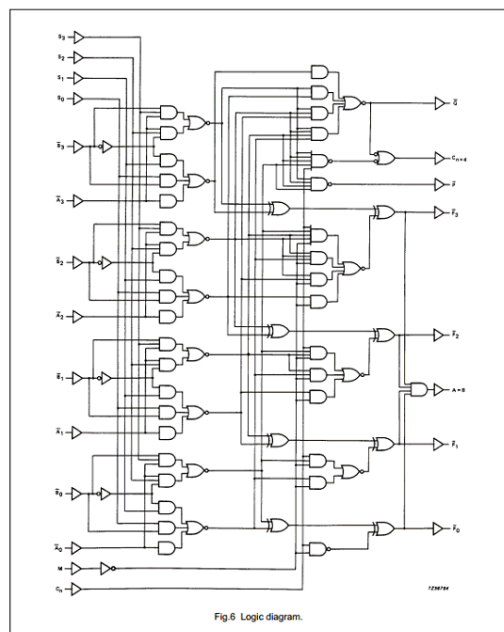
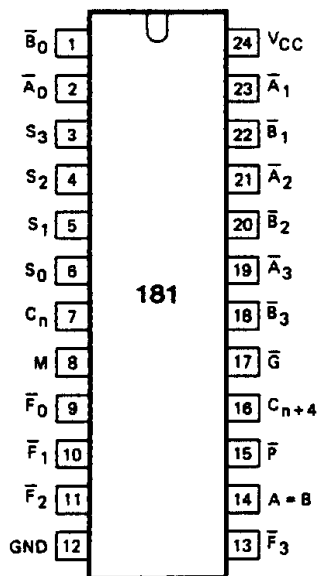


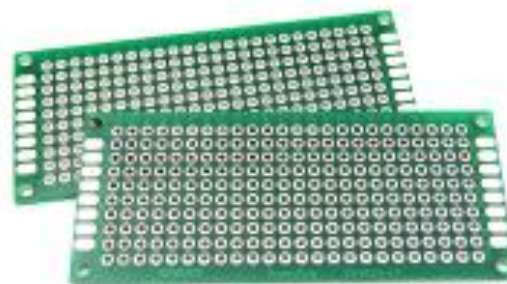
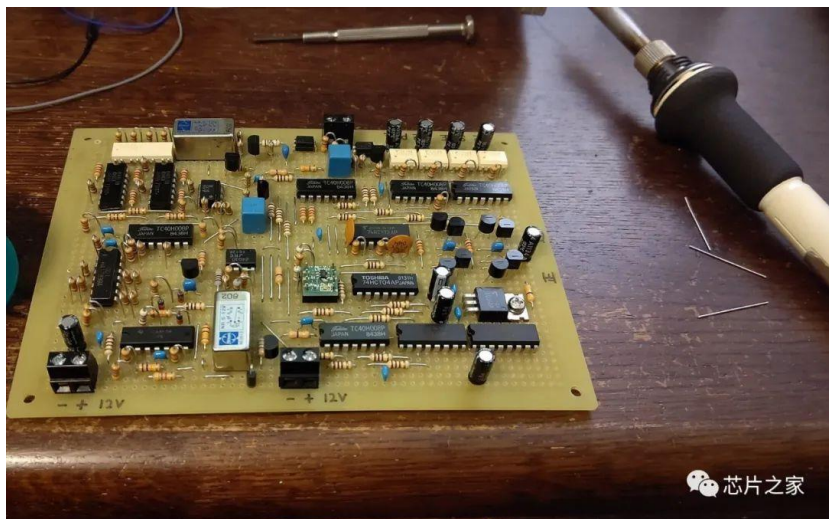
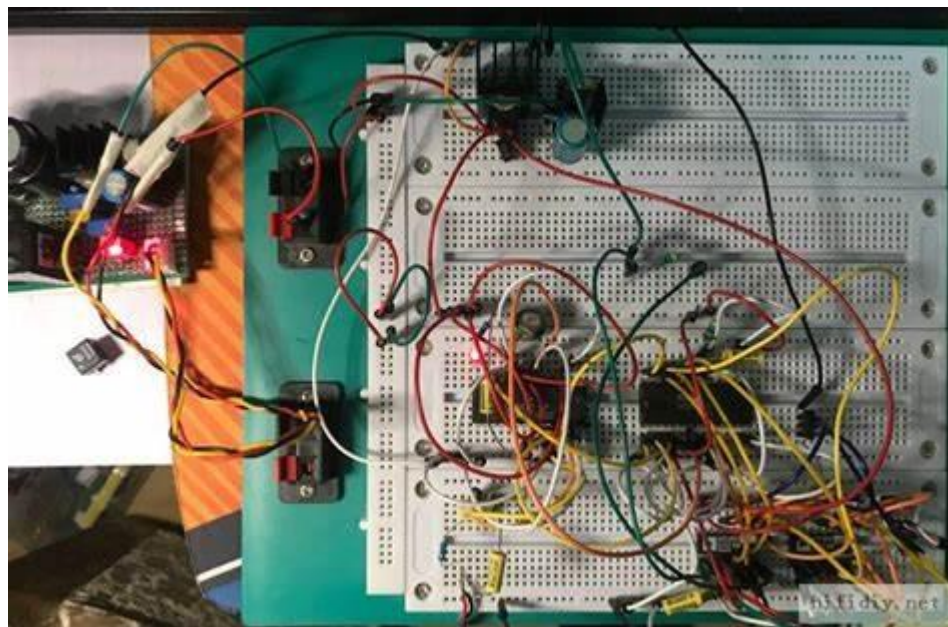
Fig.6 Logic diagram.



1998 Jun 10

6

# CMOS集成电路模块系列



# CMOS集成电路模块系列

	$V_{DD}$ (V)	$I_{out}$ (mA)	$I_{in}$ ( $\mu$ A)	$t_{pd}$ (ns)	$C_{in}$ (pF)	$C_{pd}$ (pF)
74HC	2~6	-4~4	-1~1	9	10	20
74HCT	4.5~5.5	-4~4	-1~1	14	10	20
74AHC	2~5.5	-8~8	-1~1	5.3	10	12
74AHCT	4.5~5.5	-8~8	-1~1	5.5	10	14
74LVC	1.65~3.6	-24~24	-5~5	3.8	5	8
74ALVC	1.65~3.6	-24~24	-5~5	2	3.5	23

- HC: high-performance CMOS 高性能 CMOS
- T: TTL compatible 和TTL电压兼容
- A: advanced 改进版
- LVC: low-voltage CMOS 低电压CMOS

# TTL集成电路模块系列

	$I_{out}$ (mA)	$I_{in}$ (mA)	$t_{pd}$ (ns)	P (mW)
74	-0.4~16	0.04 ~ -1.0	9	10
74S	-1.0~20	0.05 ~ -2.0	3	19
74LS	-0.4~8	0.02 ~ -0.4	9.5	2
74AS	-2.0~8	0.02 ~ -0.5	1.7	8
74ALS	-0.4~8	0.02 ~ -0.2	4	1.2
74F	-1.0~20	0.02 ~ -1.6	3	4

- S: Schottky 肖特基
- L: Low-power 低功耗
- A: Advanced 改进版
- F: Fast 高速

---

**任何问题?**



第三章习题：

7, 8。

## 描述下面CMOS电路的逻辑表达式

