

第1次应用介绍课:

数字系统的基本单元

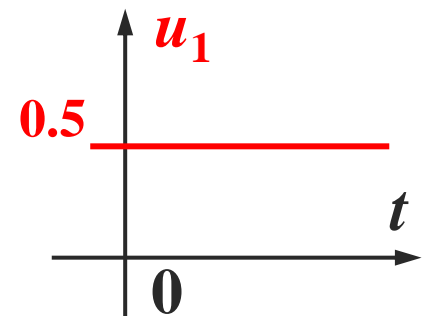
内容简介

■ 1 数字系统简介

- 为什么需要数字系统？（布置自学）
- 表示逻辑的两种方法

■ 2 用MOSFET构成逻辑门电路

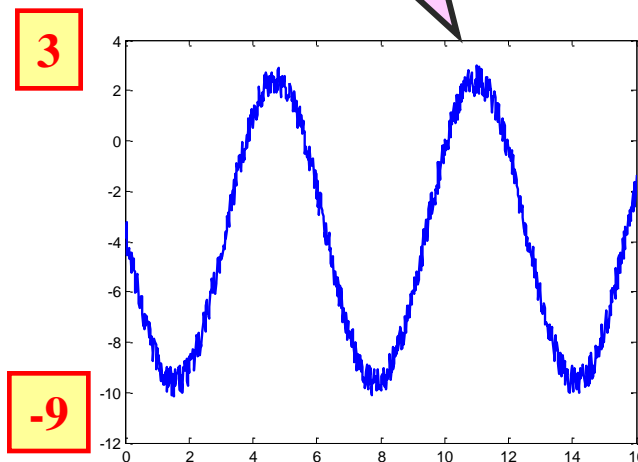
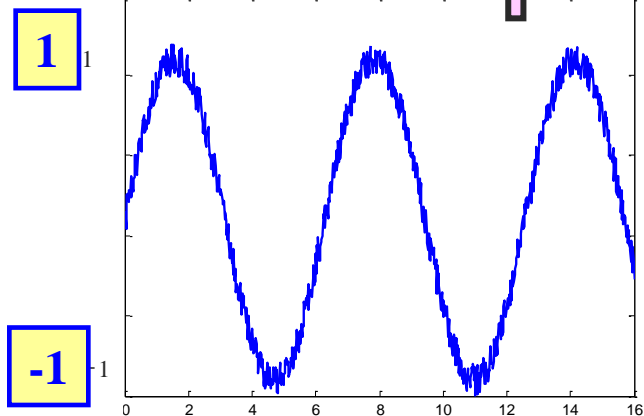
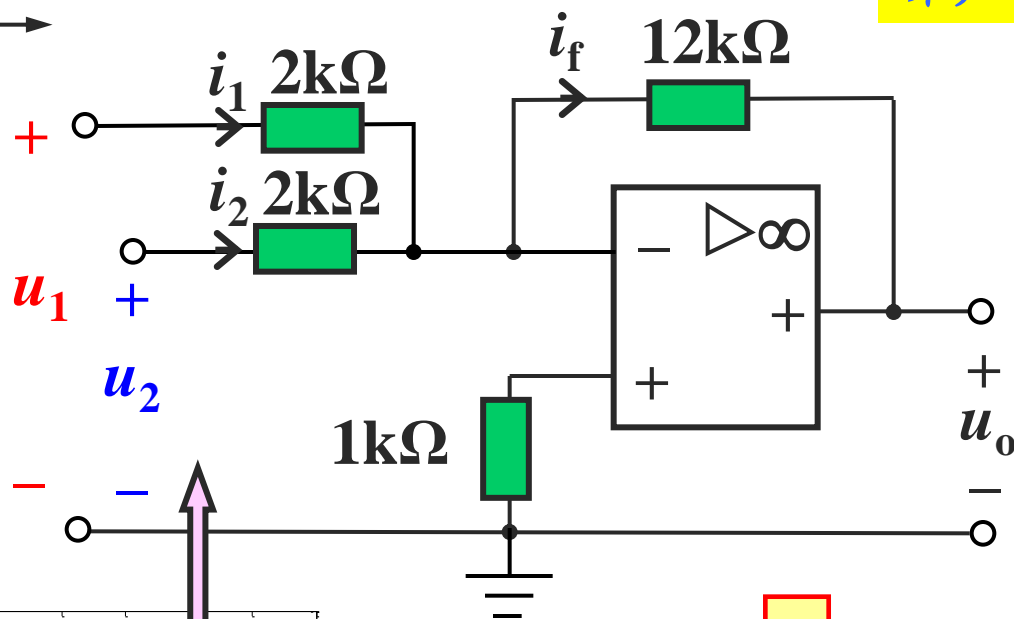
- MOSFET（原理和模型）
- 用MOSFET构成逻辑门电路
- MOSFET构成逻辑门电路的功率分析
- CMOS



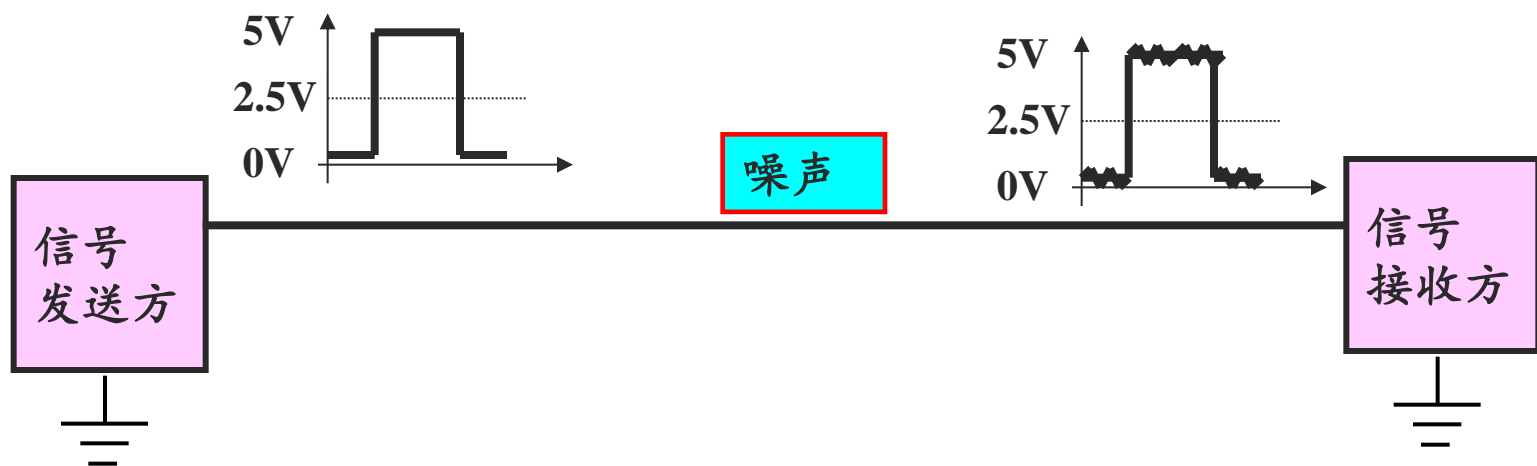
模拟系统的问题:

噪声使得信号失真!

$$u_o = -6(u_1 + u_2)$$



如果仅用两个值来表示信号会怎么样？



发送方认为：

- (1) 低于2.5V的信号表示发送0
- (2) 高于2.5V的信号表示发送1

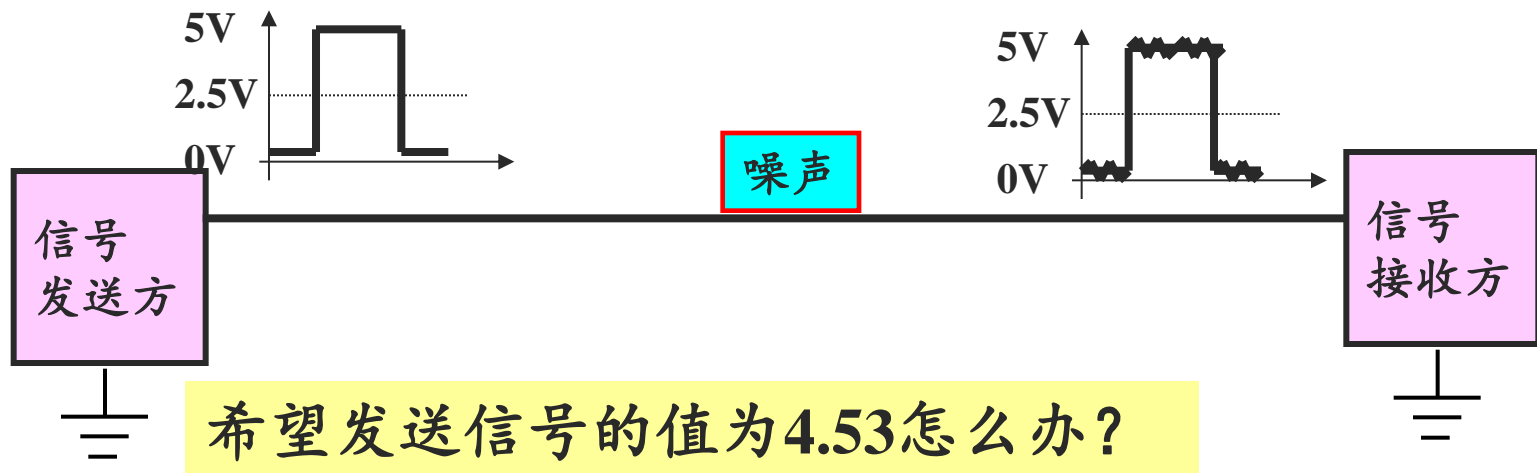
接收方认为：

- (1) 低于2.5V的信号接收0
- (2) 高于2.5V的信号接收1

数字系统的优点：

可以在一定程度上消除噪声的影响！

最简单数字系统的问题在哪里？

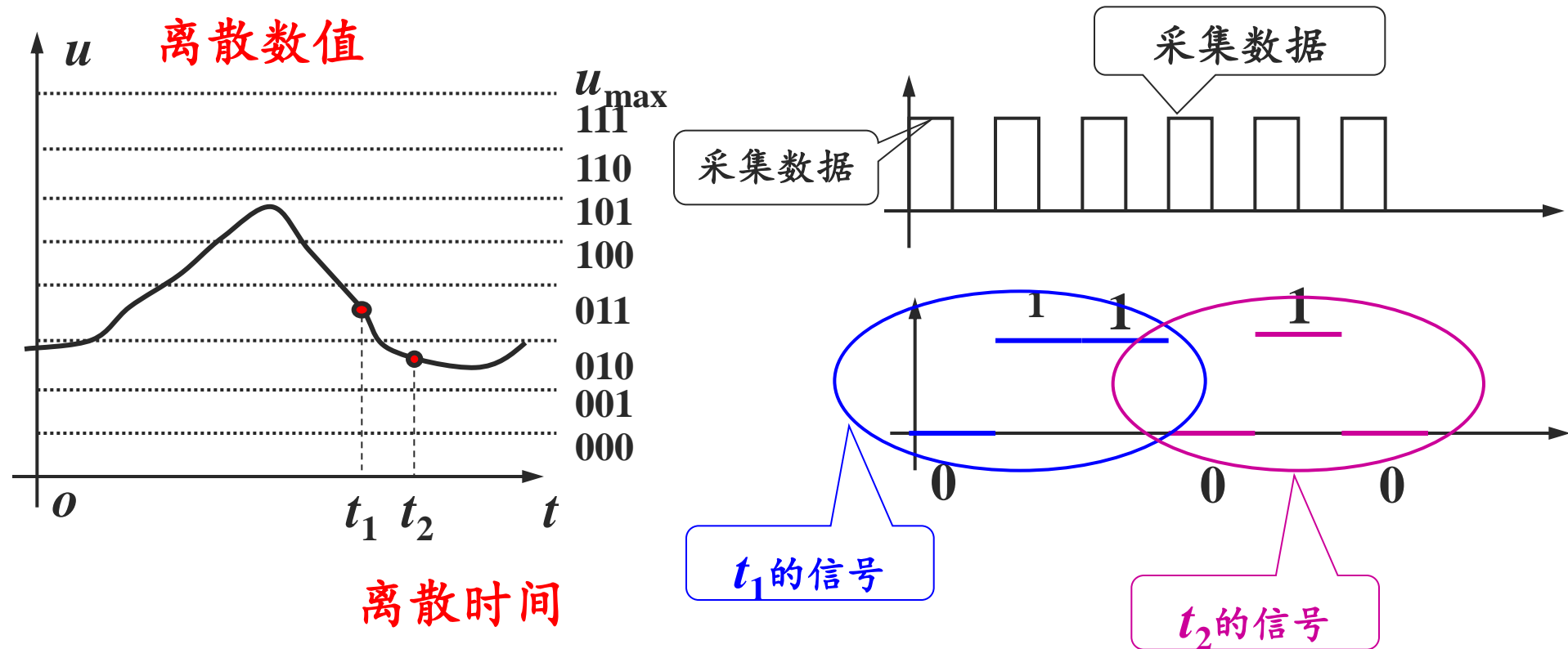


数字系统必须解决的问题：

如何“**精确**”地表示信号的值？

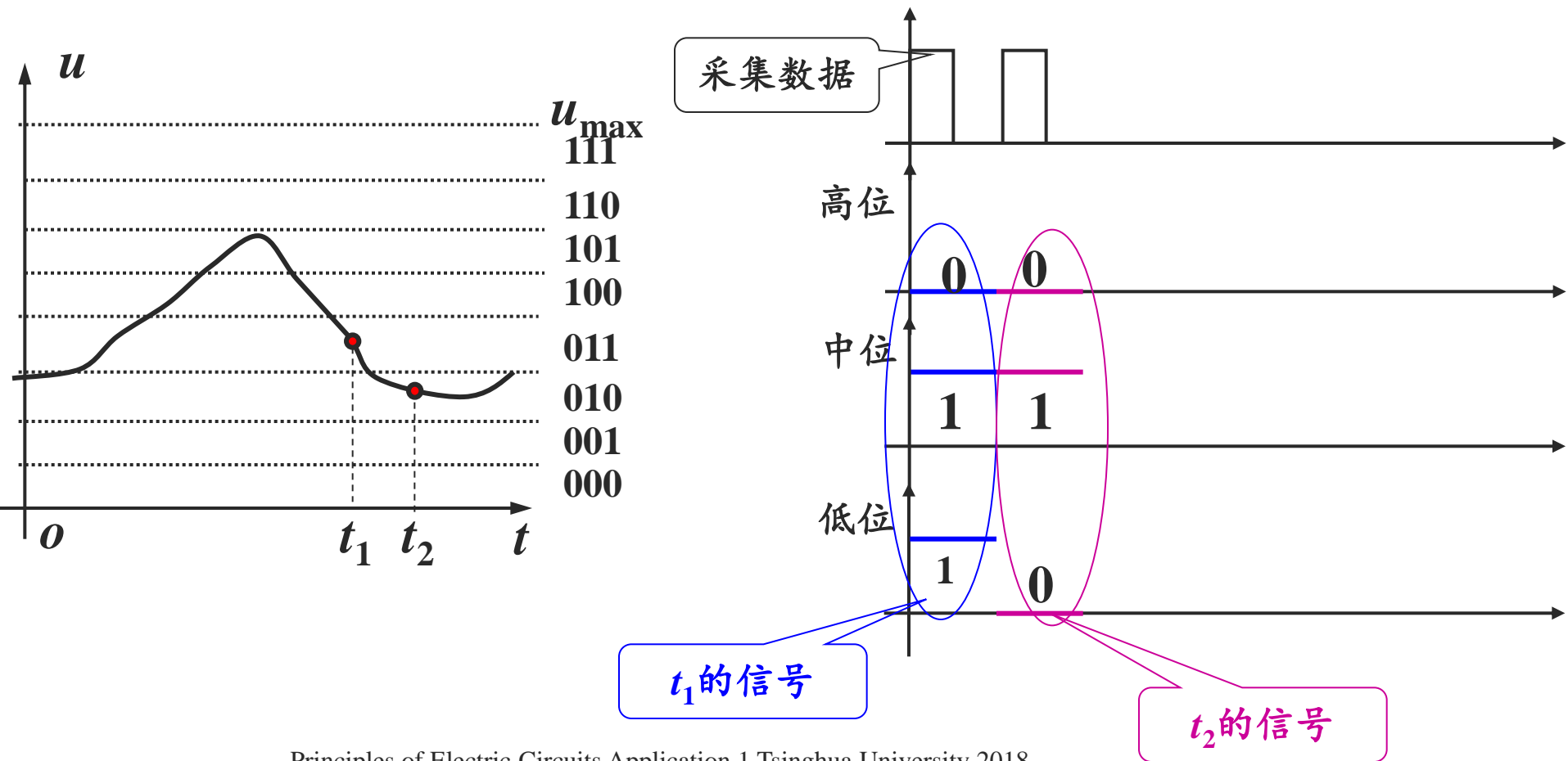
数字系统精确表示信号的法1

用1根线来表示信号的值
每3个时钟周期显示一个值

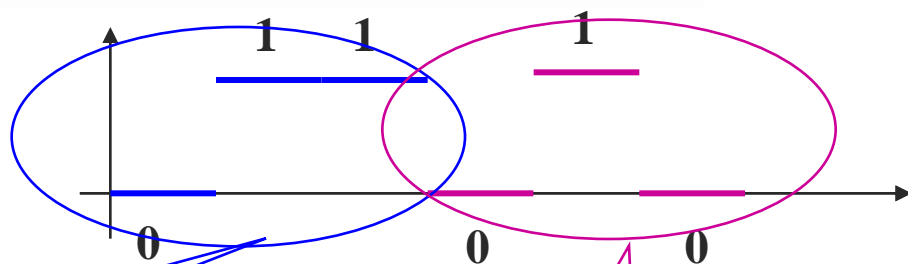
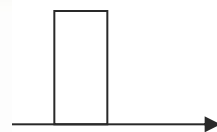
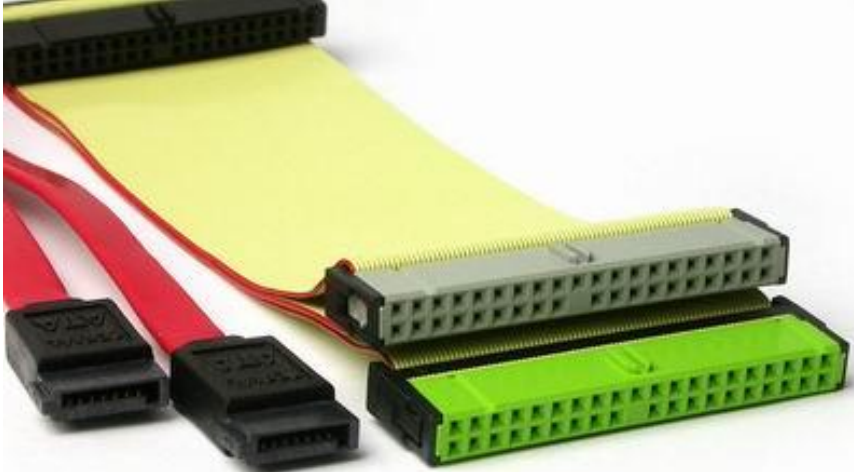


数字系统精确表示信号的法2

用3根线来表示信号的值
每1个时钟周期显示一个值



哪个更好？

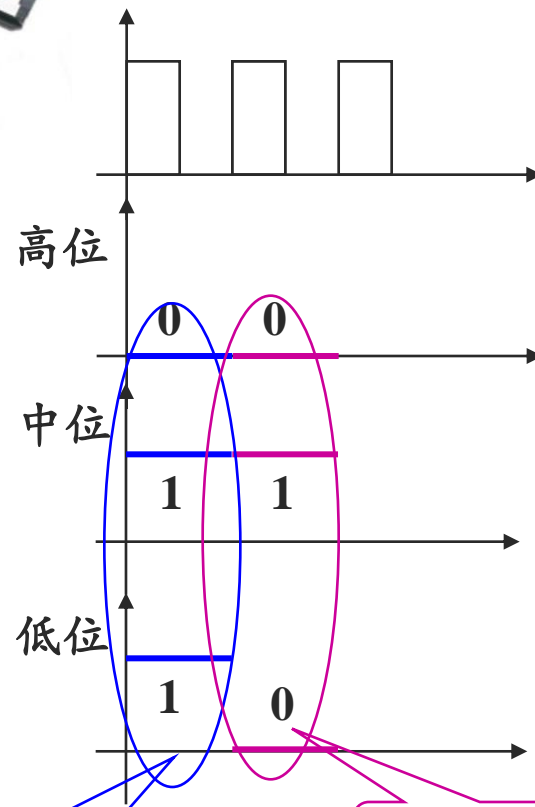


t_1 的信号

t_2 的信号

时间上的折衷

优：省空间
缺：费时间



t_1 的信号

t_2 的信号

空间上的折衷

优：省时间
缺：费空间

数字系统所要讨论的问题

- 组合逻辑
 - 输入→输出（安理会表决、加法器）
- 时序逻辑
 - 输入+系统当前状态→输出（计数器）
- 模拟信号与数字信号的转换
 - Analog-Digital-Converter(DAC)、DAC
- 时钟信号的获取

计算机

1.2 表示逻辑的两种方法

逻辑表达式

$$Y_1 = \bar{A}$$

Y_1 与A相反

$$Y_2 = A \cdot B$$

A、B同为1时 Y_2 为1

$$Y_3 = A + B$$

A、B同为0时 Y_3 为0

真值表

A	B	Y_1	Y_2	Y_3
1	1	0	1	1
0	0	1	0	0
1	0	0	0	1
0	1	1	0	1

如何根据逻辑表达式获得真值表？

$$Y = A \cdot (B + C)$$

Step1: 制表

Step2: 写出所有A、B、C的组合

Step3: 根据每个组合写出对应的Y

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

对于表达式 $Y = \bar{A} \cdot (B + \bar{C})$ 来说，有____种使得输出为1的输入 ABC 的取值组合

☐ A 1

☐ B 2

☒ C 3

☐ D 4

提交

如何根据真值表获得逻辑表达式？

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>Y</i>
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

Step1: 写出所有使得*Y*为1的*A*、*B*、*C*组合方式

$$\overline{A}\overline{B}C \rightarrow Y = 1$$

$$A\overline{B}\overline{C} \rightarrow Y = 1$$

$$ABC \rightarrow Y = 1$$

方法不唯一

表达式不唯一

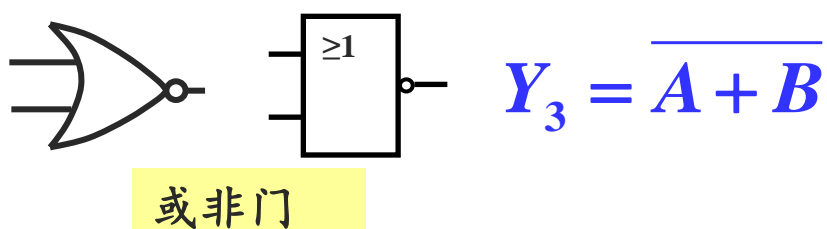
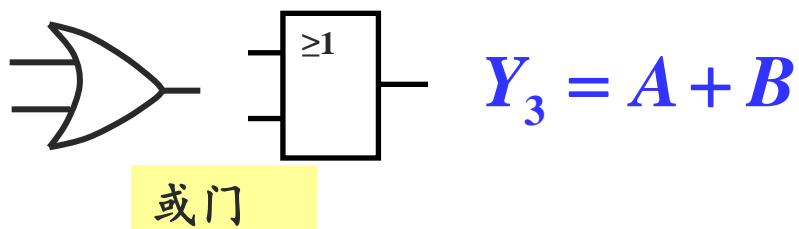
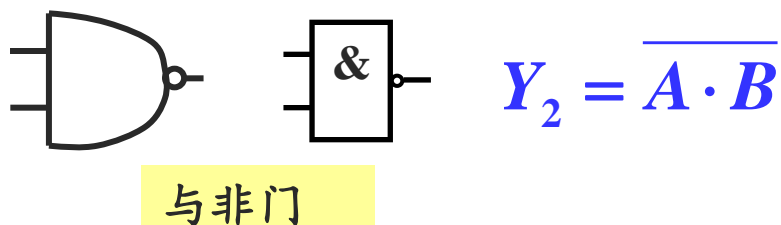
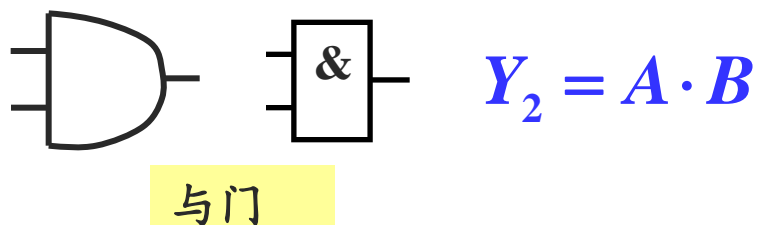
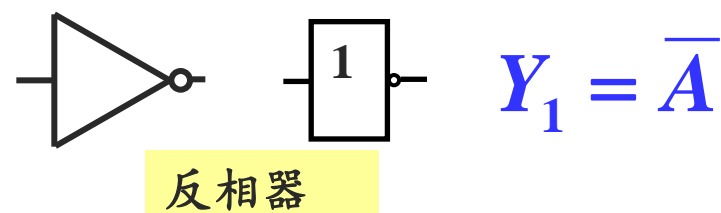
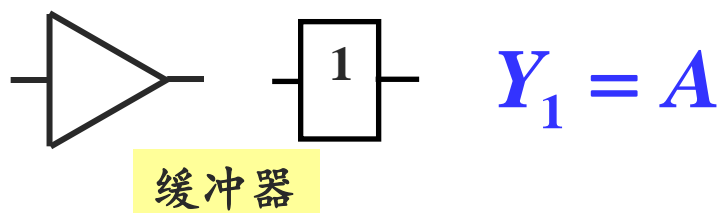
Step2: 将这些组合用“或”运算连接起来

$$Y = \overline{A}\overline{B}C + A\overline{B}\overline{C} + ABC$$

Step3: 利用某种方式化简得到的逻辑表达式

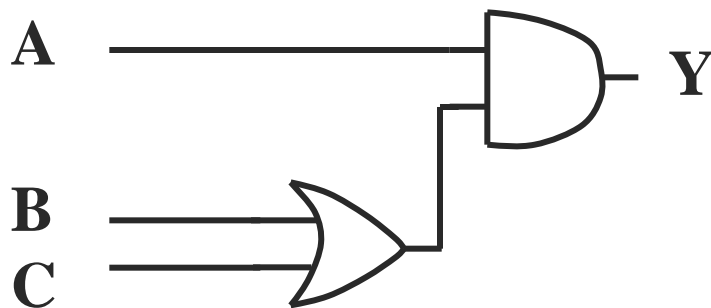
$$Y = A(B + C)$$

几种最常用的逻辑门



逻辑表达式的逻辑门实现

$$Y = A(B + C)$$



$$Y = A(B + C)$$

2.1 MOSFET

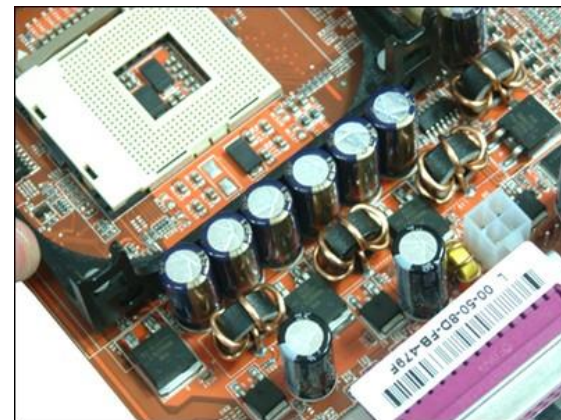
(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

小：线宽32nm

Intel i7 CPU
12亿个晶体管
(双极、MOS)



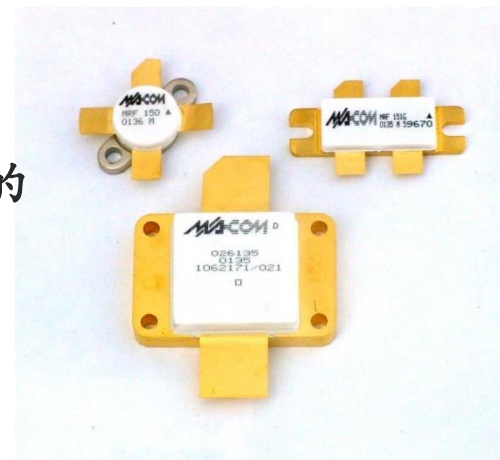
CPU供电电路
中的MOSFET



吴刚耳机放大器
日立N沟道
2SK214型
MOSFET



承载电压几百V
流通电流几百A的
功率MOSFET

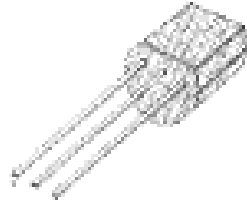


大：10cm

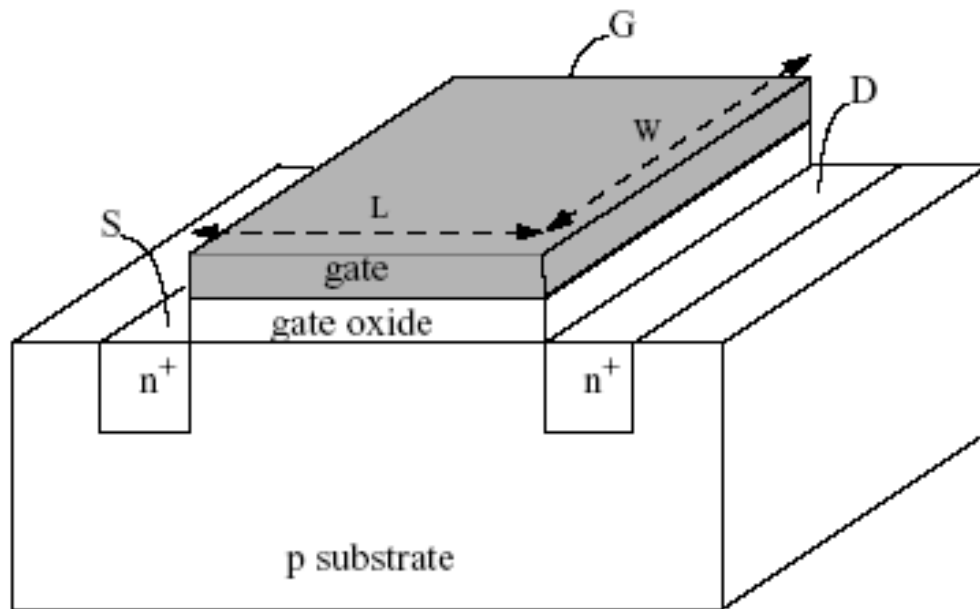
MOSFET ——n沟道增强型

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

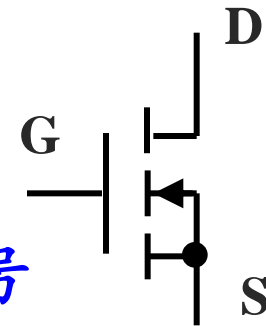
2n7000



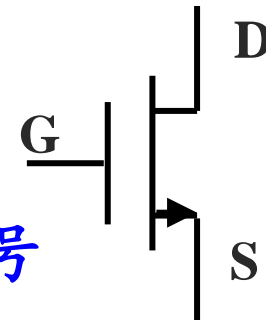
1.Source 2. Gate 3. Drain



标准符号

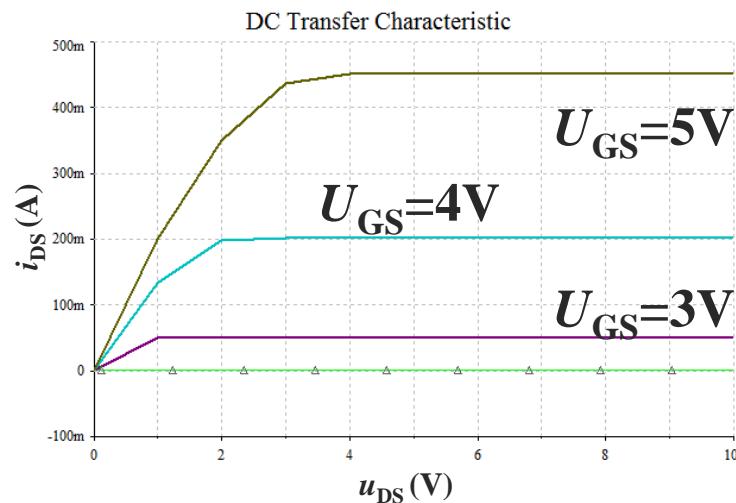
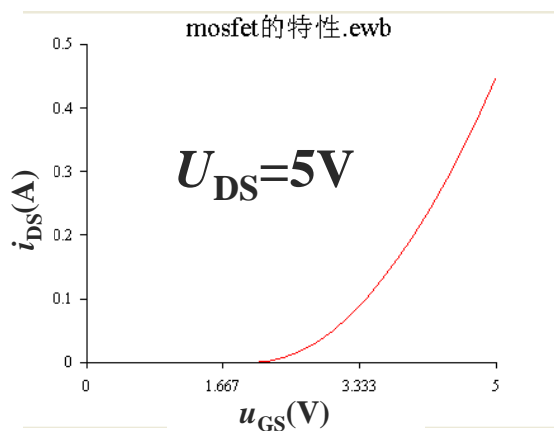
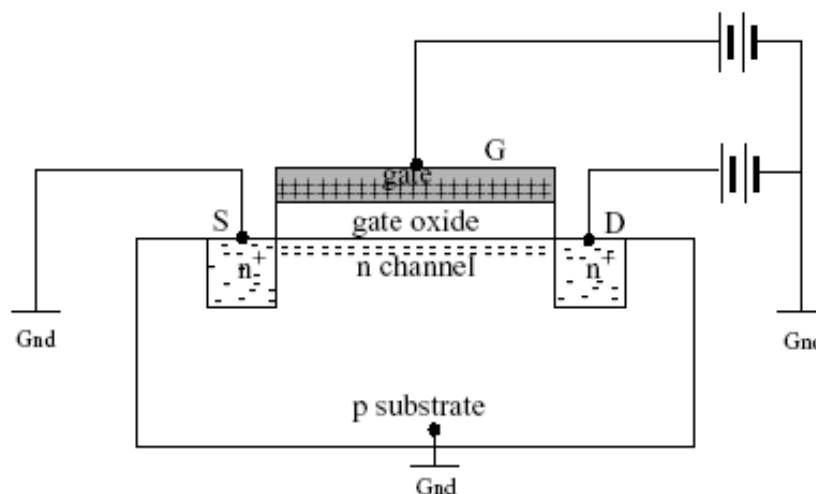
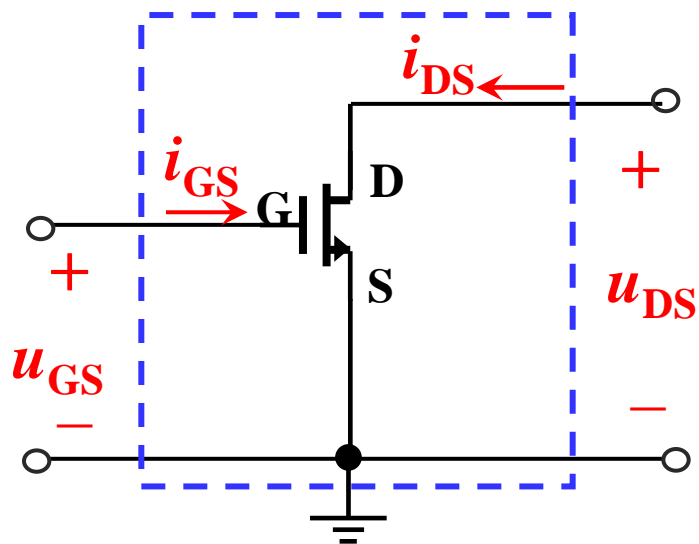


简化符号

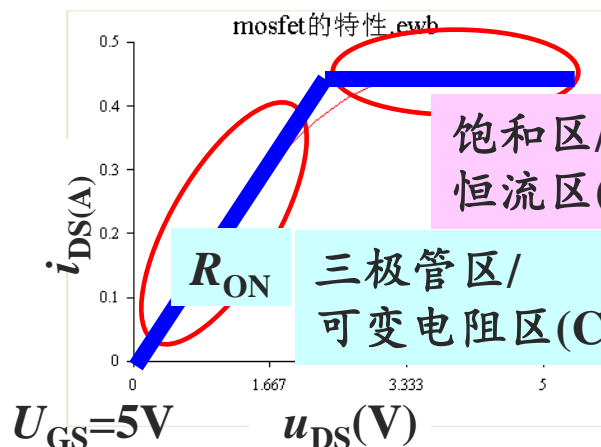


MOSFET的运行

n沟道增强型MOSFET

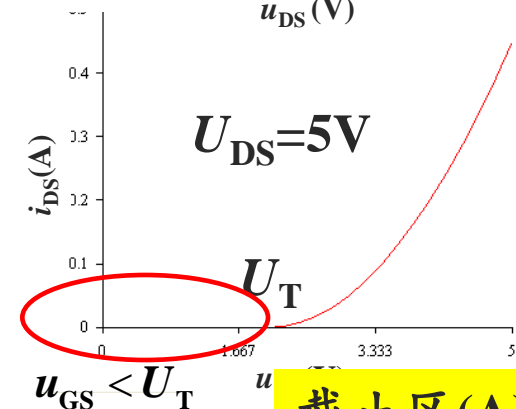
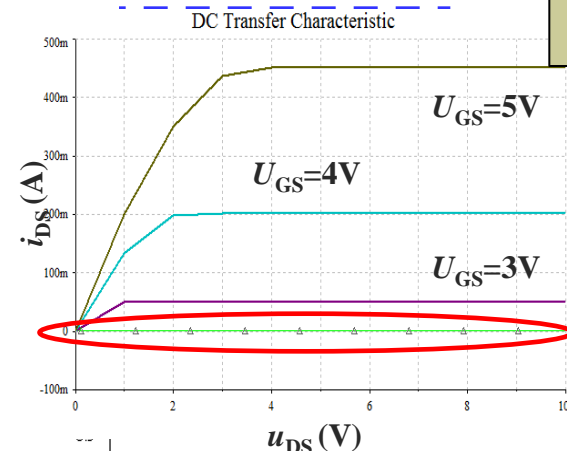


MOSFET的性质



$$u_{DS} > (u_{GS} - U_T) > 0$$

$$(u_{GS} - U_T) > u_{DS}$$



截止区(A)
 $(u_{GS} - U_T) < 0$

➤ $(u_{GS} - U_T) > 0$ 以后，MOSFET的D、S间开始导通。

➤ 导通后 $(u_{GS} - U_T) < u_{DS}$ 的时候，MOSFET的D、S间呈电流源特性。

u_{GS} 与 i_{DS} 呈二次方关系

$$i_{DS} = \frac{K(u_{GS} - U_T)^2}{2}$$

➤ 导通后 $u_{DS} < (u_{GS} - U_T)$ 的时候，MOSFET的D、S间呈电阻特性。

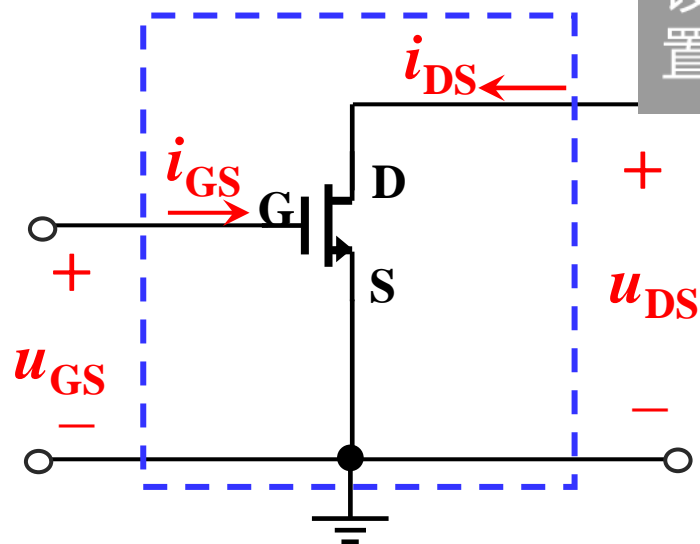
N沟道增强型MOSFET，在给定较大的 u_{GS} 下，随 u_{DS} 的增加，它会先经过____区，再到达____区

A

电阻，电流源

B

电流源，电阻

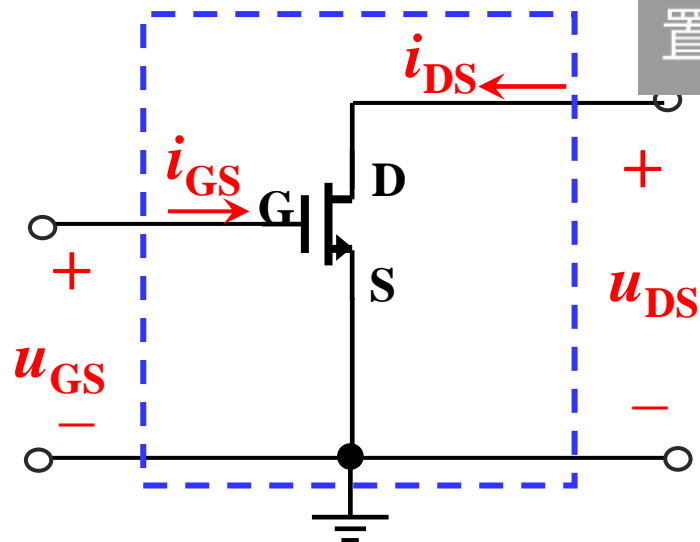


提交

N沟道增强型MOSFET，在给定的 u_{DS} 下，随 u_{GS} 的增加，它会从截止区逐渐过渡到____区和____区

A 电阻，电流源

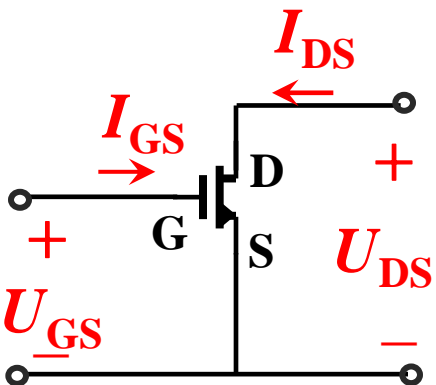
B 电流源，电阻



提交

总结

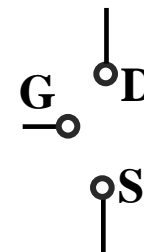
本讲中MOSFET工作于1或3



1. 截止区

条件 $(u_{GS} - U_T) < 0$

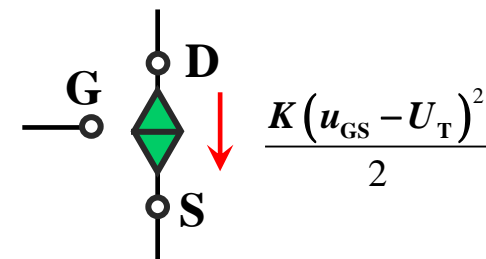
性质 $i_{DS} = 0$



2. 恒流源区

条件 $0 < (u_{GS} - U_T) < u_{DS}$

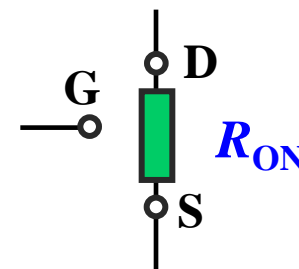
性质 $i_{DS} = \frac{K(u_{GS} - U_T)^2}{2}$



3. 电阻区

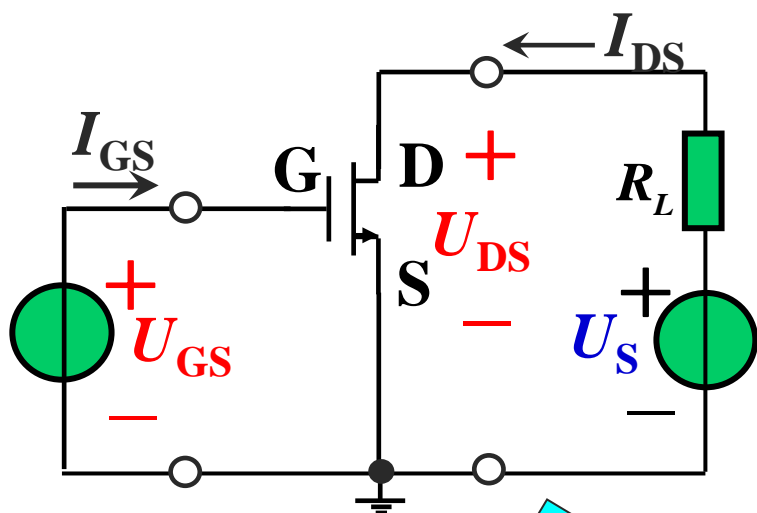
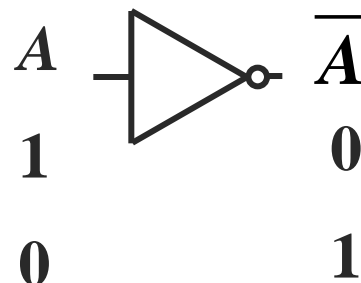
条件 $(u_{GS} - U_T) > u_{DS}$

性质 R_{ON}



2.2 用MOSFET构成逻辑门

反相器



我们希望:

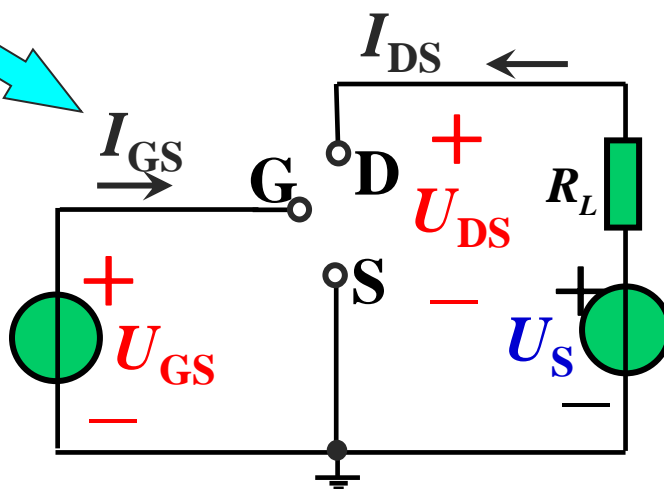
- (1) 输入 U_{GS} 为 “0” 时, 输出 U_{DS} 为 “1”
- (2) 输入 U_{GS} 为 “1” 时, 输出 U_{DS} 为 “0”

输入 U_{GS} 为 “0” 时

假设:

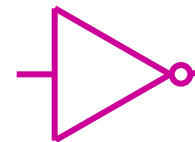
“0” \leftrightarrow 接近 0V

“1” \leftrightarrow 接近 5V

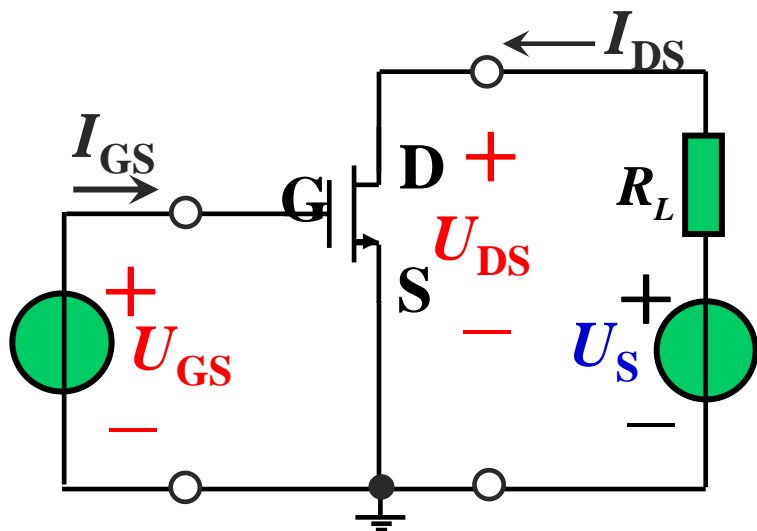


输出 U_{DS} 为 “1”

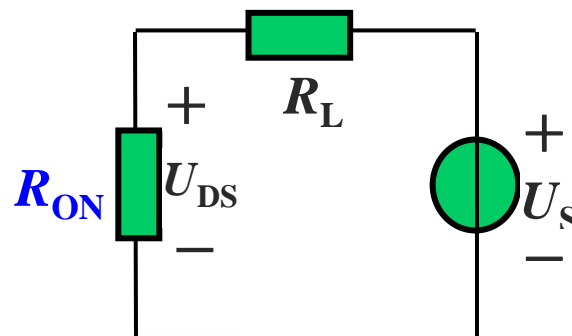
反相器 (Inverter)



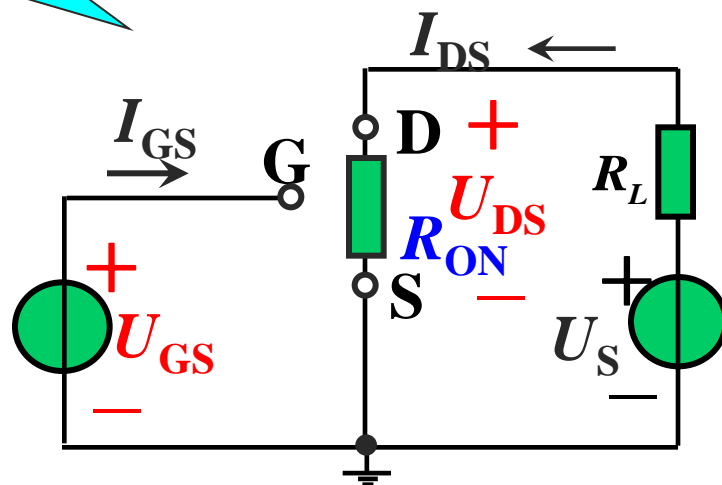
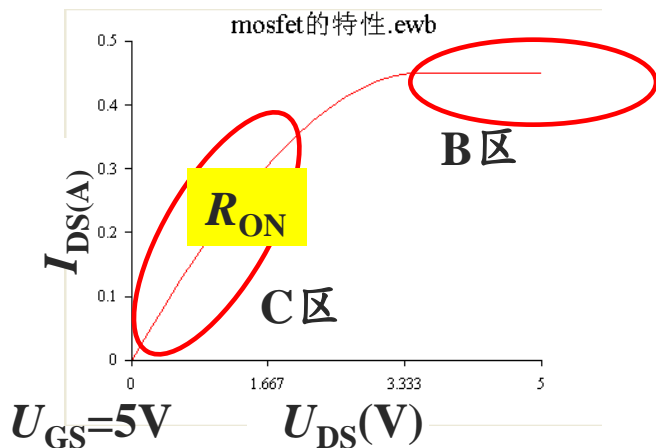
此处可以有弹幕



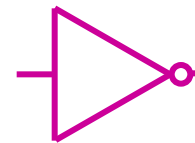
如何保证 U_{GS} 为 “1” 时，输出 U_{DS} 为 “0” ？



输入 U_{GS} 为 “1” 时

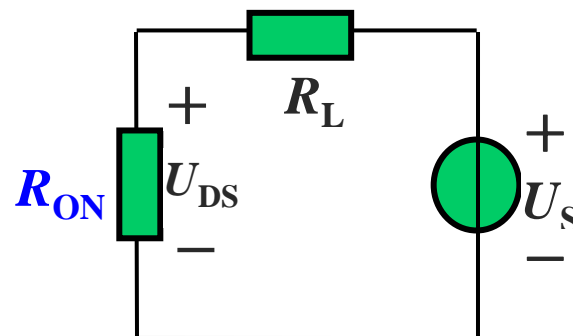
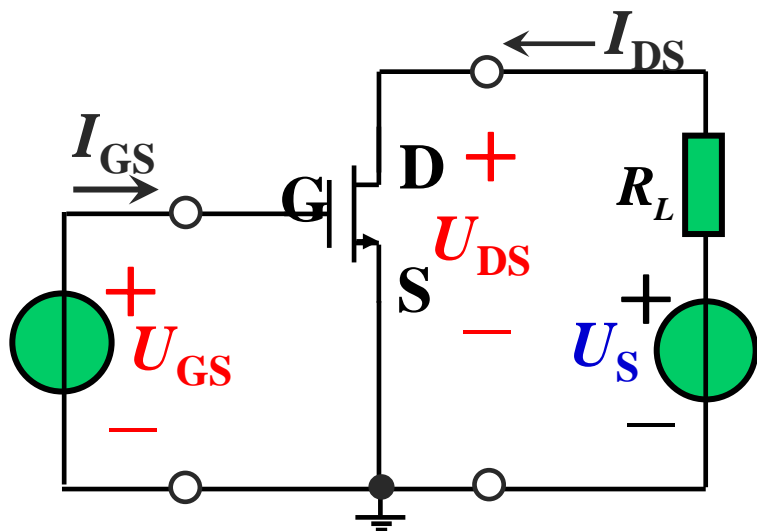


反相器 (Inverter)

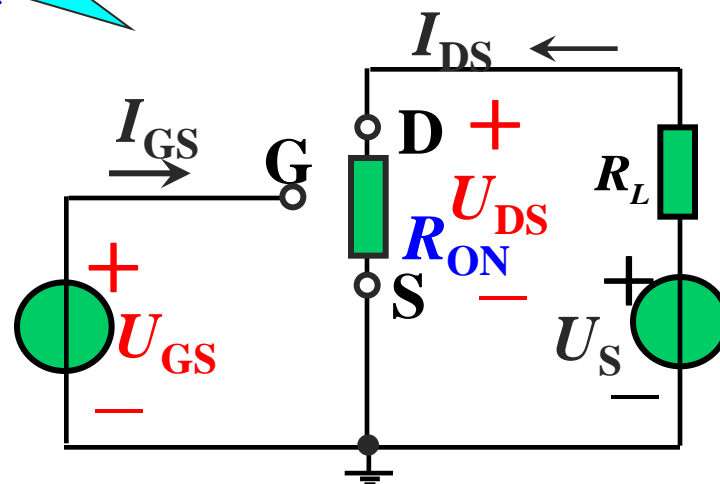
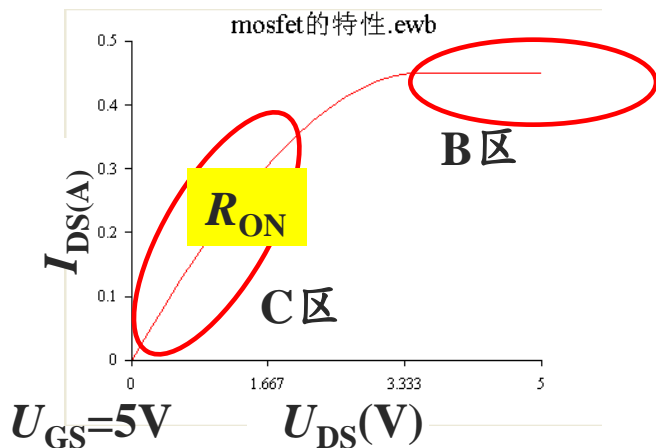


$$R_{ON} \ll R_L$$

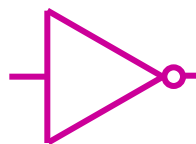
如何保证 U_{GS} 为 “1” 时，输出 U_{DS} 为 “0” ？



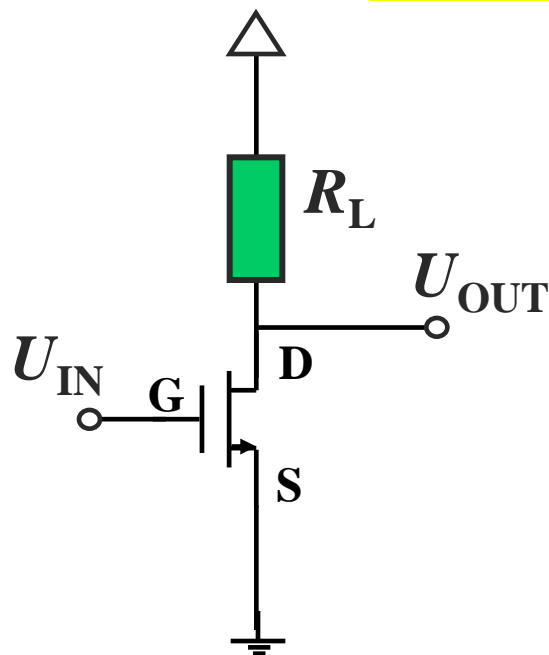
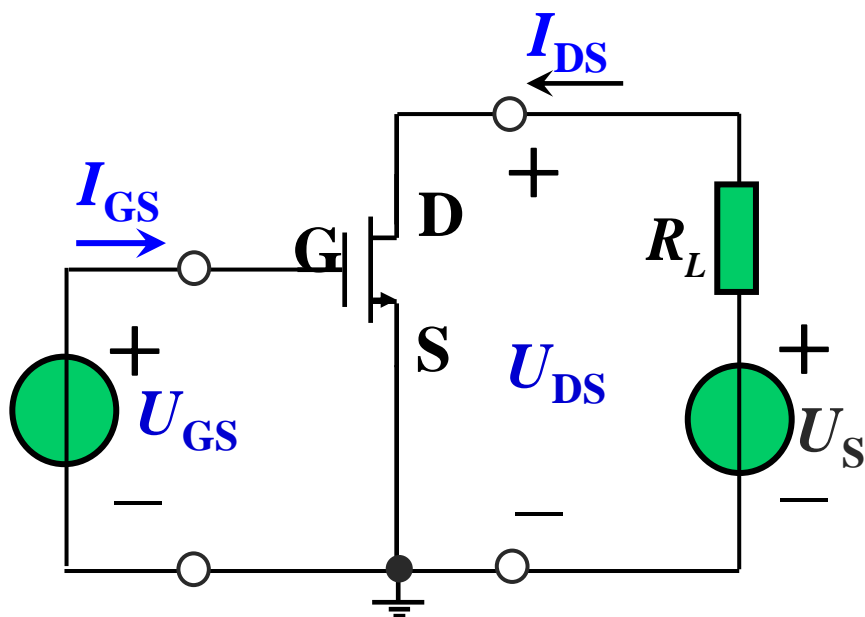
输入 U_{GS} 为 “1” 时



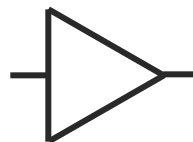
反相器



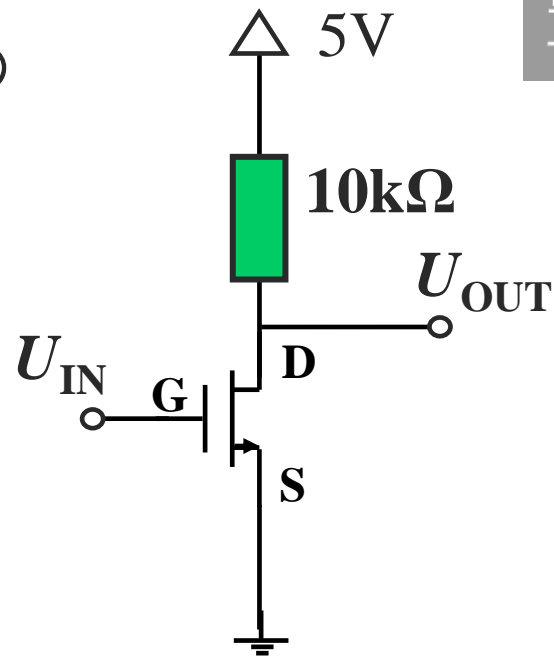
看仿真



如何构成缓冲器？



已知 $R_{on}=1k\Omega$, U_{IN} 为信号“1”时, 该电路(整个电路)消耗的功率为____mW



- ☐ A 25
- ☐ B 0.21
- ☒ C 2.27
- ☐ D 2.5

进一步问题:
为什么计算这个功率的时候,
不考虑 U_{out} 流出的电流?

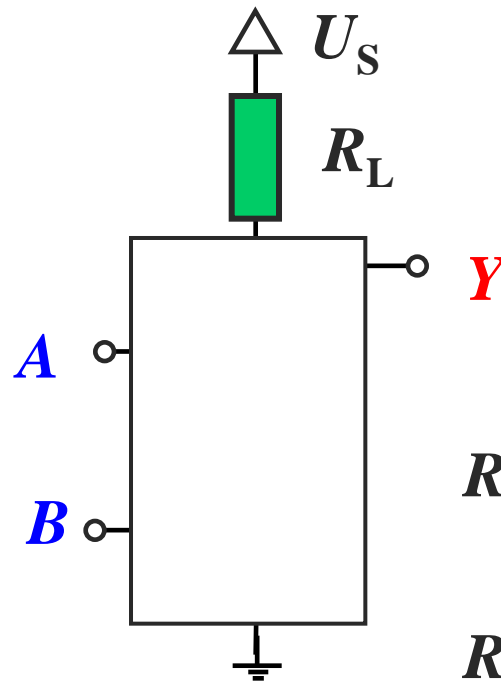
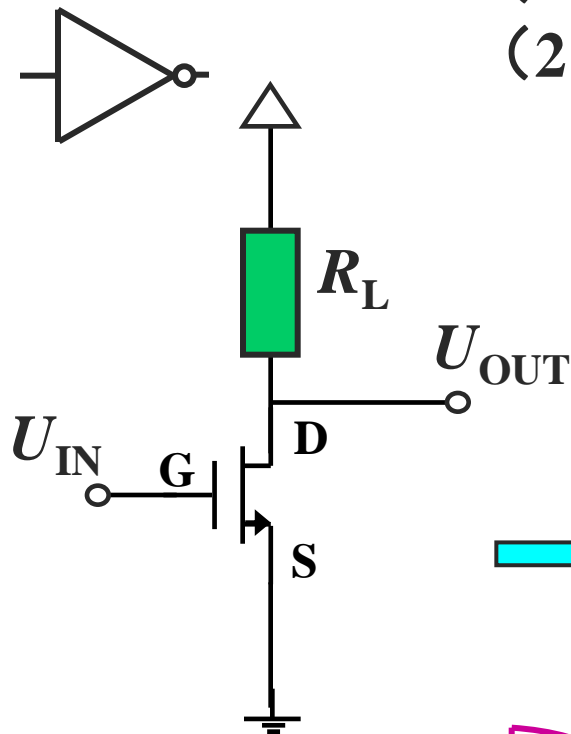
此处可以有弹幕

提交

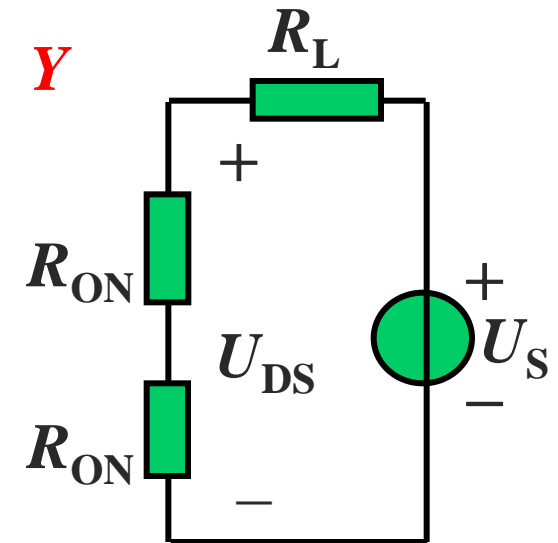
与非门 (NAND) $Y_2 = \overline{A \cdot B}$

我们希望：

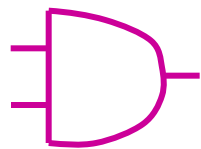
- (1) A 、 B 同时为“1”时， Y_2 为“0”；
- (2) 其余条件下， Y_2 为“1”。



$A=B=$ “1”时



如何构成与门？

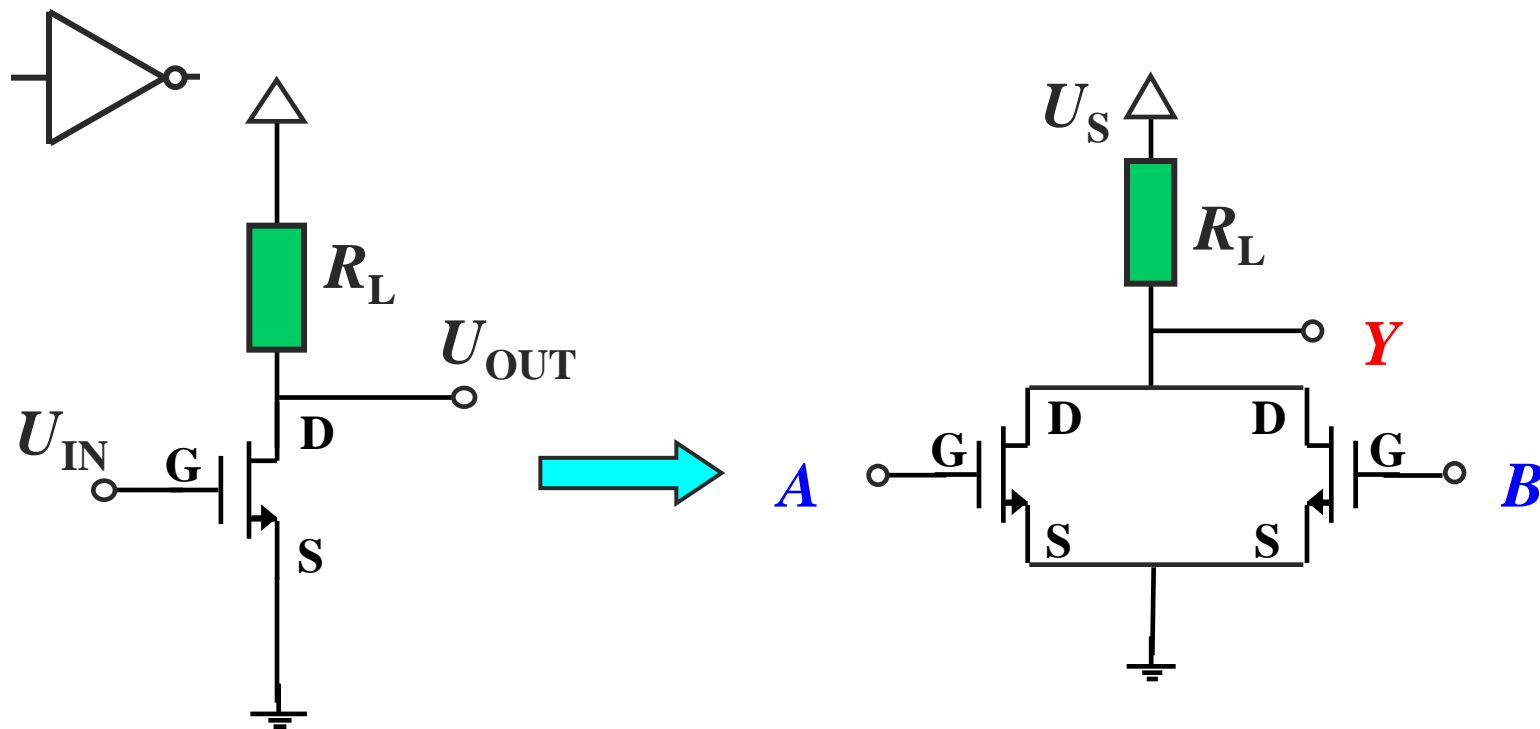


或非门 (NOR)

$$\Rightarrow Y_3 = \overline{A + B}$$

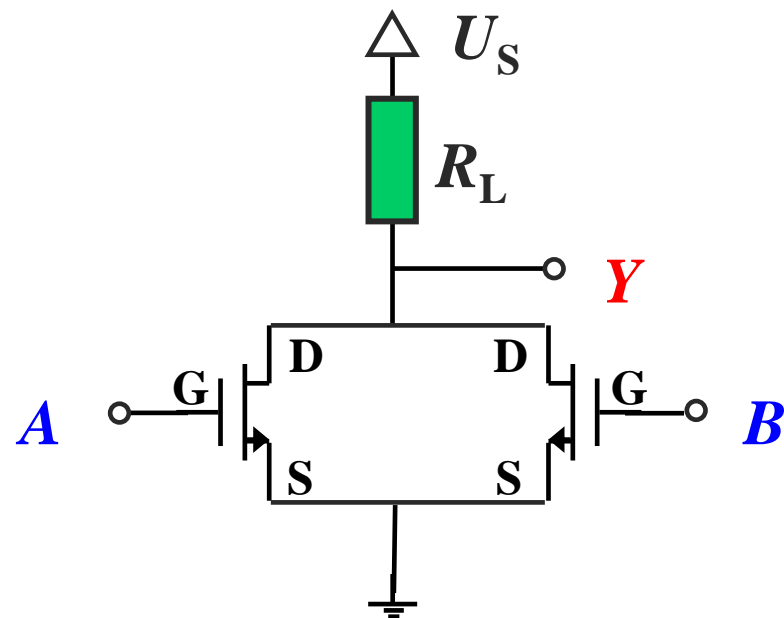
我们希望：

- (1) A 、 B 同时为“0”时， Y_2 为“1”
- (2) 其余条件下， Y_2 为“0”



下面哪个条件下，
该电路消耗的功率最大？

- ☐ A $A=0, B=0$
- ☐ B $A=0, B=1$
- ☐ C $A=1, B=0$
- ☒ D $A=1, B=1$



提交

例子：安理会某投票表决系统

- 自61班某同学受联合国委托开发一套安理会投票表决系统。要求用**5V电源**、**MOSFET**、**电阻器**、**发光二极管**和**单刀双置开关**来构成该系统。
 - 安理会由中、美、俄、法、英5国组成。
 - 每个国家只能有两种投票方式：赞成、反对。
 - 只有5个国家全部投赞成票，提案才能通过。

Step 1: 逻辑表达式

法1: 先写真值表，然后根据真值表得到逻辑表达式。

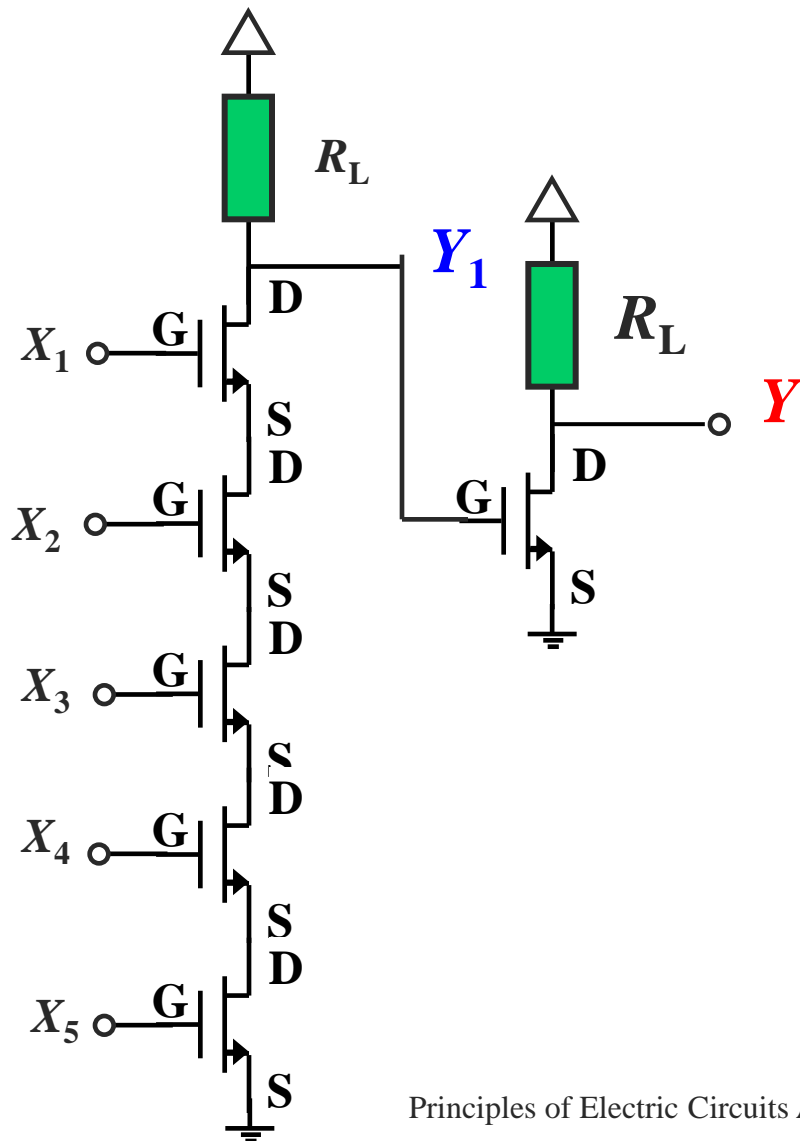
法2: 直接得到逻辑表达式。

$$Y = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5$$

其中， X_1 、.....、 X_5 分别代表5个国家的投票情况，均为逻辑值。

“1”为赞成，“0”为反对。

Step 2: 写成能够用MOSFET实现的逻辑门的组合

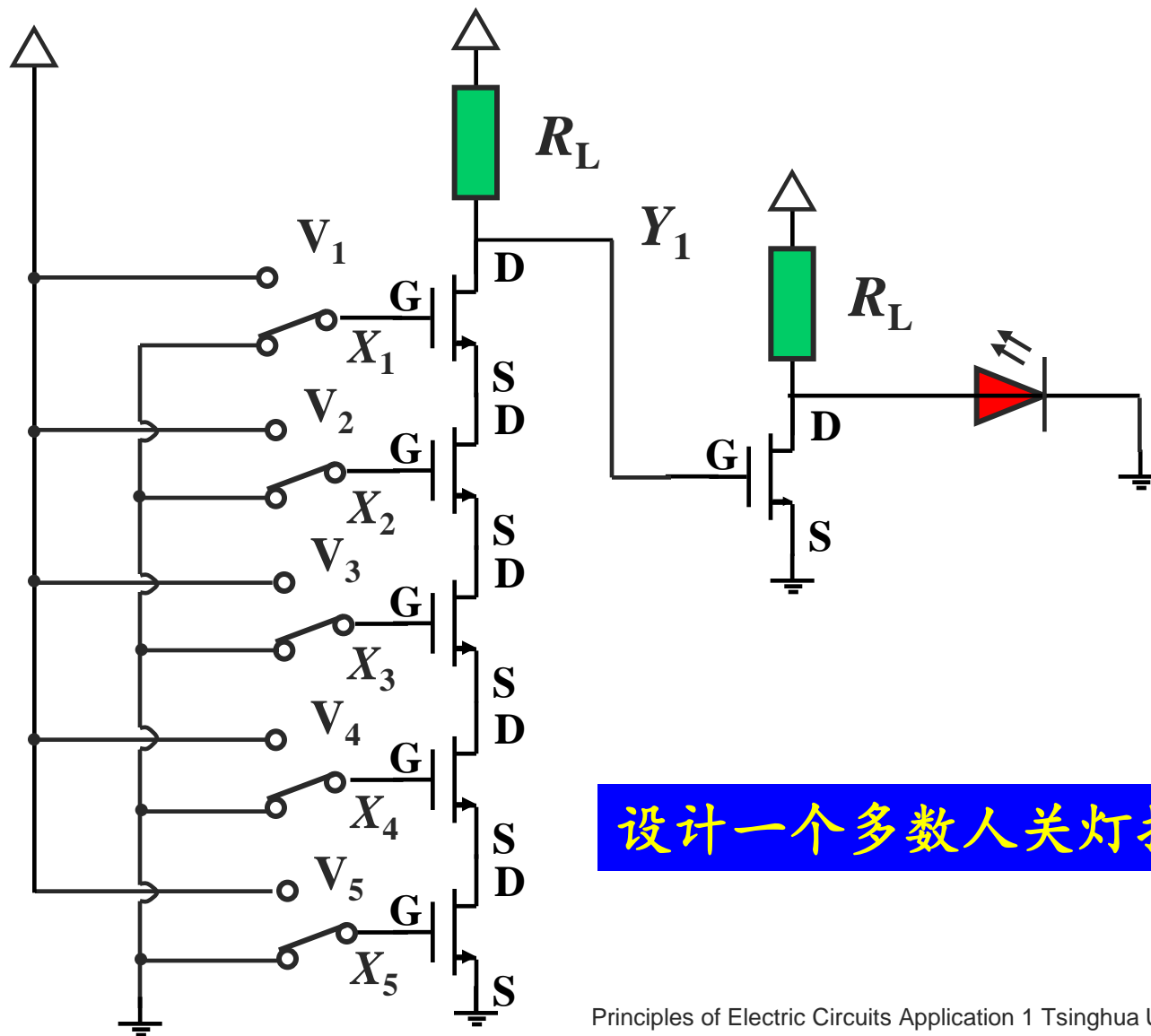


$$Y_1 = \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5}$$

$$Y = \overline{\overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5}}$$

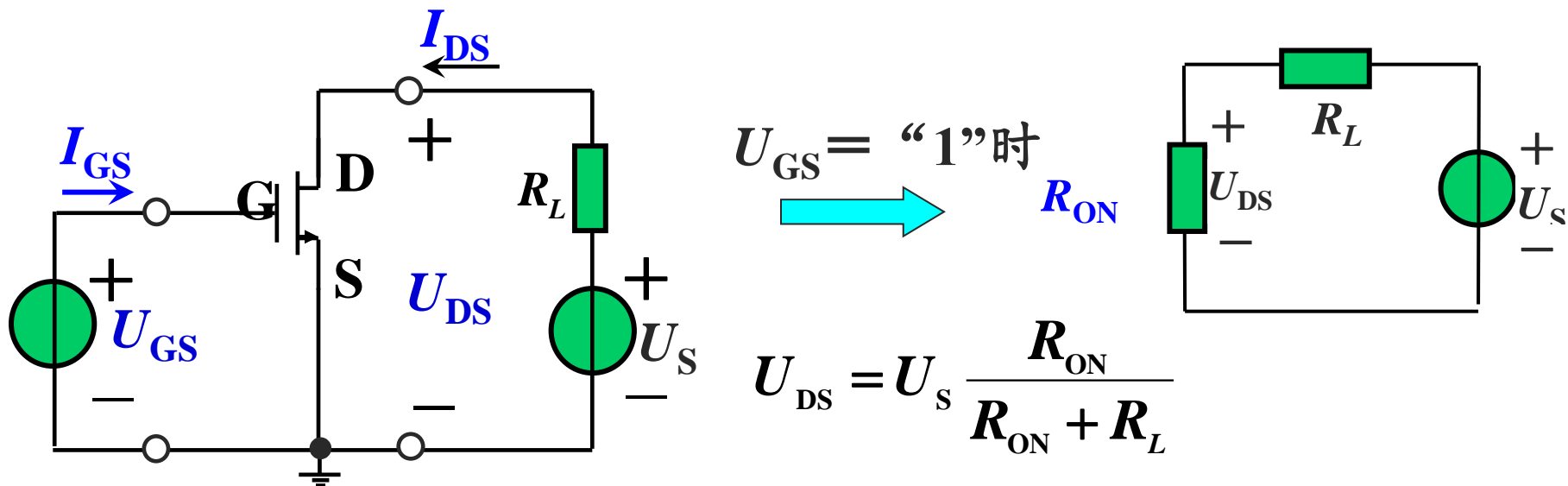
$$Y = \overline{Y_1}$$

Step 3: 构成最终的投票系统



设计一个多数人关灯投票系统？

2.3 用MOSFET构成逻辑门电路的功率分析



设 $U_S = 5V$, $R_L = 100k\Omega$, $R_{ON} = 1k\Omega \rightarrow U_{DS} \approx 50mV$

$$W_{\text{MOSFET_ABSORB}} = \frac{U_{DS}^2}{R_{ON}} = \frac{(50 \times 10^{-3})^2}{1000} = 2.5 \mu W$$

$$W_{\text{GATE_ABSORB}} = \frac{U_S^2}{R_L + R_{ON}} \approx \frac{25}{10^5} = 0.25mW$$

$$W_{\text{GATE_ABSORB}} \approx 0.25\text{mW}$$

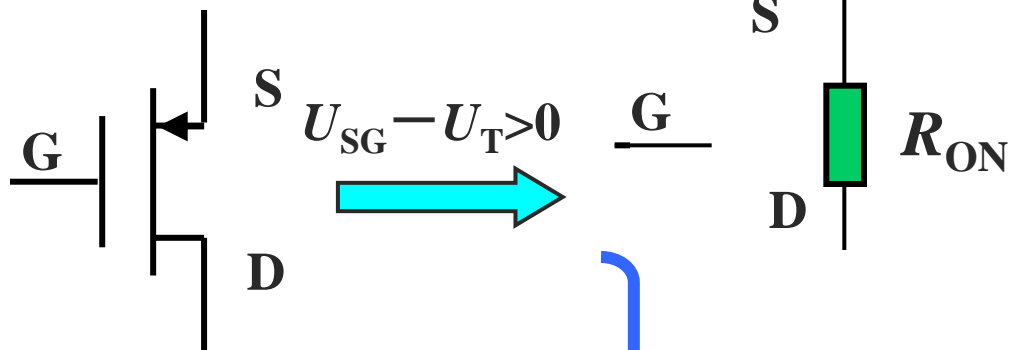
一颗i7 CPU中大约有10亿个晶体管，如果这些晶体管均为n沟道增强型MOSFET并且构成反相器，则这颗CPU消耗的功率大约为：

$$W = 10 \times 10^8 \times 0.25 \times 10^{-3} = 250\text{k W}$$

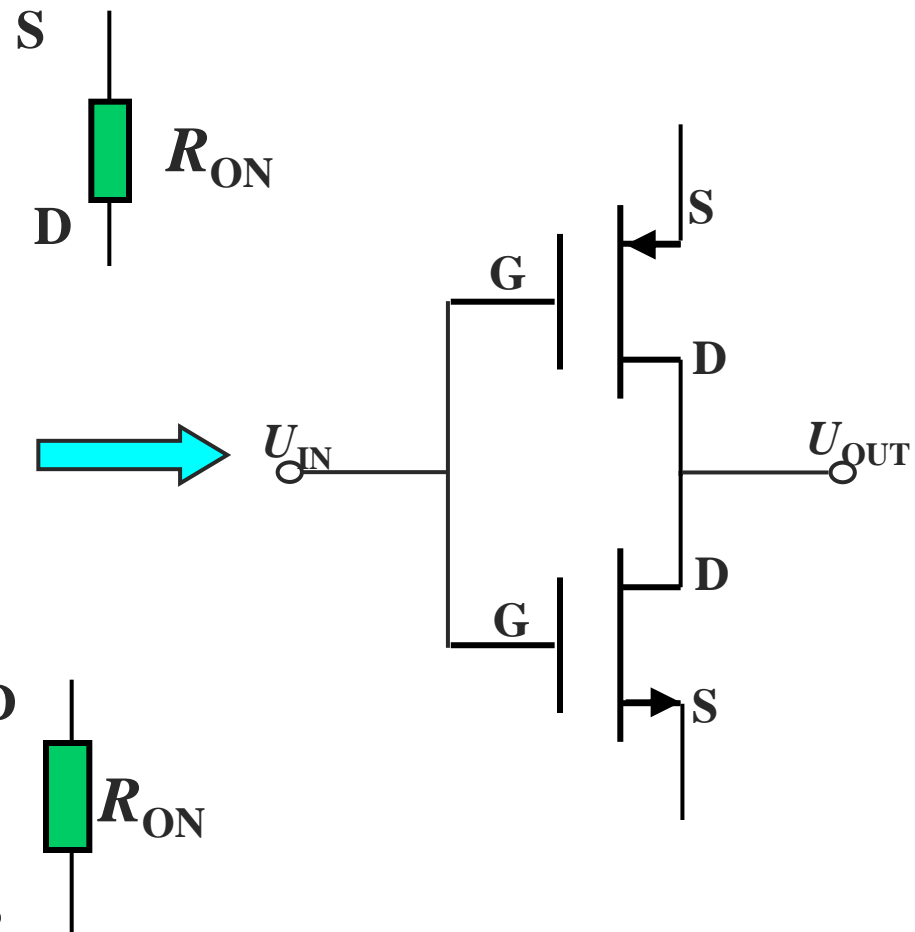
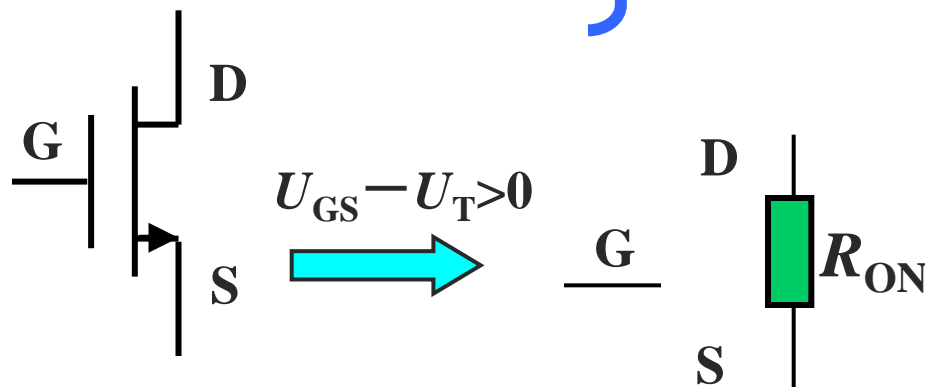
!!!

2.4 CMOS

p沟道增强型MOSFET

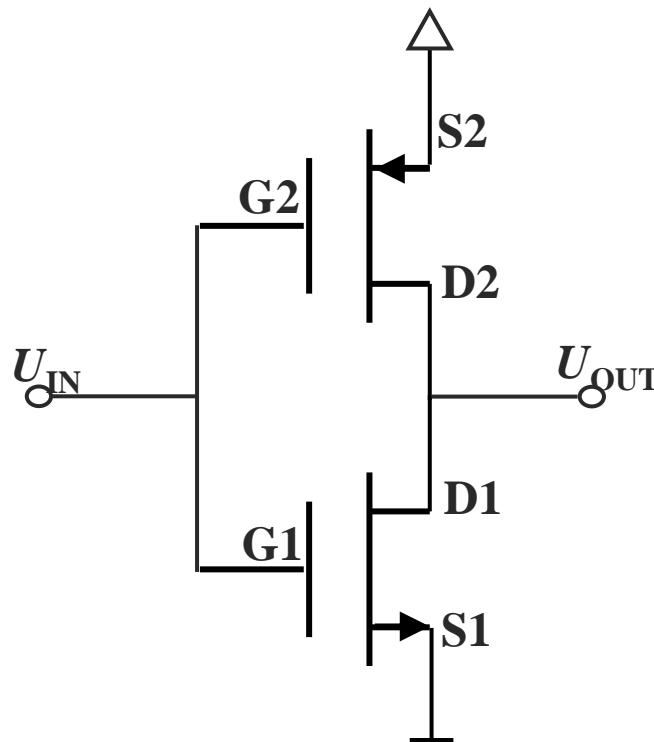


n沟道增强型MOSFET



U_{IN} 为 “1” 时，
 $S2$ 和 $D2$ 之间是什么？

- ☐ A 电阻 R_{ON}
- ☐ B 受控源
- ☒ C 开路



提交

CMOS反相器

