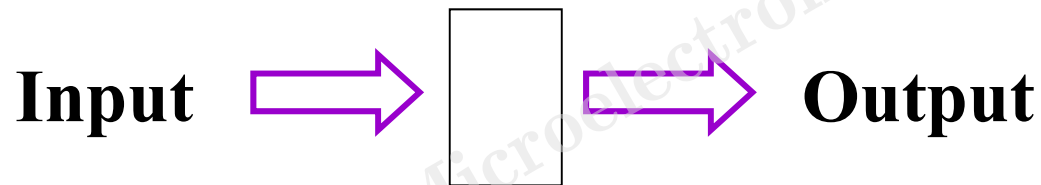


第 2 章 逻辑门电路 Logic Gates

§ 2.1 概述 Introduction

用以实现逻辑运算单元电路称为逻辑门电路。



逻辑门 Logic Gates

Output ~ Input

逻辑函数

逻辑运算和逻辑门:

二进制系统:

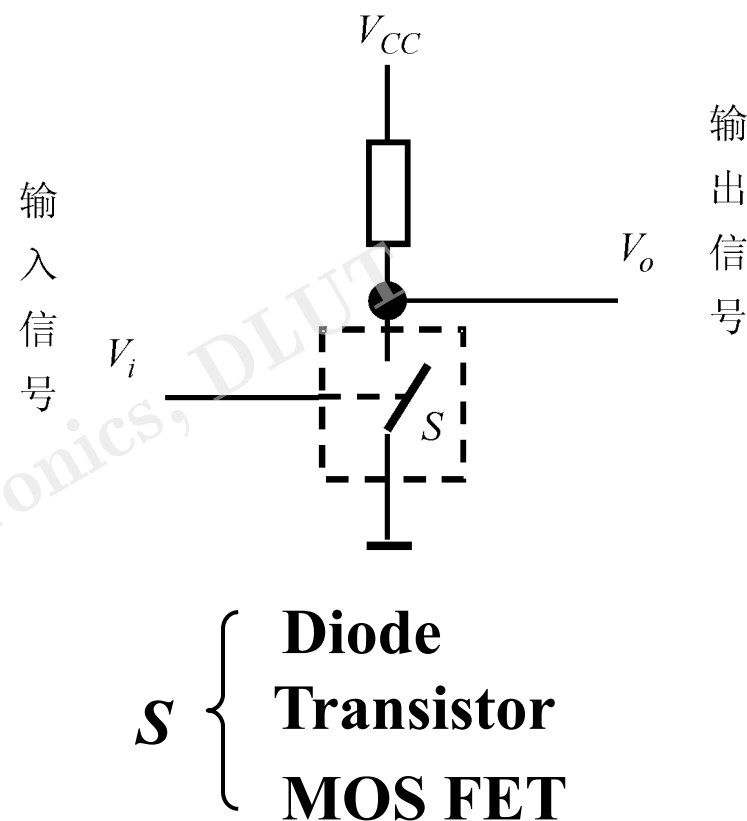
{ 逻辑高 (Logic 1)
逻辑低 (Logic 0)

用电压（电平）表示逻辑高和低：

正逻辑 { 逻辑高 – 高电平
 逻辑低 – 低电平

获得高 (logic 1)、低 (logic 0)
输出电平的基本原理：

开关 S	输出电位 V_o
断开	高
接通	低



输入信号 V_i 控制其工作在截止和导通两个状态， S 起开关作用。

§ 2.2 逻辑门电路 Logic Gates

2.2.1 基本逻辑门 Basic Logic Gates

1. 与门 (AND)

1) 与开关电路

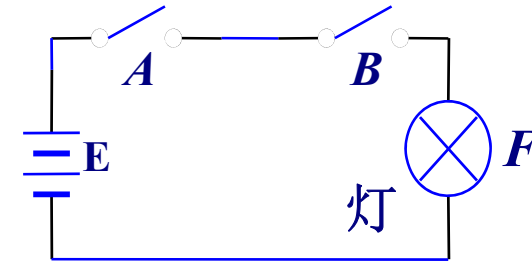


两个开关串联

只有当 A 和 B 都闭合 (逻辑 1), 灯 (F) 才亮 (逻辑 1)。

2) 真值表 Truth Table

输入的所有可能取值按二进制数大小排列在左
对应的输出列在右

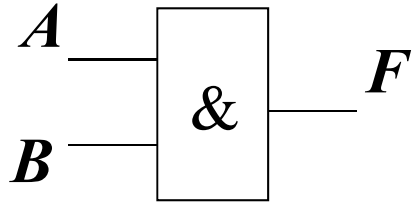


<i>A</i>	<i>B</i>	<i>F</i>
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

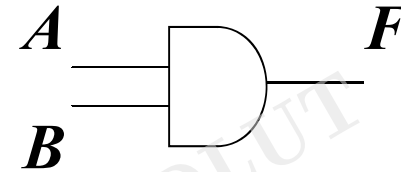
3) 与功能

输入只要有低，输出为低；
输入都为高时，输出为高。

4) 与门符号及表达式



IEC标准符号



ANSI/IEEE 标准符号

International Electrotechnical
Committee

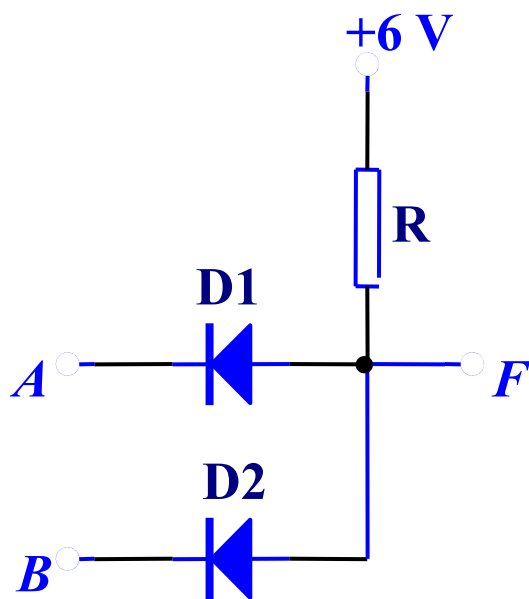
American National Standard Institute
/ Institute of Electrical and Electronics Engineers

最多 8 输入端

表达式: $F = A \cdot B = AB$

(A and B) (逻辑乘)

5) 与门电路



当 $A=0$ (Low), D1 导通,

D1 钳位 0.7 V , $F = 0.7\text{ V}$

→ 0 (Low)

当 $B=0$, or $A=B=0$ 时,

情况相同。(真值表前3行)

A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

当 $A=B=1$ (High, 6 V), D1 和 D2 都截止,

$F=1$ (High, 6 V) (真值表最后1行)

6) 与运算 AND operation

$$0 \cdot 0 = 0$$

$$0 \cdot 1 = 1 \cdot 0 = 0$$

$$1 \cdot 1 = 1$$

$$A \cdot 0 = 0$$

$$A \cdot 1 = A$$

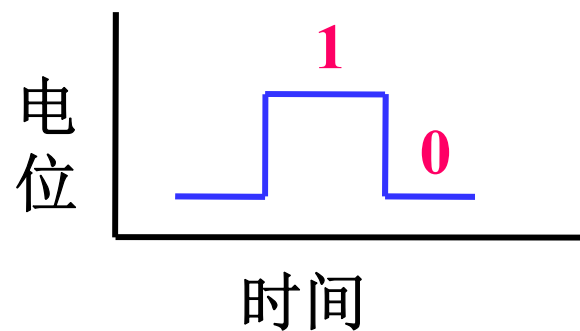
$$A \cdot A = A$$

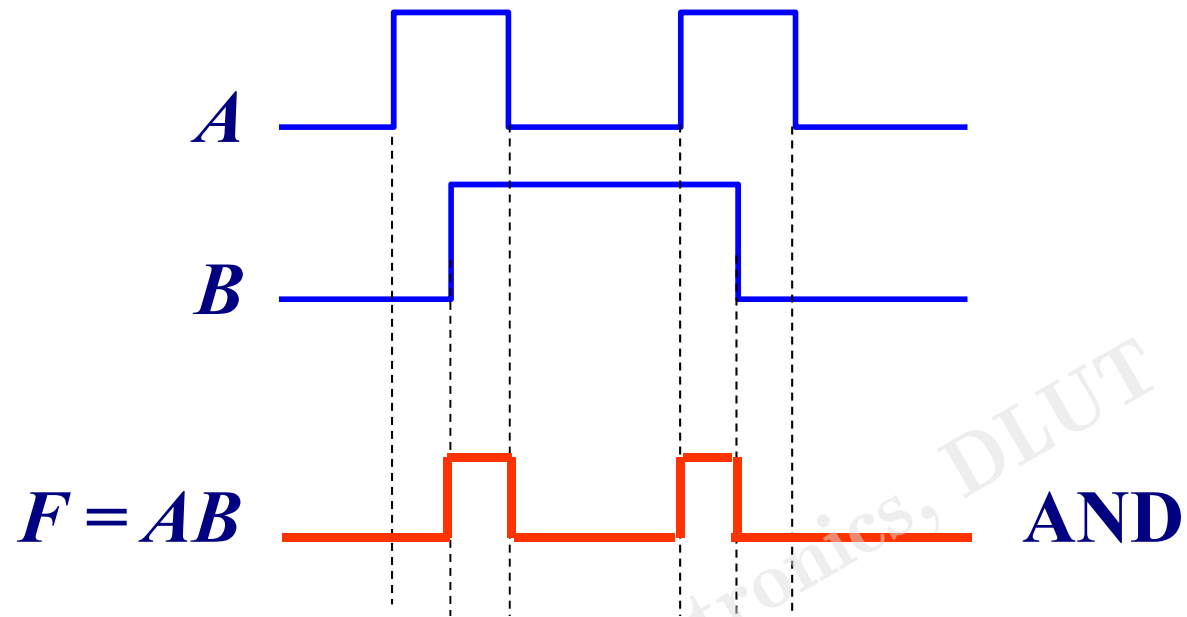
$$A \cdot \overline{A} = 0$$

A : 变量输入

7) 波形图, 时序图

Output waveforms
Timing diagrams





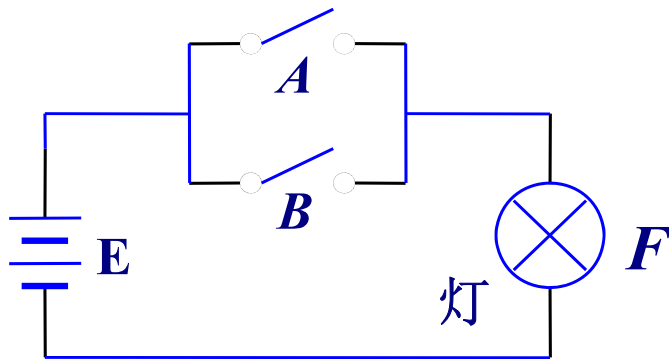
输出波形必须对应输入波形

A	B	F
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

输入只要有低，输出为低；
输入都为高时，输出为高。

2. 或 (OR)

1) 或开关电路



2) 真值表

A	B	F
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

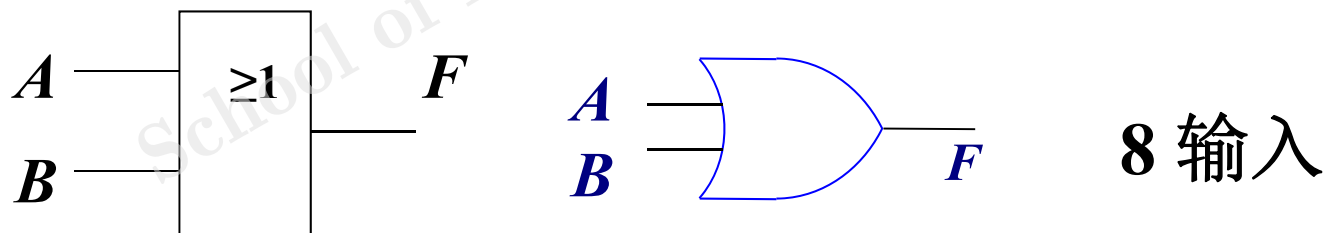
两个开关 (A, B) 并联

任何一个开关闭合, 灯 F 亮。

3) 或功能描述

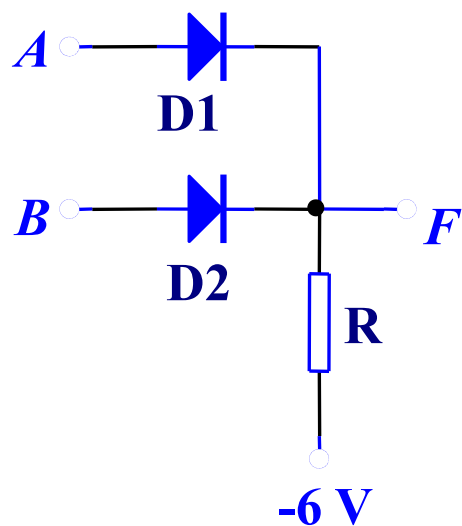
只要有一个输入为高电平1，输出就为高电平1；
只有输入全为低电平0时，输出才为低电平0。

4) 或门符号及表达式



$$F = A + B \quad \text{逻辑加}$$

5) 或门电路



<i>A</i>	<i>B</i>	<i>F</i>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

当 $A=B=0$ (-6 V, Low),

D1 和 D2 截止, $F=0$ (Low);

当 $A=1$ (High), D1 导通,

$F=1$ (High).

(减0.7 V仍为高电平)

当 $B=1$, or $A=B=1$ 时, 情况相同.

6) 或运算

$$0+0=0$$

$$0+1=1$$

$$1+1=1$$

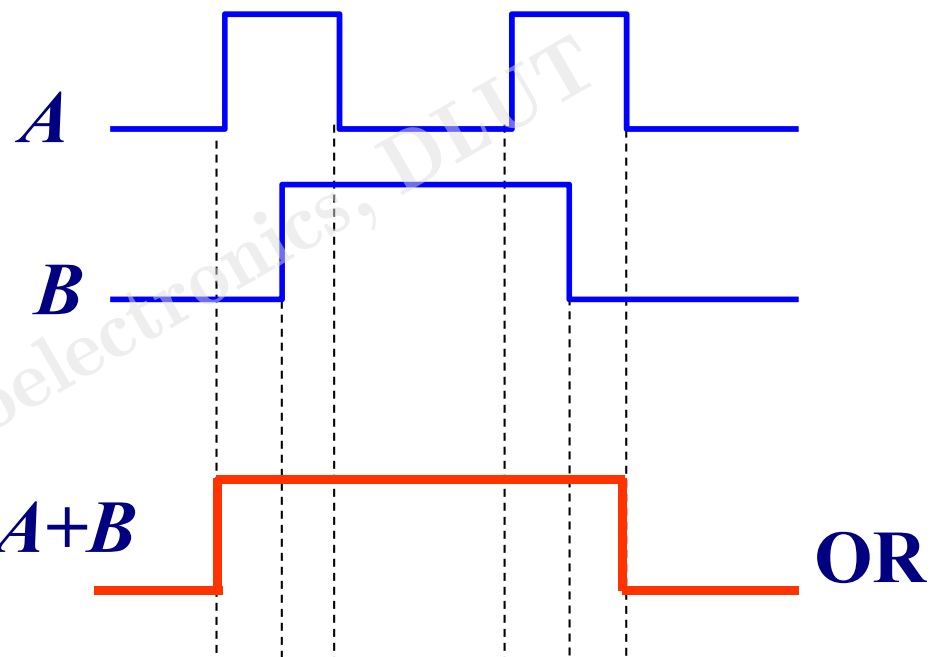
$$A+0=A$$

$$A+1=1$$

$$A+A=A$$

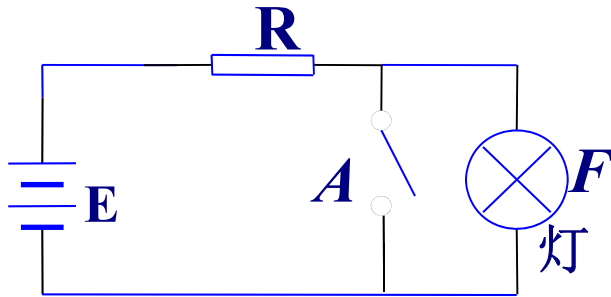
$$A+\overline{A}=1$$

7) 波形图



3. 非门 (NOT)

1) 非开关电路



如果 A 闭合, 灯 F 灭。

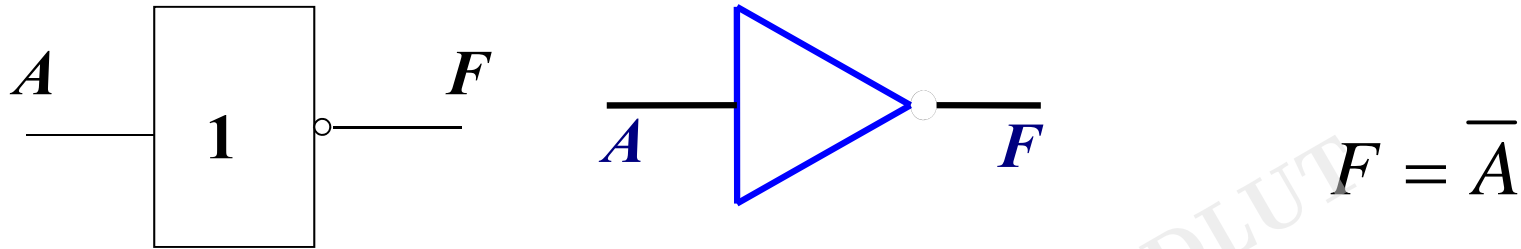
2) 真值表

A	F
0	1
1	0

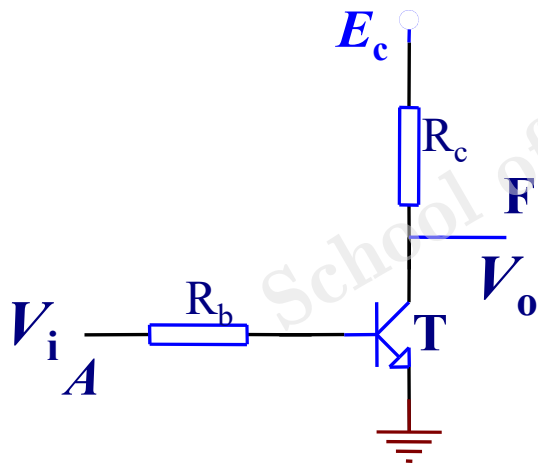
3) 非功能描述

输出与输入波形相反,
产生反向输出波形。

4) 非门符号及表达式



5) 非门电路



V_i	V_o
0	E_c (1) T 截止
1	V_{ces} (0) T 导通

6) 非运算

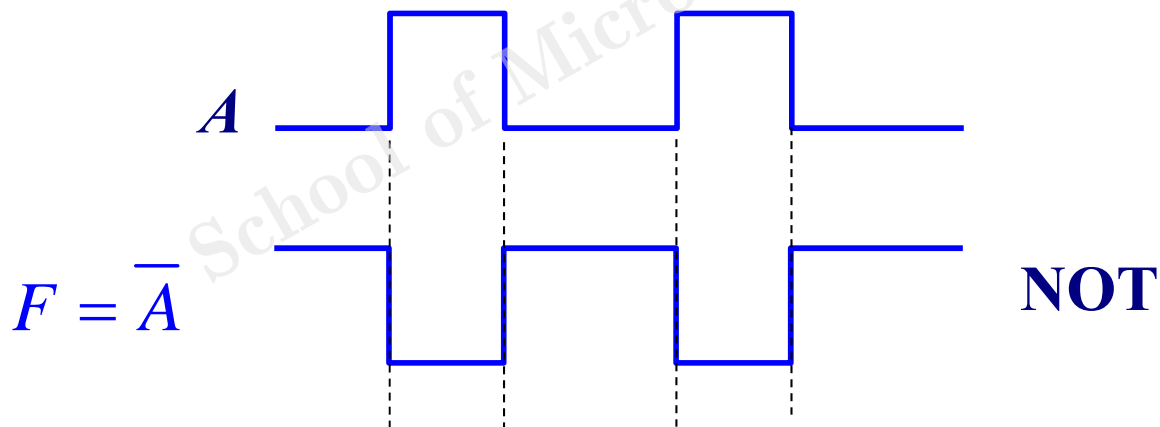
$$\bar{0} = 1 \quad \bar{1} = 0$$

$$\overline{\bar{A}} = A$$

$$A \cdot \bar{A} = 0$$

$$A + \bar{A} = 1$$

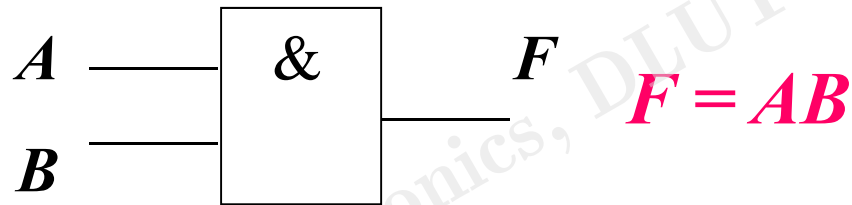
7) 波形图



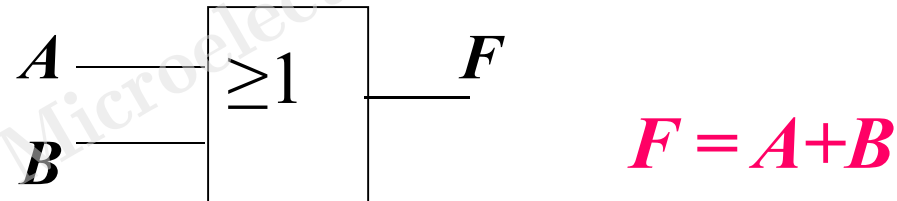
2.2.2 复合逻辑门 Integrated Logic Gate

逻辑门及表达式

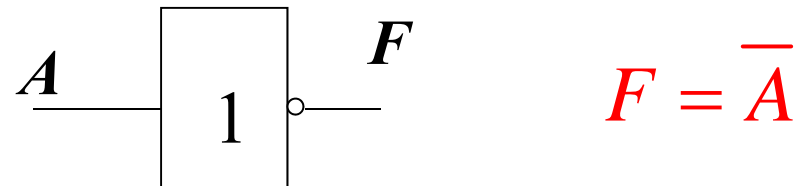
1. 与门 (AND)



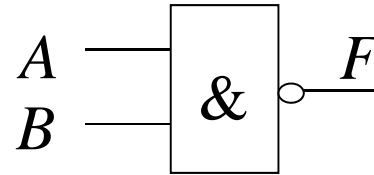
2. 或门 (OR)



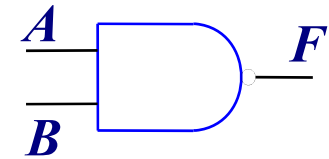
3. 非门 (NOT)



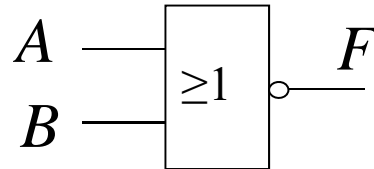
4. 与非门(NAND)



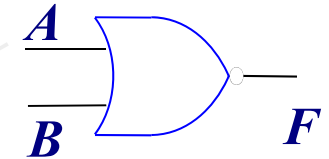
$$F = \overline{AB}$$



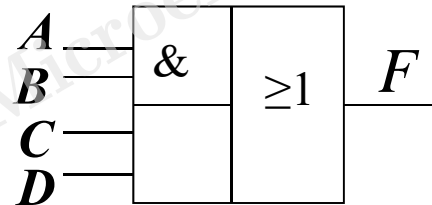
5. 或非门(NOR)



$$F = \overline{A + B}$$

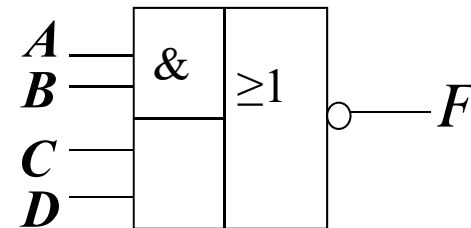


6. 与或门 (AND-OR)



$$F = AB + CD$$

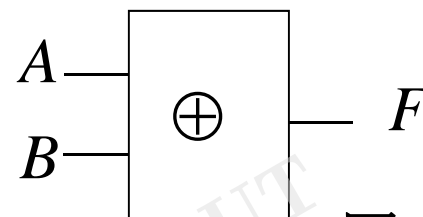
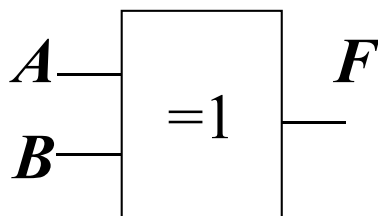
7. 与或非门 (AND-OR-NOT)



$$F = \overline{AB + CD}$$

8. 异或门 (XOR : Exclusive - OR)

$$F = A \oplus B$$
$$= \overline{A}B + A\overline{B}$$



国内使用

真值表:

<i>A</i>	<i>B</i>	<i>F(xor)</i>
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

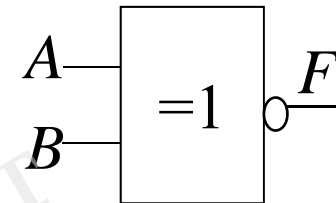
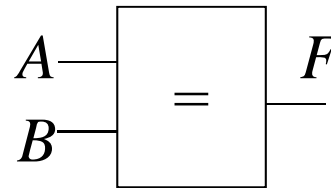
输入端只有2个且必须 2 个，
两输入相异时输出高电平。

功能:

比较(判断)两输入是否相异:

$\begin{cases} \text{Yes: 1 (肯定)} \\ \text{No: 0 (否定)} \end{cases}$

9. 同或门 (XNOR: Exclusive-NOR)



真值表:

A	B	F (XOR)	F (XNOR)
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	0	1

$$F = A \odot B = AB + \bar{A} \cdot \bar{B}$$

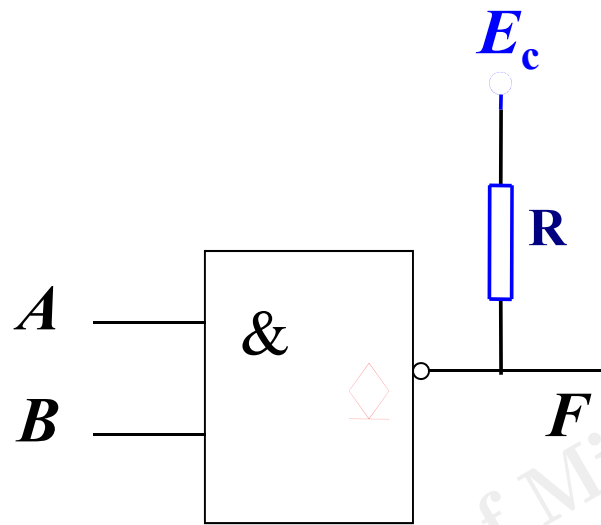
$$F = \overline{A \oplus B}$$

同或门2输入，输出与
异或门相反；两输入相
同时输出高电平。

功能：比较(判断)两输入是否相同 $\begin{cases} \text{Yes: 1} \\ \text{No: 0} \end{cases}$

10. 集电极开路与非门

(OC: Open collector NAND Gate)

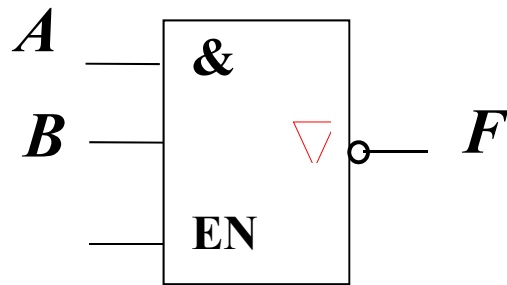


$$F = \overline{AB}$$

11. 三态门 (TSL: Three State Logic)

Tristates: 1, 0, Hi-Z (高阻态)
impedance

1) 高电平有效 (Active High)

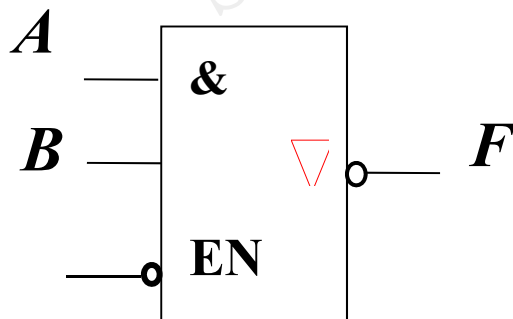


EN: 使能输入端 enable input

EN=1, $F = \overline{AB}$ (与非门)

EN=0, $F = \text{Hi-Z}$ (高阻抗)

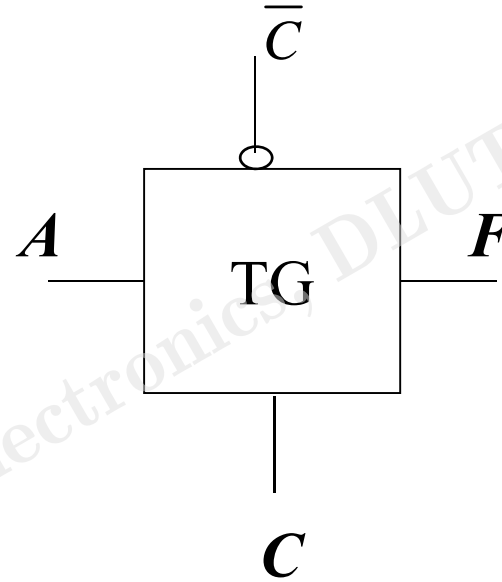
2) 低电平有效 (Active Low)



EN=0, $F = \overline{AB}$ (与非门)

EN=1, $F = \text{Hi-Z}$

12. 传输门 (TG: Transmission Gate)



C : Control

$C=1, \overline{C}=0$, $F=A$ (开关合上信号传过)

$C=0, \overline{C}=1$, (开关断开)

§ 2.3 TTL 集成门电路

TTL Integrated Logic Gates

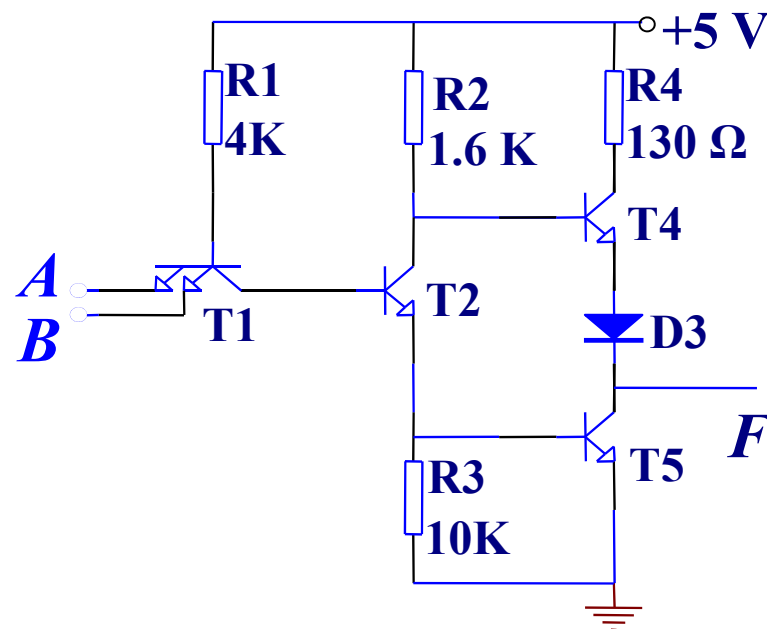
Transistor-Transistor- Logic

2.3.2 TTL 与非门 TTL NAND Gates

1. 工作原理

$$F = \overline{AB}$$

T1: 两发射极 (多发射极),
两个eb结



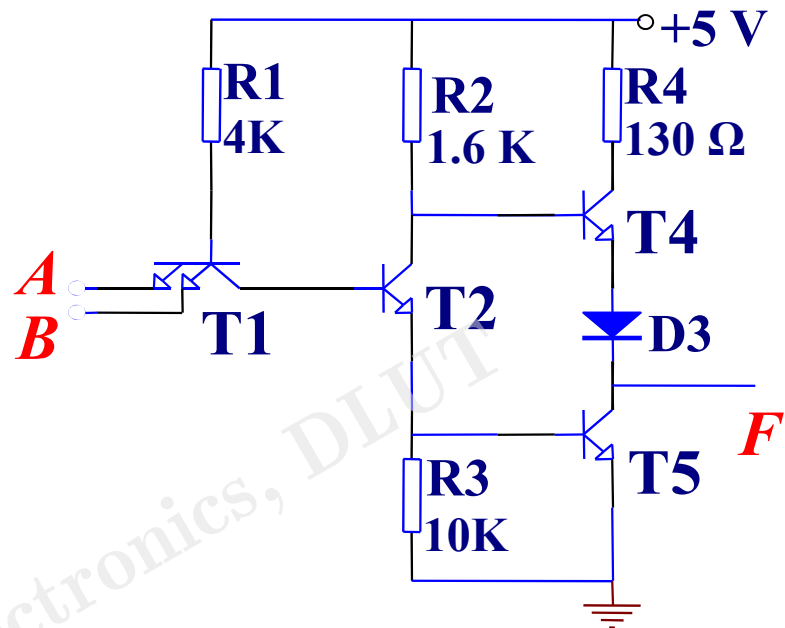
$$F = \overline{AB}$$

与非门真值表

A	B	F
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

A 或 B 或二者为低, F 为高电平

$\rightarrow A$ 和 B 都为高电平时, F 为低电平



1) 入端有低 (either or both)

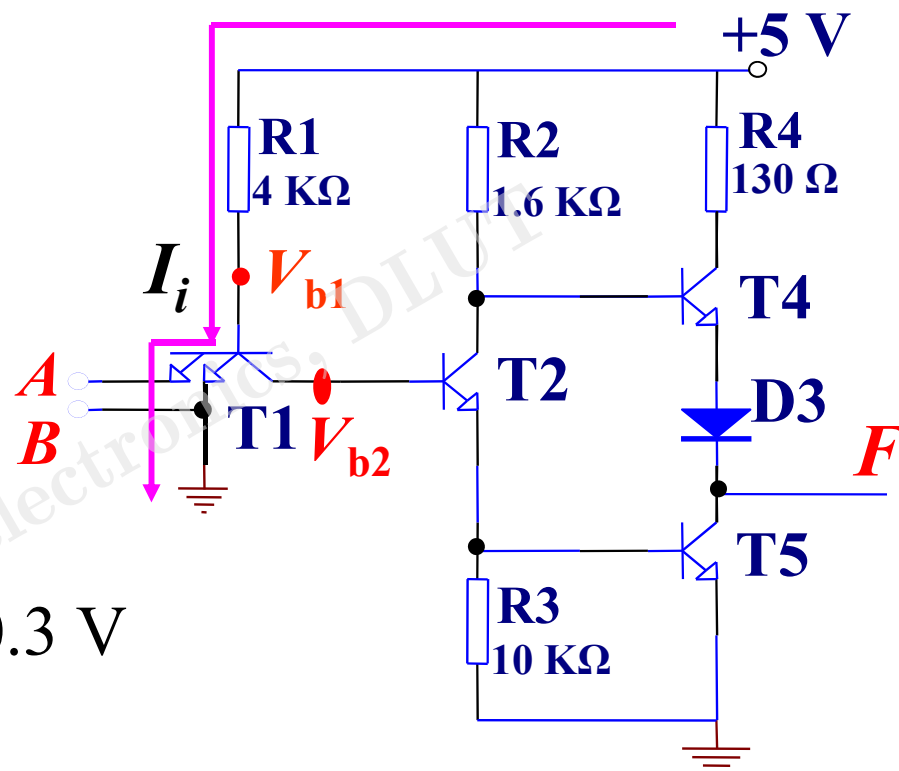
A 或 *B* 或二者接地，
T1导通，电流从 +5 V
电源经 **R1** 和 **T1** 到地。

$$I_i = \frac{5 - 0.7}{4 \times 10^3} = 1.1 \text{ mA}$$

$$V_{b1} = 0.7 \text{ V} \quad V_{c1} = V_{b2} = 0.3 \text{ V}$$

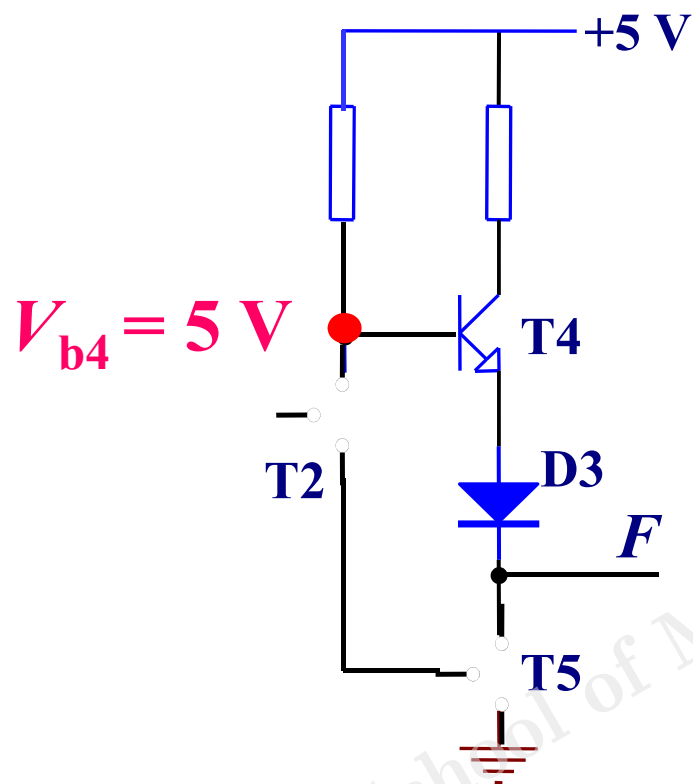
0.3 V 不足以使 **T2_{be}** 正向导通

∴ **T2** 截止，**T5** 截止



T2、T5 截止

等效电路:



$$V_{b4} \approx 5V$$

输出

$$F = 5 - 0.7V - 0.7V = 3.6V$$

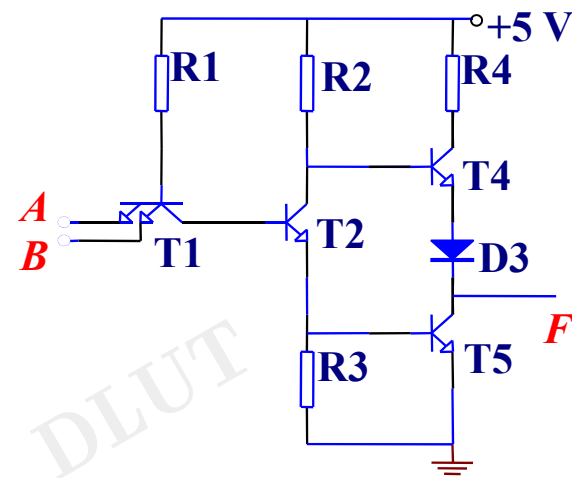
$T4_{be}$

D3

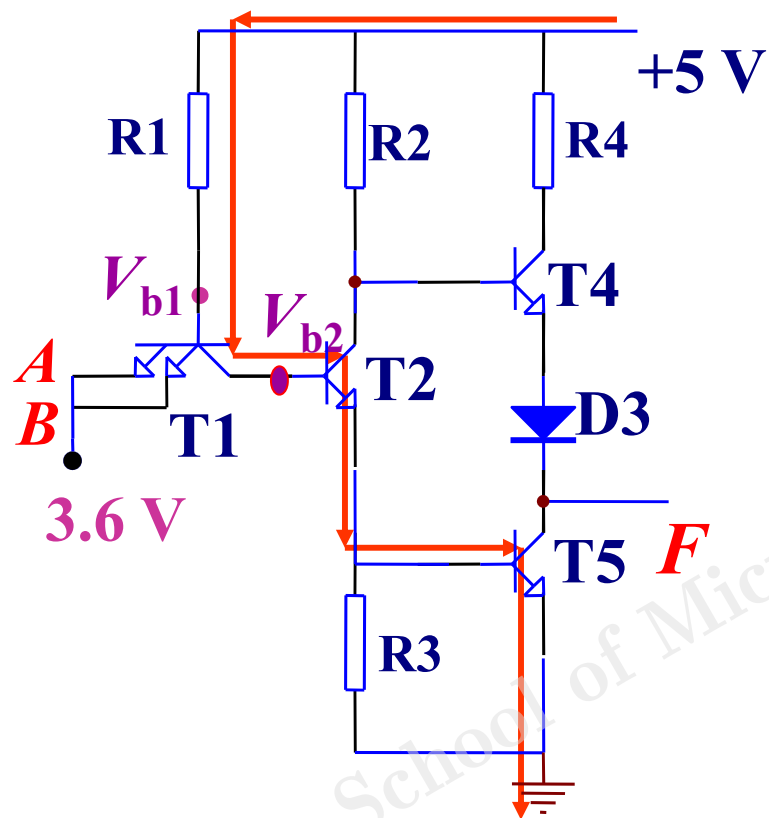
典型高电平

输入端有低电平，输出为高电平。

关门状态



2) 入都为高 (A 和 B 都为高电平) 3.6 V



A 和 B 都是 3.6 V ,

$T1$ 导通,

V_{b1} 钳位 4.3 V ($=3.6 + 0.7$),

V_{b2} 钳位 3.9 V ($=3.6 + 0.3$).

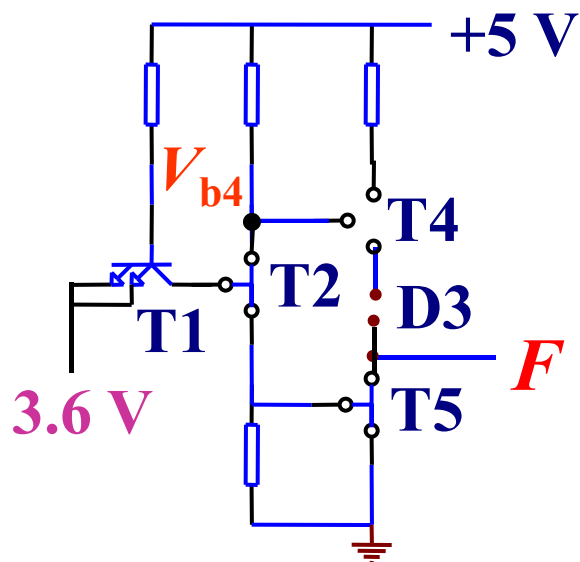
3.9 V 足以正向导通

$T2_{be}$ 和 $T5_{be}$ 结。

$\therefore T2, T5$ 导通

电流从 $+5\text{ V}$ 电源, 经 $T1, T2$ 和 $T5$ 流向地.

等效电路:



输入全高, 输出低.

开门状态

实现与非功能:

$$F = \overline{AB}$$

T2 和 T5导通,

$$\begin{aligned} V_{b4} &= V_{be5} + V_{ce2} \\ &= 0.7 + 0.3 = 1.0 \text{ V} \end{aligned}$$

V_{b4} 不足以
正向导通T4_{be} 和 D3

T4, D3 截止

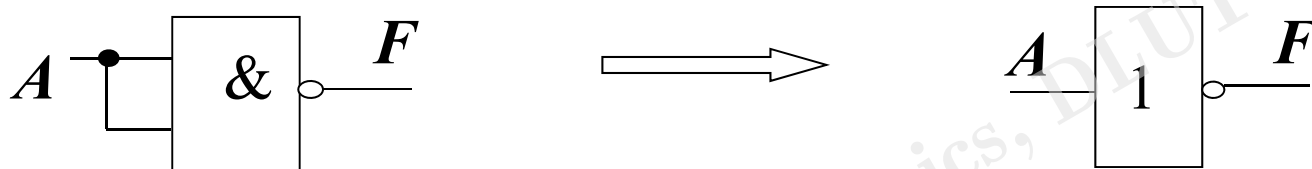
输出

$$F = V_{ce5} = 0.1 \sim 0.3 \text{ V (低)}$$

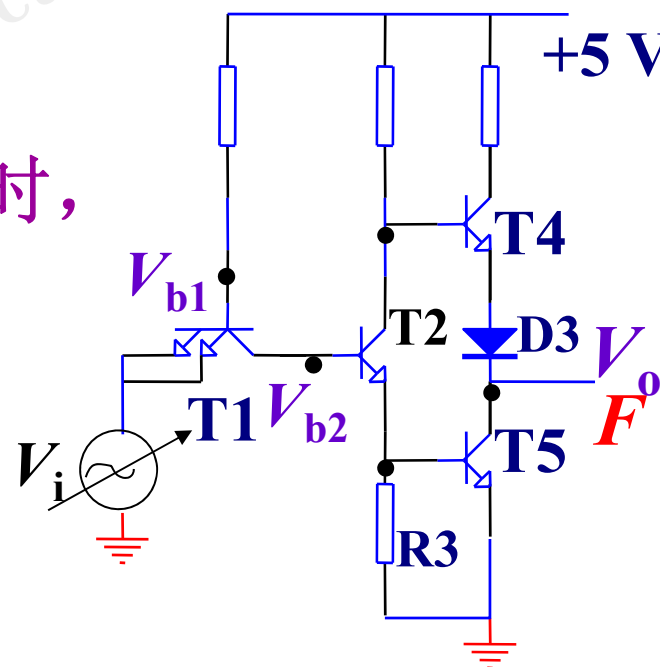
T5 饱和压降

2. 电压传输特性

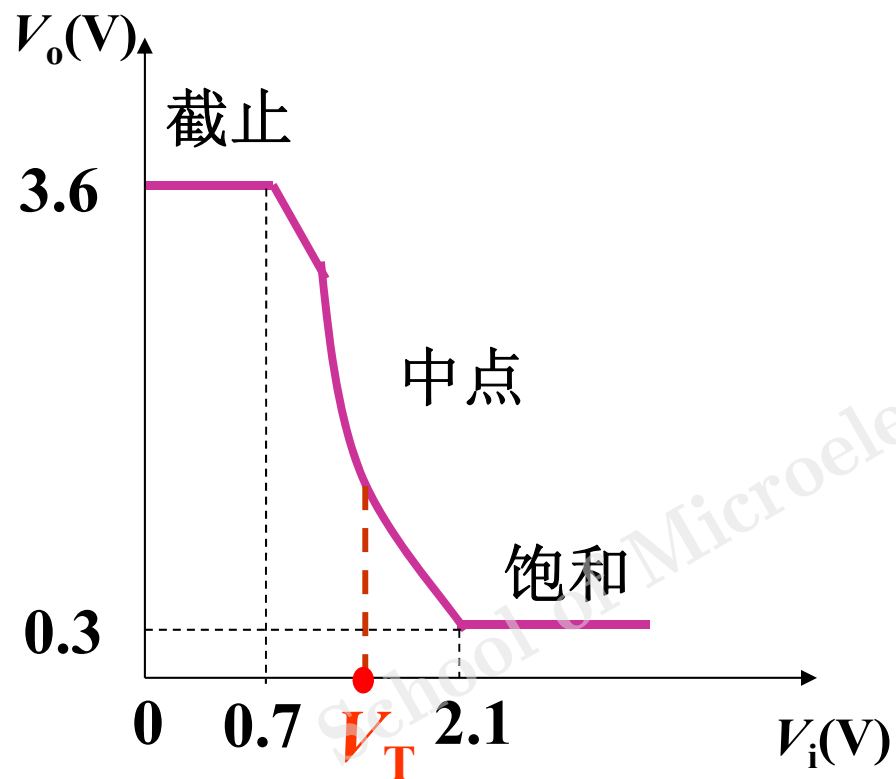
将与非门输入连在一起, 相当于非门



研究当输入 $V_i(A)$ 从低到高时,
输出 $V_o(F)$ 如何从高到低



电压传输特性



TTL 系列典型值

高电平 1: 2.8~3.6 V;

低电平 0: 0~0.3 V.

V_T : 阈值电压 (门坎电压)
Threshold voltage
通常取1.4V

R_i 小, V_{Ri} 低 \Rightarrow 输入低电平

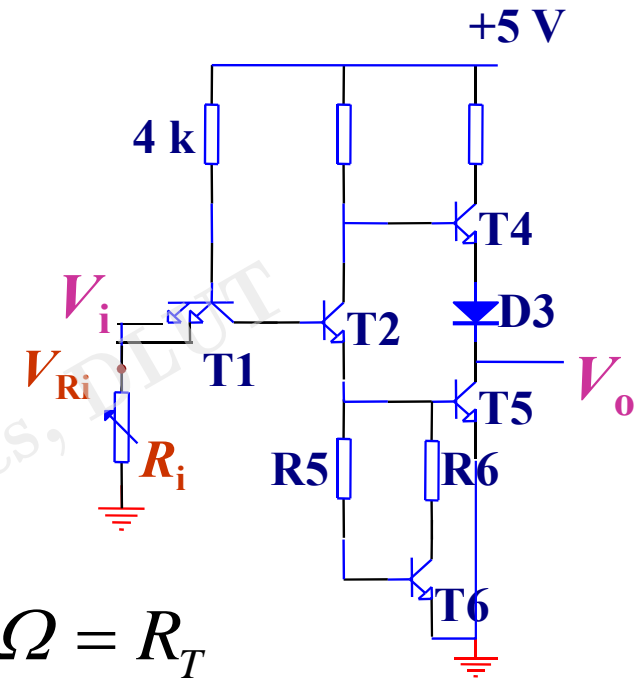
R_i 大, V_{Ri} 高 \Rightarrow 输入高电平

$$V_{Ri} = \frac{R_i}{4 \times 10^3 + R_i} (5 - 0.7)$$
$$= 1.4 \text{ V } (V_T)$$

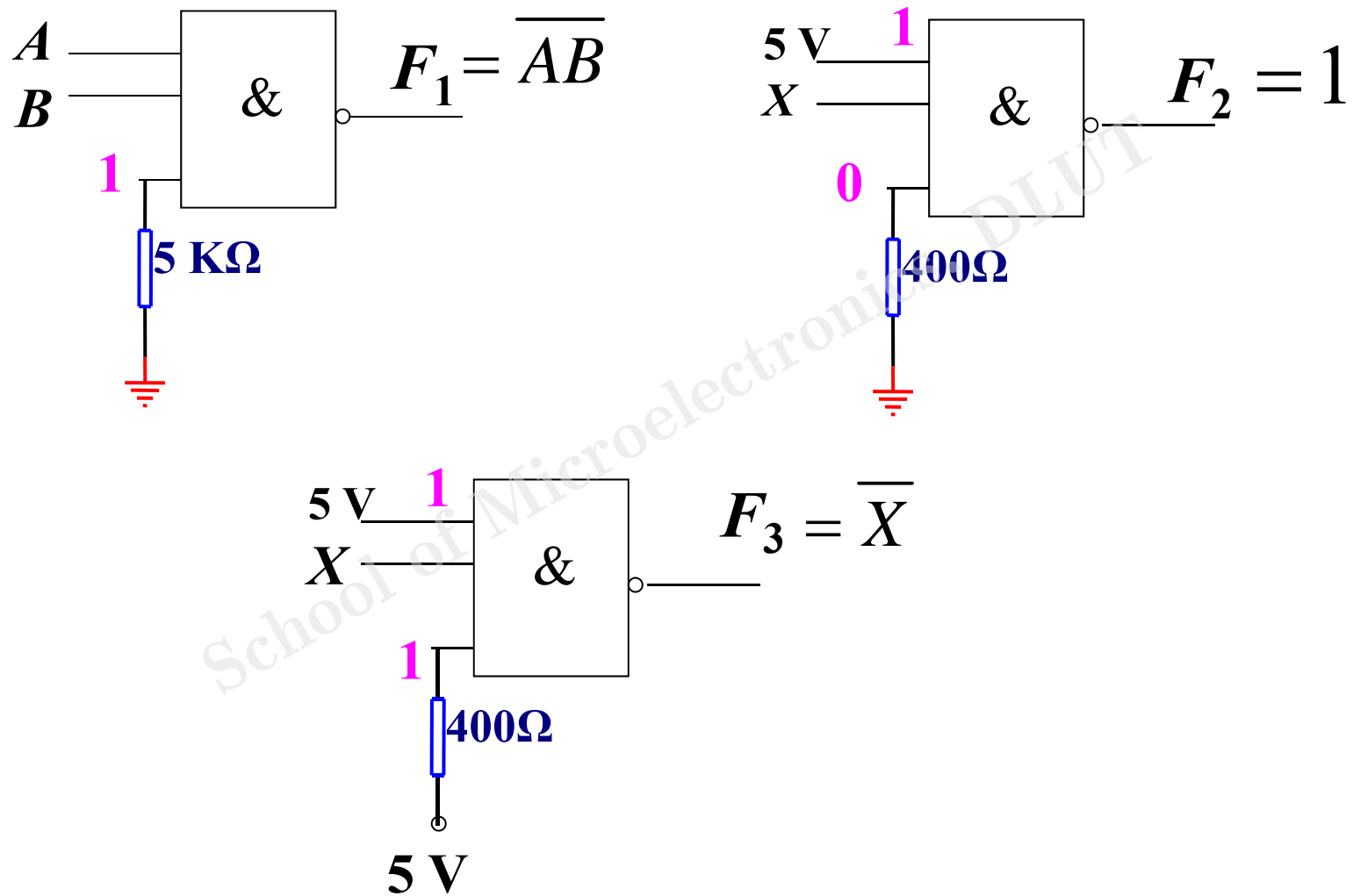
门坎电压时的 R_i $R_i = 1.9 \text{ k}\Omega \approx 2 \text{ k}\Omega = R_T$

R_T : 门坎电阻

输入电阻 R_i $\left\{ \begin{array}{l} R_i < R_T, \text{ 等效于输入低电平 (0)} \\ R_i > R_T, \text{ 等效于输入高电平 (1)} \\ R_i \text{ 对地悬空 } (\infty) \text{ 逻辑高电平 (1)} \end{array} \right.$

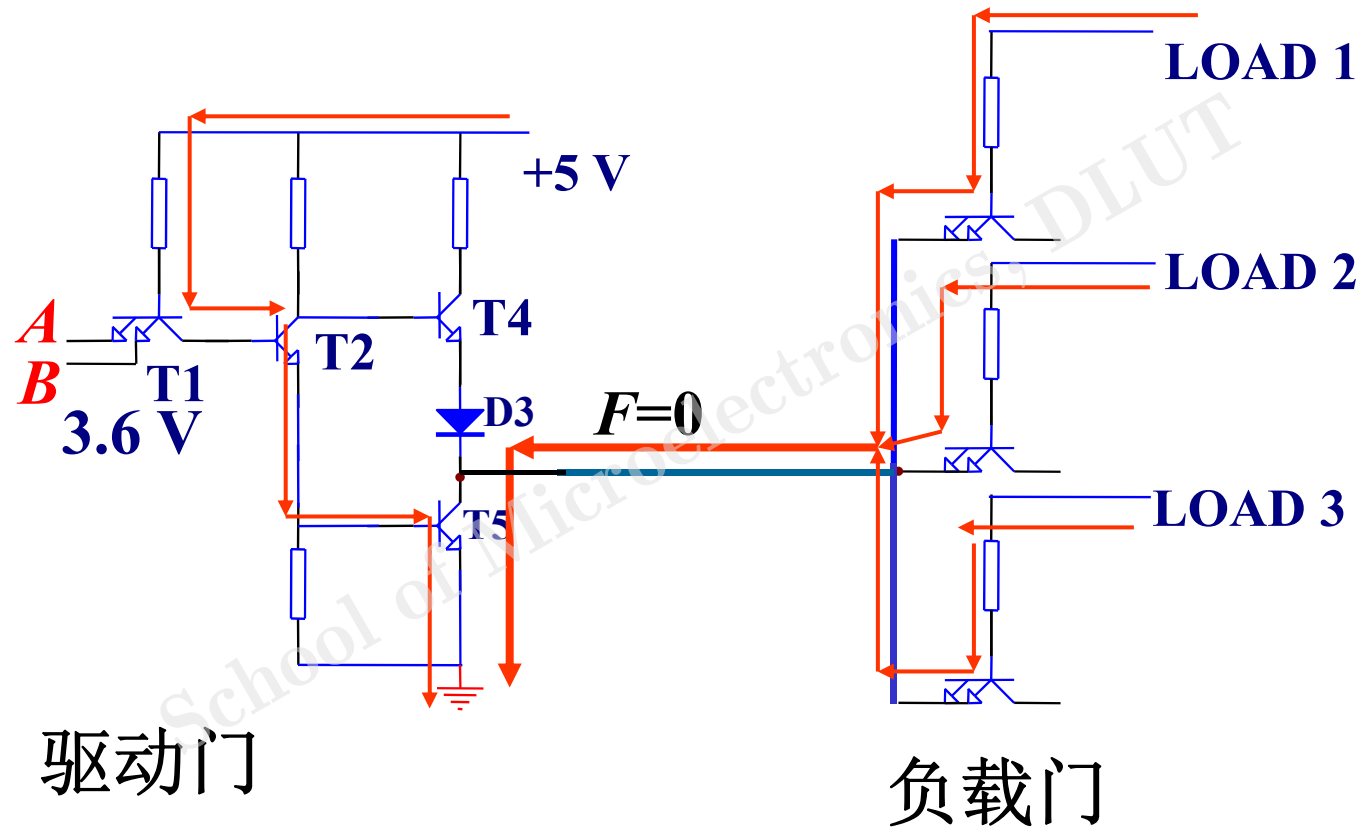


例: TTL 逻辑门



2. 输出特性（带负载能力—同类门）

1) 输出低—灌流负载



当 $F=0$, 电流从 5 V 电源经 $T1$, $T2$ 和 $T5$ 流向地.

负载门:
输入低电平

驱动门:

$$i_{b5} > 0, \quad I_{cs5} = 0,$$

$$\therefore i_{b5} \gg \frac{I_{cs5}}{\beta} = I_{b5}$$

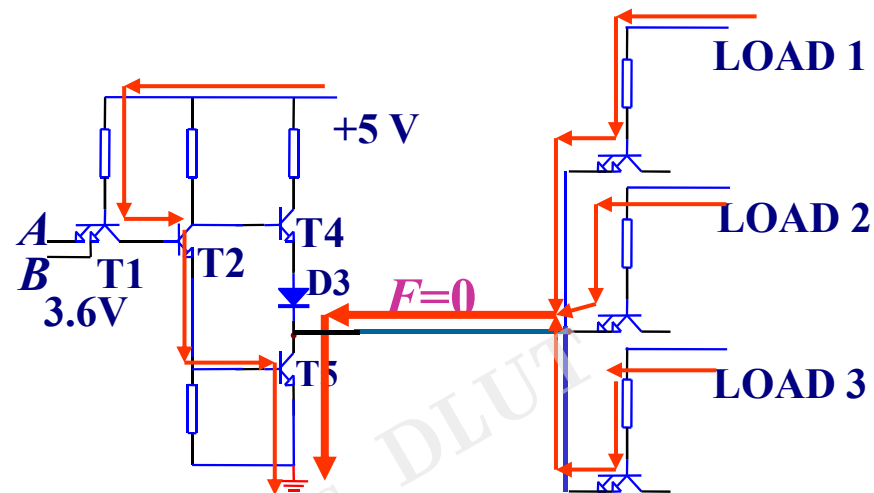
$\therefore T5$ 深饱和和

每个负载门有电流 I_i 灌入, 灌电流。

$$I_i = \frac{5 - 0.7}{4 \times 10^3} = 1.1 \text{ mA}$$

灌入驱动门, 这时的负载为灌流负载。

$$I_{\max} = 1.6 \text{ mA}$$



如果驱动门从每一个负载门接收 **1.1 mA (1.6 mA)** 灌电流, I_{cs5} 就要升高, 饱和就会变浅, 输出脱离标准低电平。

因此, TTL 不能带过多负载门。驱动门的最大容许灌电流 16 mA。

扇出系数 (Fan-out) :

一个输出所能驱动的同类门的最大数目。

$$N = \frac{16 \text{ mA}}{1.6 \text{ mA}} = 10$$

手册上规定:
 $N \leq 8$

驱动门的拉电流为40μA，驱动门最大

扇出系数与灌电流时相同:

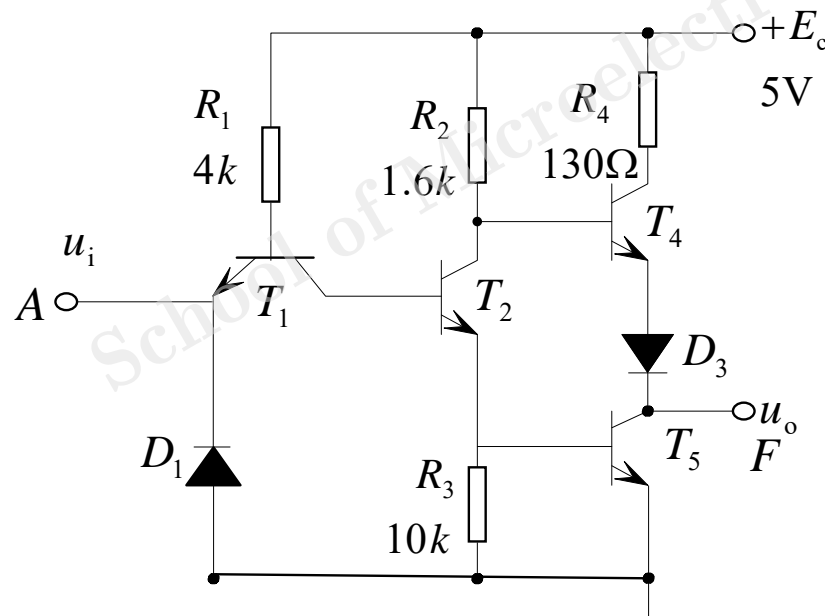
$$\frac{400 \mu A}{40 \mu A} = 10$$

§ 2.3.4 其他类型TTL门电路

Other TTL Gates

1. TTL 非门

TTL 非门与 TTL 与非门基本相同。



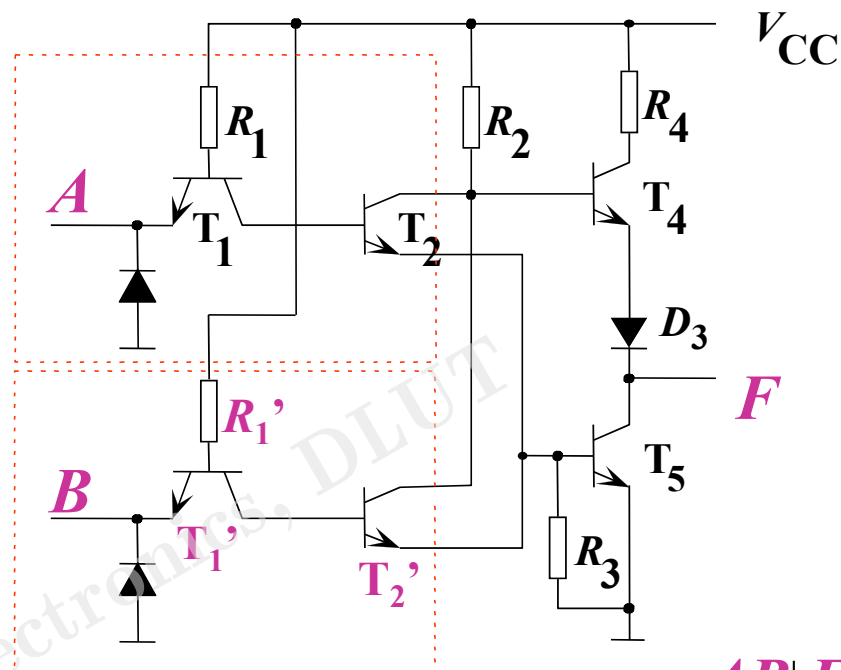
$$F = \overline{A}$$

2. 或非门 $F = \overline{A + B}$

$A: T_1, T_2, R_1$
 $B: T_1', T_2', R_1'$

相同电路

中间级和输出级和
与非门相同



$A: \text{高}$
 $\left\{ \begin{array}{l} T_2, T_5 \text{ 导通} \\ T_4, D_3 \text{ 截止} \end{array} \right\}$
 $F: \text{低}$

$B: \text{高}$
 $\left\{ \begin{array}{l} T_2', T_5 \text{ 导通} \\ T_4, D_3 \text{ 截止} \end{array} \right\}$
 $F: \text{低}$

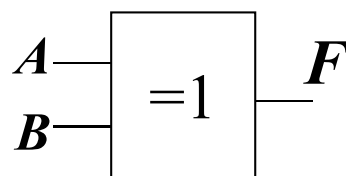
T_2 和 T_2' 集电极 $\rightarrow T_4$
 发射极 $\rightarrow T_5$

AB	F
00	1
01	0
10	0
11	0

只有当 A 和 B 同时低
 $\left\{ \begin{array}{l} T_2', T_2 \text{ 都截止} \\ T_5 \text{ 截止} \\ T_4 \text{ 导通} \end{array} \right\}$
 $F: \text{高}$

$$F = \overline{A + B}$$

3. 异或门



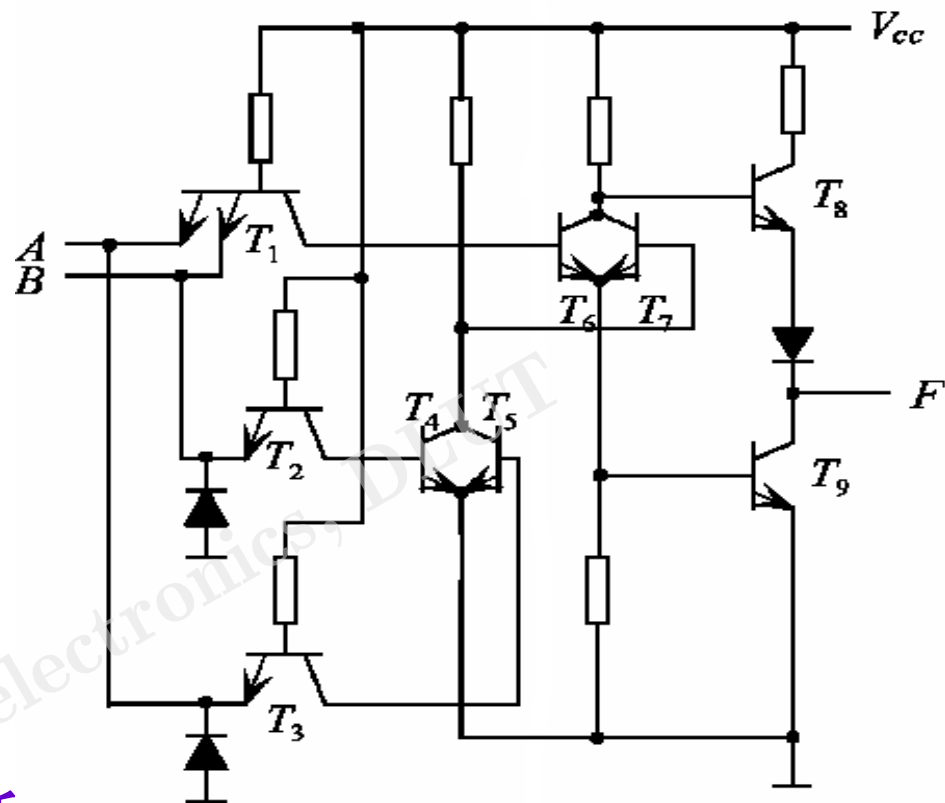
A, B 都高

$\left\{ \begin{array}{l} T_6, T_9 \text{ 导通} \\ T_8 \text{ 截止} \end{array} \right\}$ **F 低**

A, B 都低

$\left\{ \begin{array}{l} T_2, T_3 \text{ 发射极导通} \\ T_4, T_5 \text{ 截止 (} V_{7b} \text{ 高)} \\ T_7, T_9 \text{ 导通} \\ T_8 \text{ 截止} \end{array} \right\}$ **F 低**

A、B 不同 $\left\{ \begin{array}{l} T_1 \text{ 导通, } T_6 \text{ 截止} \\ T_4, T_5 \text{ 之一导通 (} V_{7b} \text{ 低) , } \rightarrow T_7 \text{ 截止} \\ T_8 \text{ 导通, } T_9 \text{ 截止} \end{array} \right\}$ **F 高**
 $F = A \oplus B$

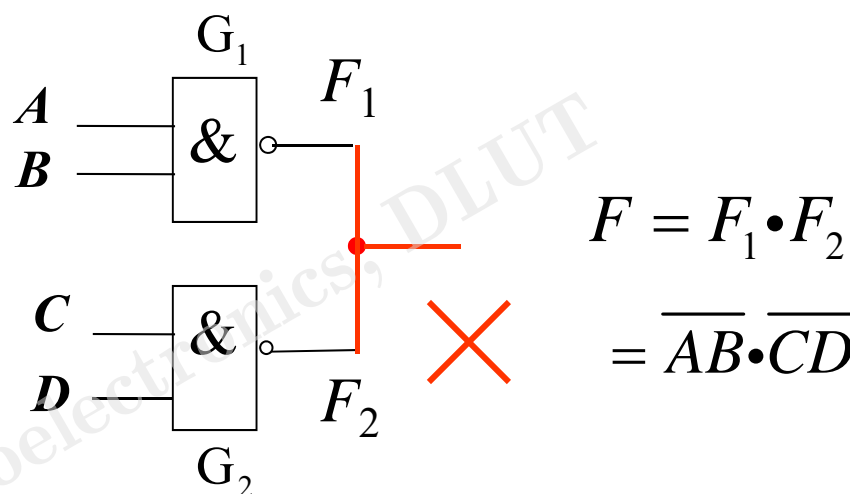


4. 集电极开路与非门 (OC)

当需要下面运算时

$$F = F_1 \cdot F_2 = \overline{AB} \cdot \overline{CD}$$

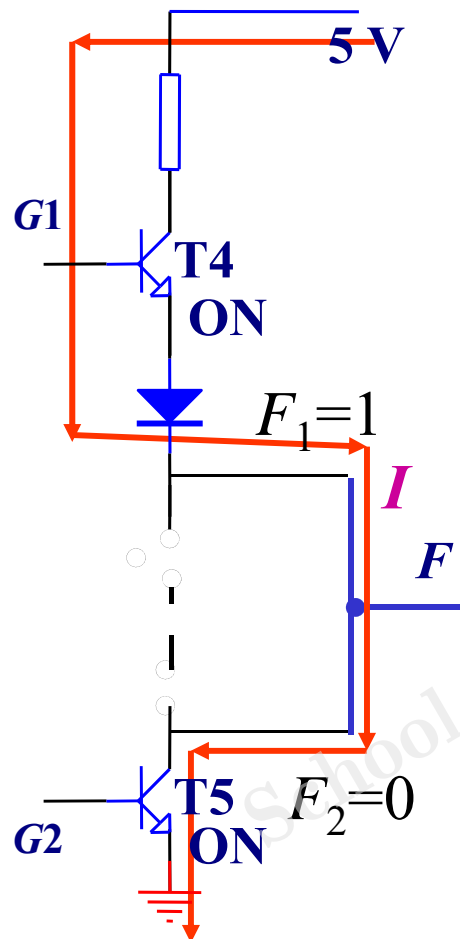
有一种连接方法
如图



这种连法称“线与”

普通TTL门电路禁止这种连接方法

原因：



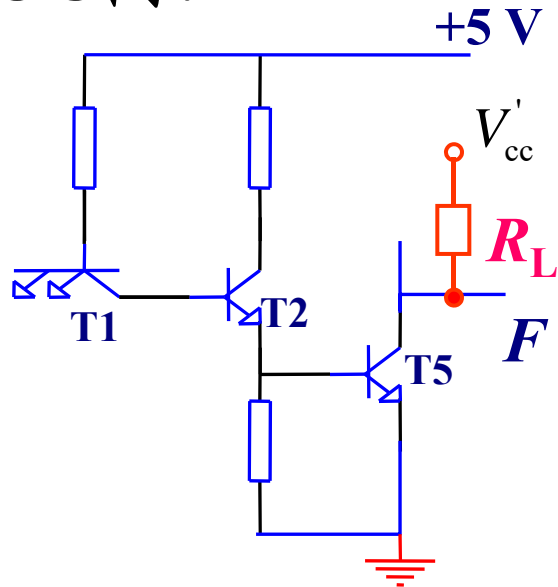
TTL 门输入电阻很小。如果 $G1$ 输出高，而 $G2$ 输出低，会形成一个很大电流 I 从 $G1$ T4 流向 $G2$ T5.

导致：

I { $G2$ T5 烧毁
输出 F 脱离标准逻辑电平

非 1 非 0, 逻辑错误。

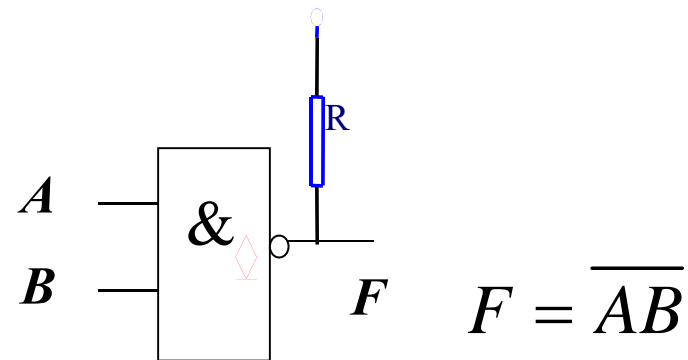
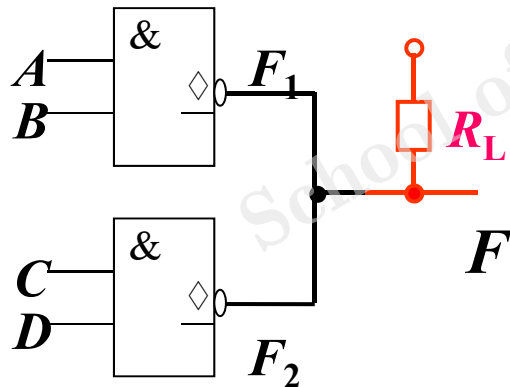
OC门:



集电极开路与非门去掉了 T4 和 D3, 用一个上拉电阻 R_L 替代。

选择适当 V_{cc}' 和 R_L 值, 就可以实现高电平和线与。

OC 门符号:



(负载电阻的计算, 见书)

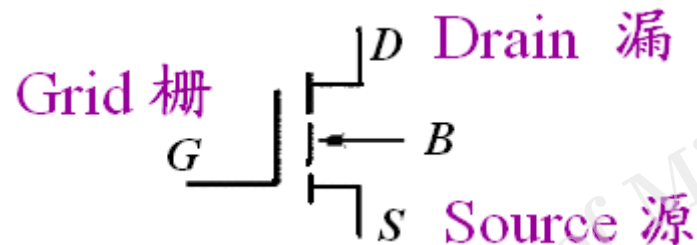
$$F = F_1 \cdot F_2 = \overline{AB} \cdot \overline{CD} = \overline{AB + CD}$$

§ 2.6 MOS 逻辑电路

MOS Logic Circuits

MOS 逻辑电路的基本单元为MOSFET

N-channel MOS

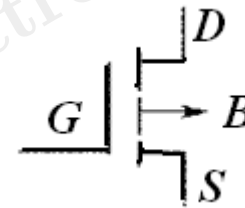


input $V_{GS} \geq V_T$ ($V_T > 0$)

NMOS ON

$$E_D = 5\text{ V} \sim 15\text{ V}$$

P-channel MOS



input $|V_{GS}| \geq |V_T|$ ($V_T < 0$)

PMOS ON $-E_D$

$$V_T = 2\text{ V} \sim 2.5\text{ V}$$

MOSFET 开关电路

当 $V_i = V_{GS} < V_T$ ，NMOS 截止。

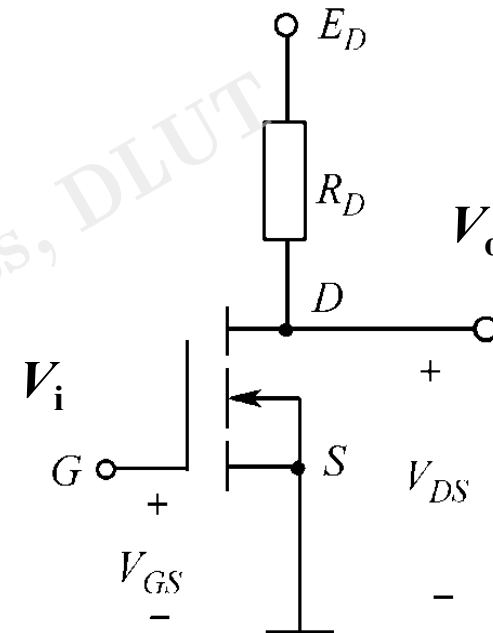
MOSFET 在截止状态的
电阻 R_{OFF}

$$R_{OFF} \geq 10^{10} \Omega$$

MOSFET 的 D - S 结等效于断开。

只要 $R_D \ll R_{OFF}$ ，输出为高电平： $V_{OH} \approx E_D$ 。

NMOS 开关电路



当 $V_i > V_T$ ，NMOS处于恒流区，NMOS的导通电阻：

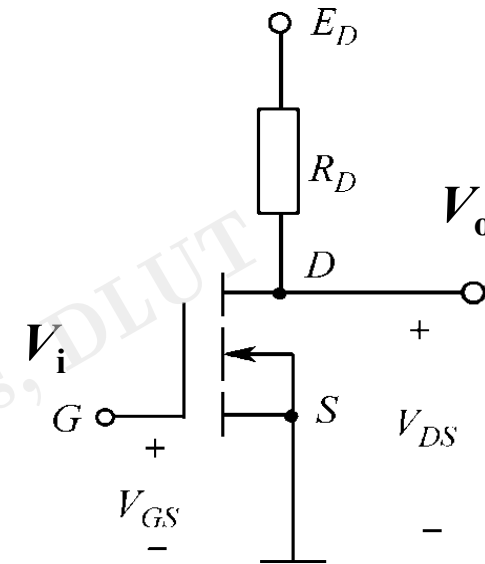
$$R_{ON} \sim 1 \text{ k}\Omega$$

只要 $R_D \gg R_{ON}$ ，输出为低电平：
 $V_{OL} \approx 0$.

MOSFET的 $D-S$ 结相当于 短路.

输入低电平，MOS 截止，输出高电平；
输入高电平，MOS 导通，输出低电平。 } 非门

NMOS 开关电路

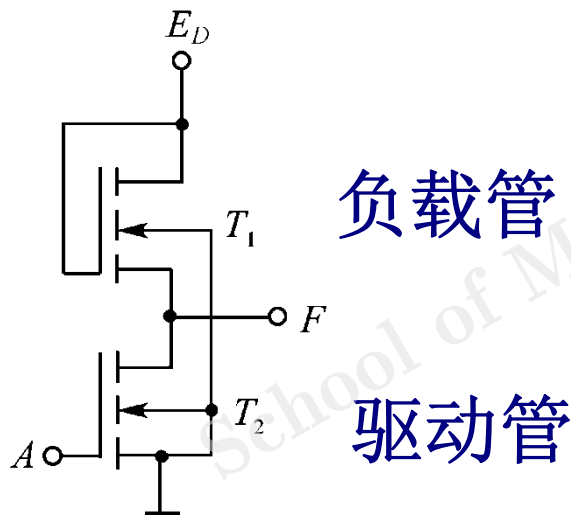


2.6.1 NMOS 门电路

NMOS Gate Circuits

1. NMOS 非门

NMOS 非门含有两个 N-沟 FETs:



$$R_{ON1} = 100 \text{ k}\Omega$$

T_1 : 负载管

T_2 : 驱动管, 接输入 A

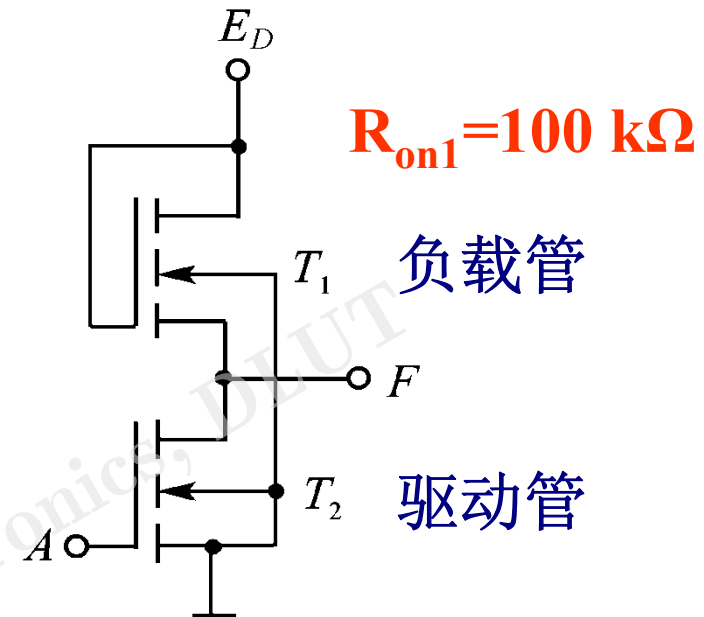
负载管 T_1 栅极接 E_D , 总是导通, 基本作用为负载电阻 (有源负载省面积)

输入 $A = 0$ V (logic 0),

$$V_{GS2} < V_T,$$

T_2 截止,

$$R_{off} \geq 10^{10} \Omega$$



输出:

$$F = \frac{10^{10}}{10^5 + 10^{10}} \times E_D \approx E_D$$

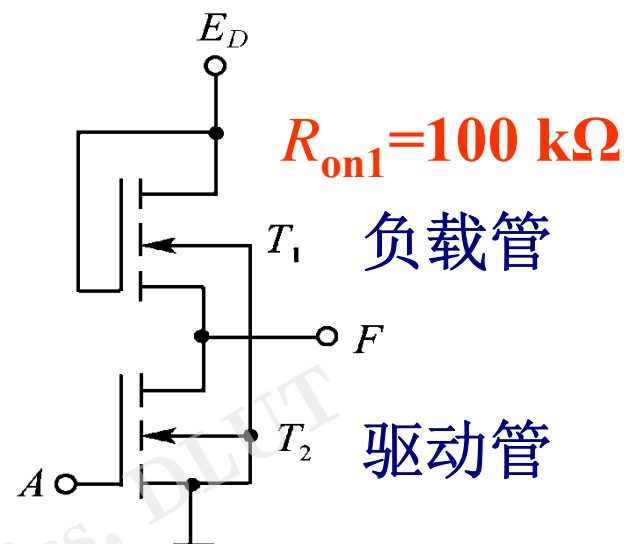
$$F = E_D \text{ (logic 1)}$$

$$\therefore A = 0, F = 1$$

输入 $A = 5\text{ V}$ (logic 1),

$V_{GS} > V_T$, T_2 导通,

$R_{on2} = 1\text{ k}\Omega$



$$F = \frac{R_{ON2}}{R_{ON1} + R_{ON2}} E_D = \frac{1k}{100k + 1k} E_D \approx 0.01 E_D \quad \text{真值表}$$

$\therefore F = 0$ (logic 0)

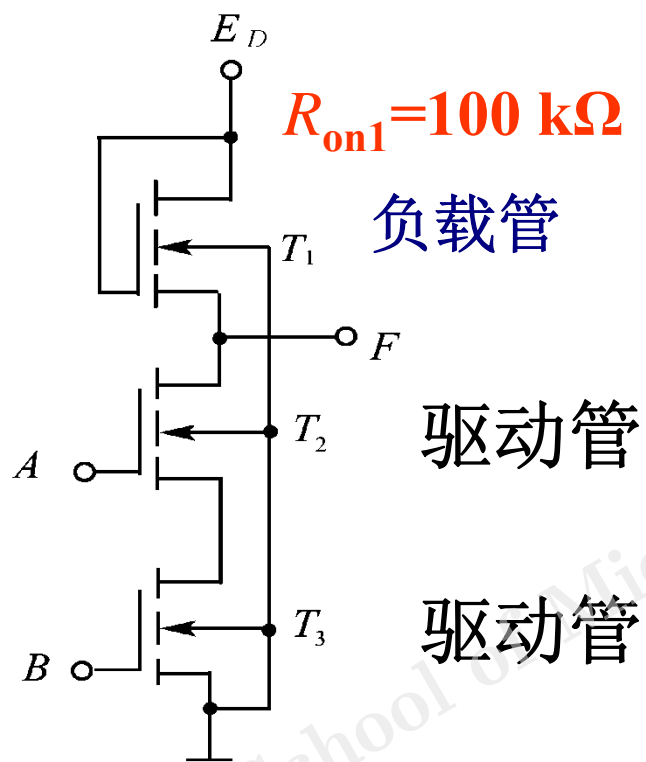
实现逻辑功能

$$F = \overline{A}$$

A	T_1	T_2	F
0	on	off	1
1	on	on	0

对MOS逻辑门，采用MOS管导通和截止状态电阻的不同，用分压的方法来分析输出逻辑电平的高低。

2. NMOS 与非门



\therefore 输出 $F = \overline{AB}$

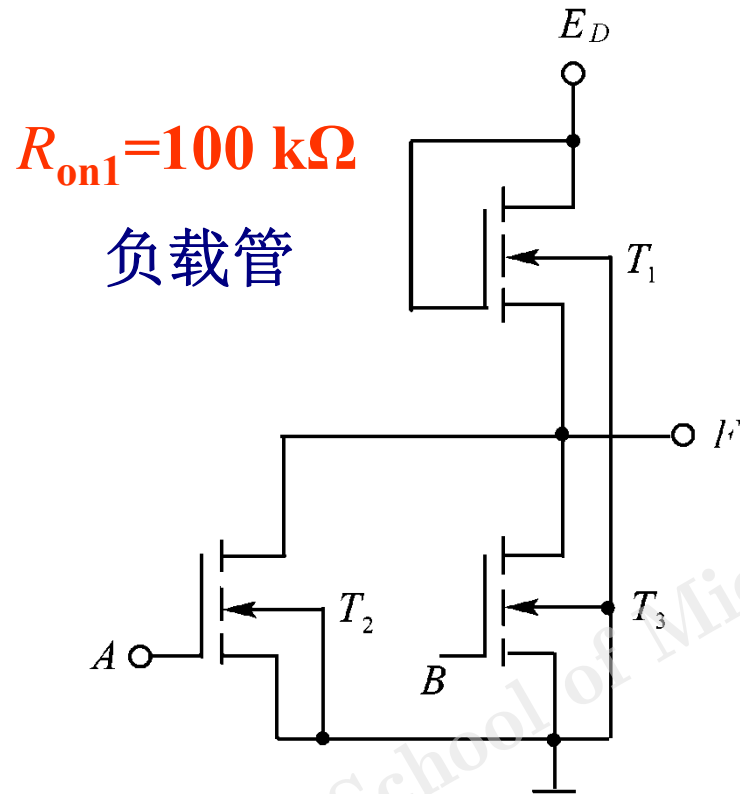
两个驱动管 T_2 和 T_3 串联，输入分别为 A 和 B 。

输入、输出列于真值表：

A	B	T_1	T_2	T_3	F
0	0	on	off	off	1
0	1	on	off	on	1
1	0	on	on	off	1
1	1	on	on	on	0

两个NMOS驱动管 串联，实现与非关系。

3. NMOS 或非门



两个驱动管 T_2 和 T_3 并联，输入分别为 A 和 B 。

$A\ B$	T_1	T_2	T_3	F
0 0	on	off	off	1
0 1	on	off	on	0
1 0	on	on	off	0
1 1	on	on	on	0

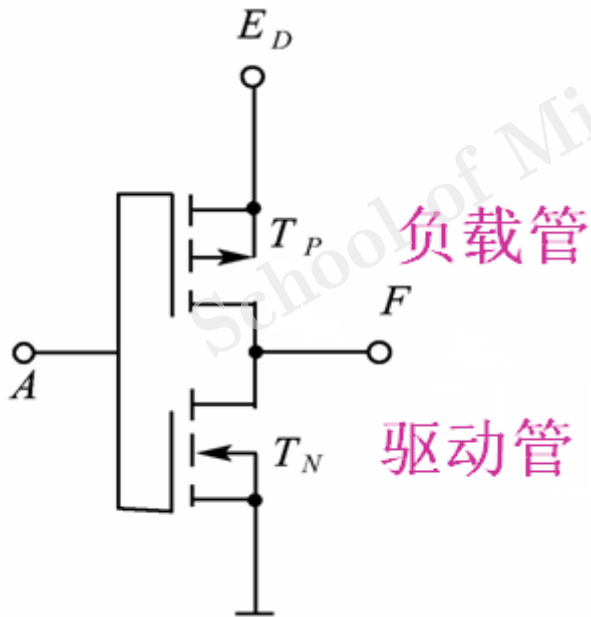
$$\therefore F = \overline{A + B}$$

两个NMOS驱动管
并联，实现或非关系。

2.6.2 CMOS 门电路 CMOS Gate Circuits

互补型MOS (CMOS: **complementary**) 逻辑门在一个电路中同时包含 P - 和 N - 沟道FET。

1. CMOS 非门



PMOS: 负载

NMOS: 驱动

$$E_D = 10 \text{ V}$$

$$E_D > (V_{TN} + |V_{TP}|)$$

$$V_{TN} = |V_{TP}|$$

大于两门坎电压代数和

$A = 0$, T_N 截止, T_P 导通

$$(V_{GSN} < V_{TN},$$

$$V_{GSP} = 0 - E_D = -E_D$$

$$|V_{GSP}| > |V_{TP}|)$$

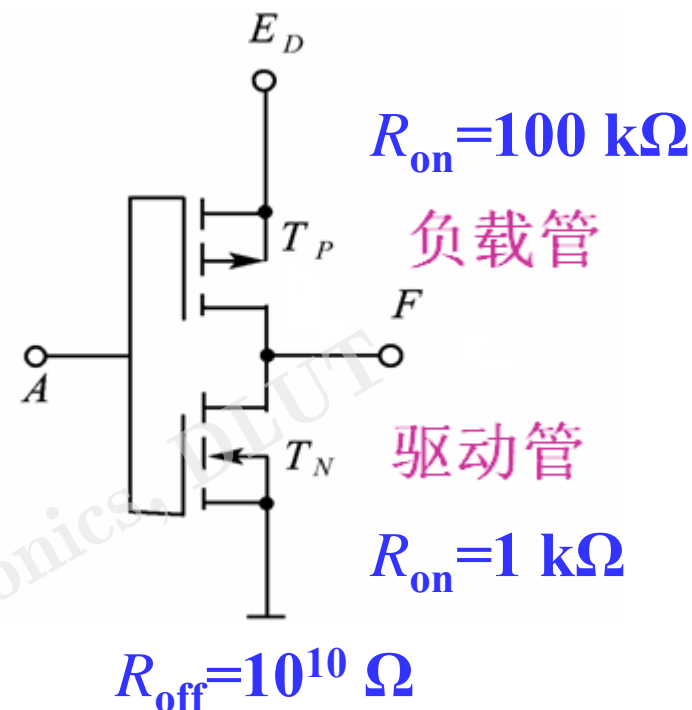
$$F = E_D = 1$$

$A = 1$, T_N 导通, T_P 截止

$$(V_{GSP} = E_D - E_D = 0$$

$$< |V_{TP}|)$$

$$F = 0$$



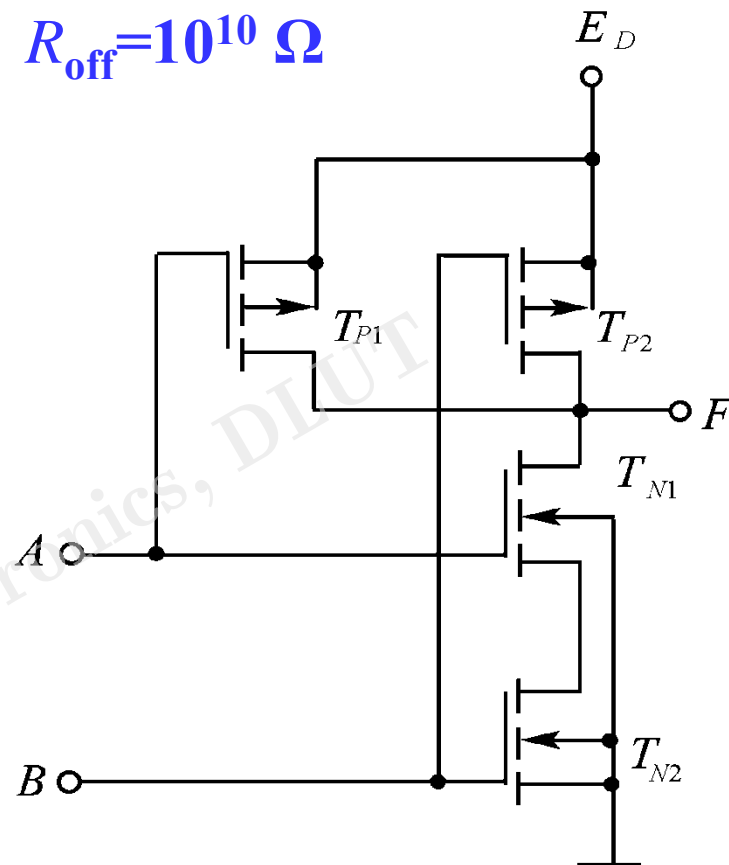
A	T_P	T_N	F
0	on	off	1
1	off	on	0

$$F = \overline{A}$$

2. CMOS 与非门

A	B	T_{N1}	T_{N2}	T_{P1}	T_{P2}	F
0	0	off	off	on	on	1
0	1	off	on	on	off	1
1	0	on	off	off	on	1
1	1	on	on	off	off	0

$$R_{\text{off}} = 10^{10} \Omega$$

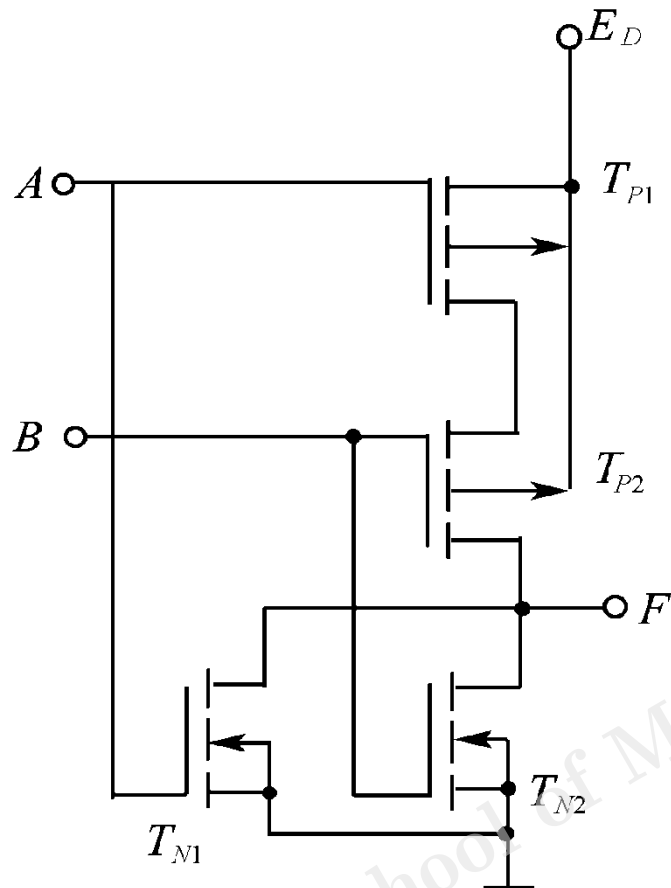


两个驱动管 T_{N1} 和 T_{N2} 串联。

功能：与非

两个负载管 T_{P1} 和 T_{P2} 并联。

$$F = \overline{AB}$$



3. CMOS 或非门:

A	B	T_{N1}	T_{N2}	T_{P1}	T_{P2}	F
0	0	off	off	on	on	1
0	1	off	on	on	off	0
1	0	on	off	off	on	0
1	1	on	on	off	off	0

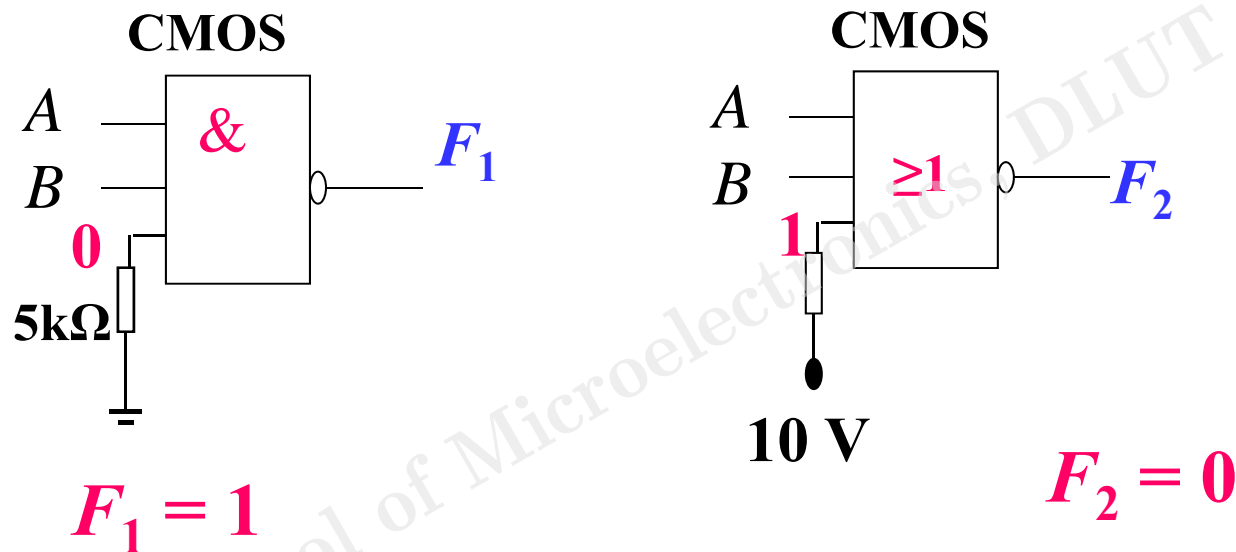
功能: 或非

两 **N**MOSFETs 并联作为驱动管.

两 **P**MOSFETs 串联作为负载管.

$$F = \overline{A+B}$$

MOS电路输入电阻 $R_{GS} > 10^{10} \Omega$, 所以无论外接电阻多大, 都是: 接地 $\rightarrow 0$, $E_c \rightarrow 1$ 。



CMOS 电路不用的输入端一定不能悬空（静电保护）
悬空时入端无电流，高输入阻抗 ($>10^{10} \Omega$) 会使沟道被静电击穿。

第二章作业:

2.3

2.13 (F_1)

2.4

2.17

2.5

2.21

School of Microelectronics, DLUT