

第五章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)

§5.1 MOSFET的结构和工作原理

§5.2 MOSFET的阈值电压

§5.3 MOSFET的直流特性

§5.4 MOSFET的频率特性

§5.5 MOSFET的开关特性

§5.6 MOSFET的功率特性

§5.7 小尺寸MOSFET

§5.8 MOSFET的最新研究进展

MOSFET基本知识体系框架



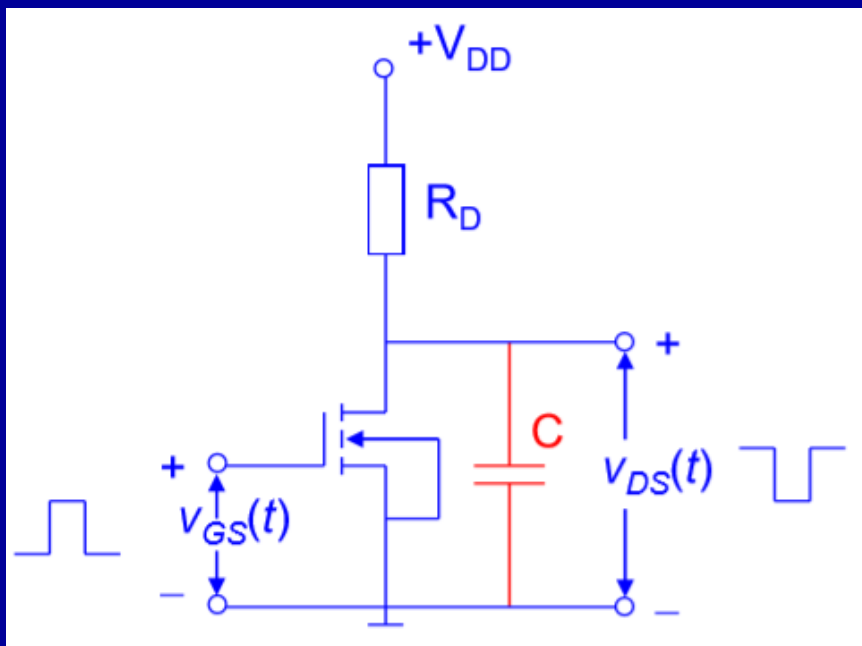
§5.5 MOSFET的开关特性

- ◆ 和双极性晶体管一样，MOS场效应管也可以用来构成数字集成电路，例如构成触发器、存储器、移位寄存器等等。
- ◆ 由MOS场效应管构成的集成电路具有功耗小、集成度高的优点。
- ◆ 在MOS数字集成电路中，MOS场效应管主要工作在两个状态，即**导通态和截止态**。
- ◆ MOS数字集成电路的特性就由MOS管在这两个状态的特性以及这两个状态相互转换的特性所决定，这就是所谓的晶体管的开关特性。

MOSFET的开关特性

1. 电阻型负载MOS反相器

(1) MOS反相器的开关作用



◆ 如图所示，在增强型NMOS管的漏极加一个负载电阻 R_D ，即可构成一个反相器，以栅源电压 V_{GS} 作为输入端，漏源电压 V_{DS} 作为输出端。

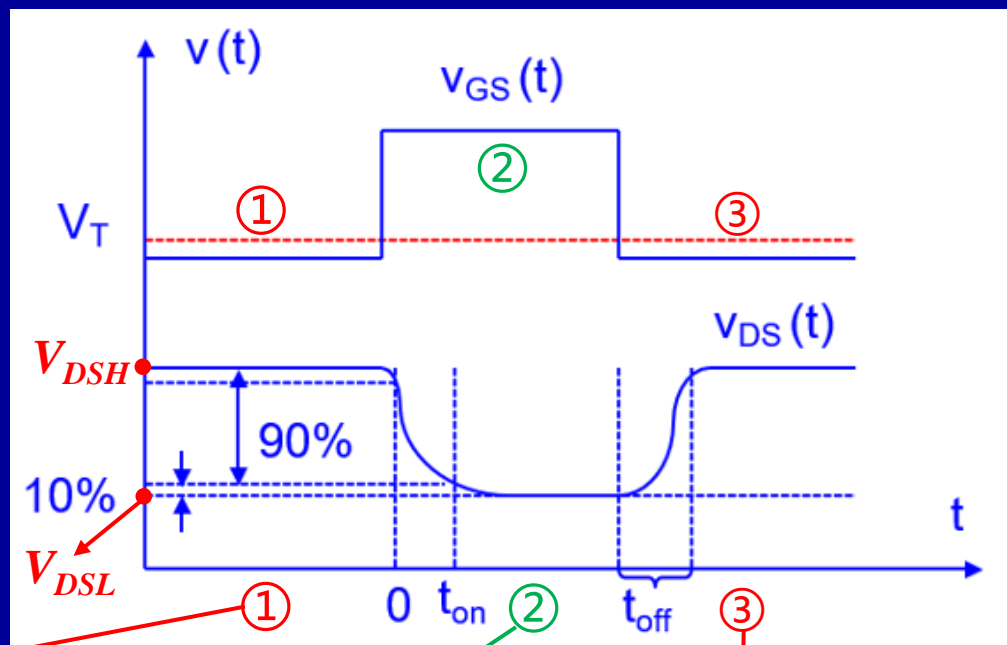
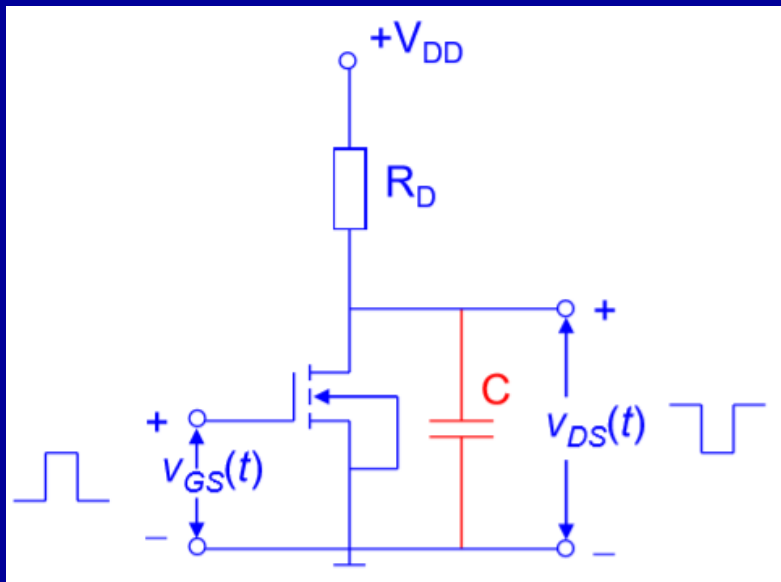
◆ 电容 C 的来源：

- ① 漏极结电容
- ② 输出信号线与衬底电容
- ③ 下级MOS管的输入电容

MOSFET的开关特性

1. 电阻型负载MOS反相器

(1) MOS反相器的开关作用



① 最开始当输入端 V_{GS} 小于 V_T 时, MOS管不导通, 压降绝大部分落在MOS管上, 输出电压为高电压 V_{DSH} ($V_{DSH} < V_{DD}$)。

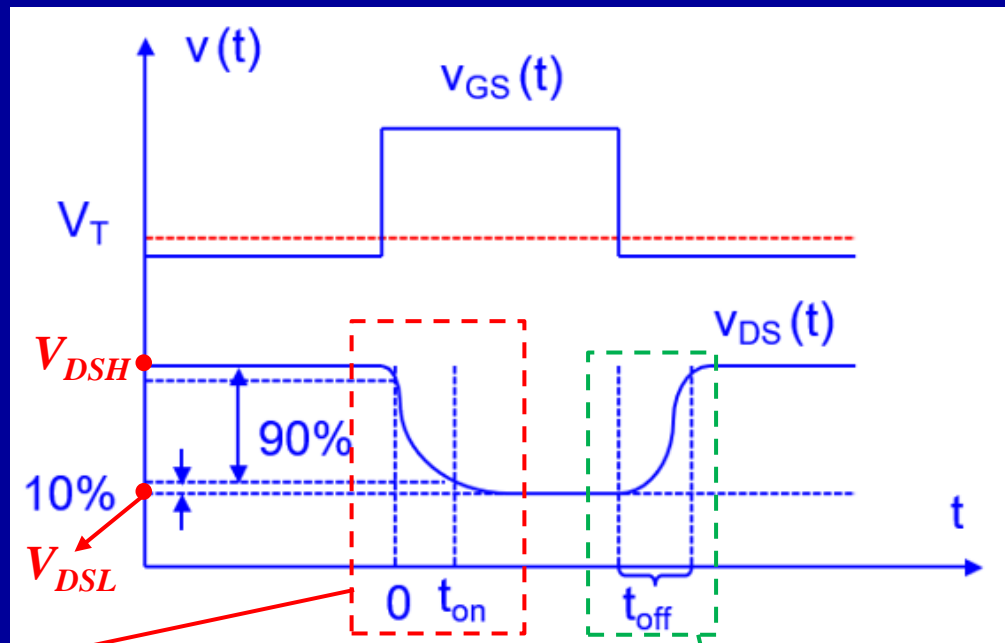
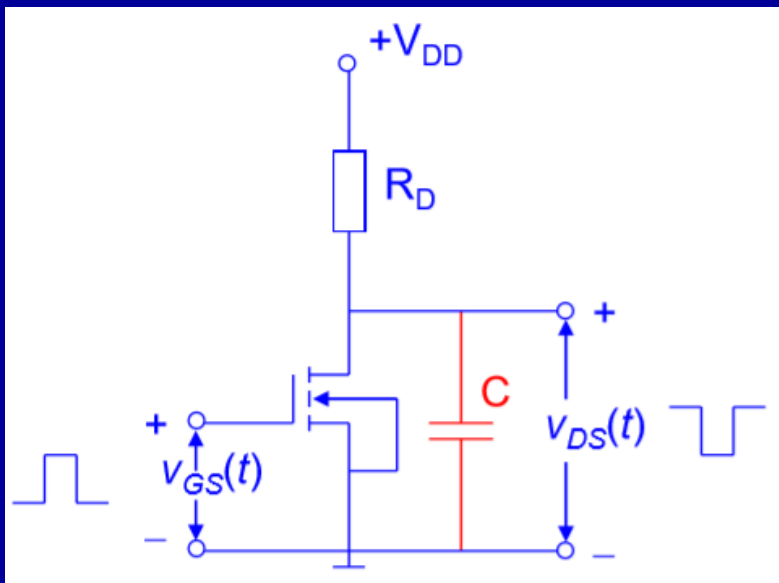
② 当 V_{GS} 大于 V_T 时, MOS管导通, 压降绝大部分落在 R_D 上, 输出低电压 V_{DSL} 。

③ 当 V_{GS} 再次小于 V_T 时, MOS管截止, 压降绝大部分落在MOS管上, 输出高电压 V_{DSH} 。

MOSFET的开关特性

1. 电阻型负载MOS反相器

(1) MOS反相器的开关作用



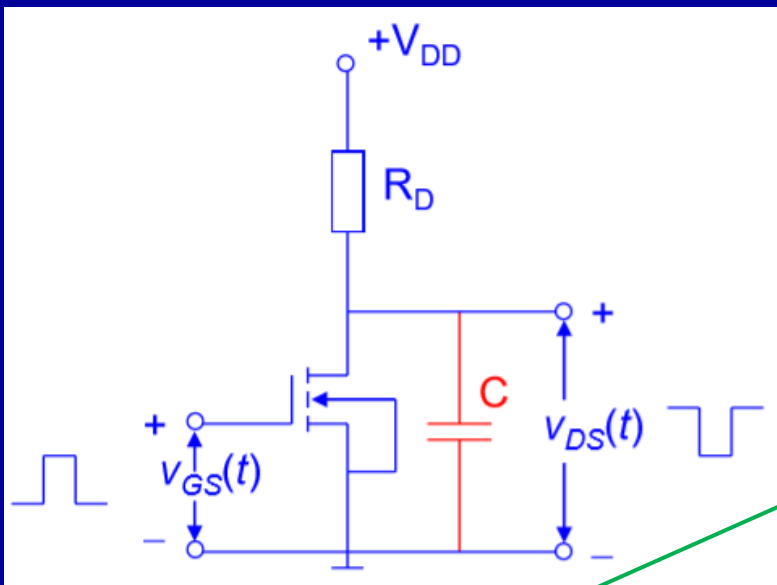
① 当输入端 V_{GS} 由小于 V_T 变为大于 V_T 时, 电容的放电不是一瞬间完成的, 将输出电压从 $0.9V_{DSH}$ (高电压) 下降到 $0.1V_{DSL}$ (低电压) 的时间称为导通开启时间 t_{on} 。

② 当 V_{GS} 再次小于 V_T 时, 电容的充电当然也不是一瞬间完成的, 将 V_{DS} 从 V_{DSL} (低电压) 上升到 $0.9V_{DSH}$ (高电压) 的时间称为截止关断时间 t_{off} 。

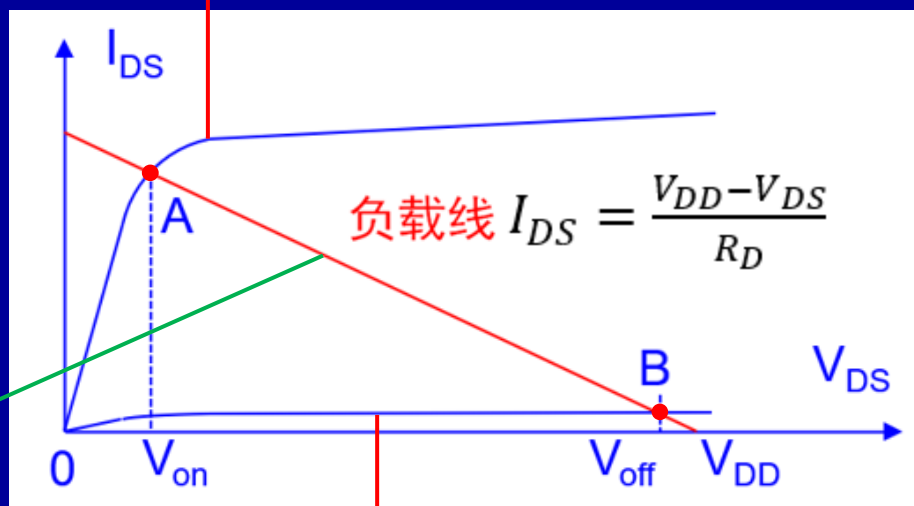
MOSFET的开关特性

1. 电阻型负载MOS反相器

(1) MOS反相器的开关作用



① MOS管导通时的输出特性



③ 对负载 R_D 而言有 $I_{DS} = \frac{V_{DD} - V_{DS}}{R_D}$

② MOS管截止时的输出特性

④ 当负载 R_D 上的电流和MOS管电流相等时就是它们共同的工作状态, A代表MOS管导通(一般在**线性区**), 输出低电压; B代表MOS管截止(一般在**饱和区**), 输出高电压; V_{off} 与 V_{on} 之间的差就是**逻辑摆幅**。

MOSFET的开关特性

1. 电阻型负载MOS反相器

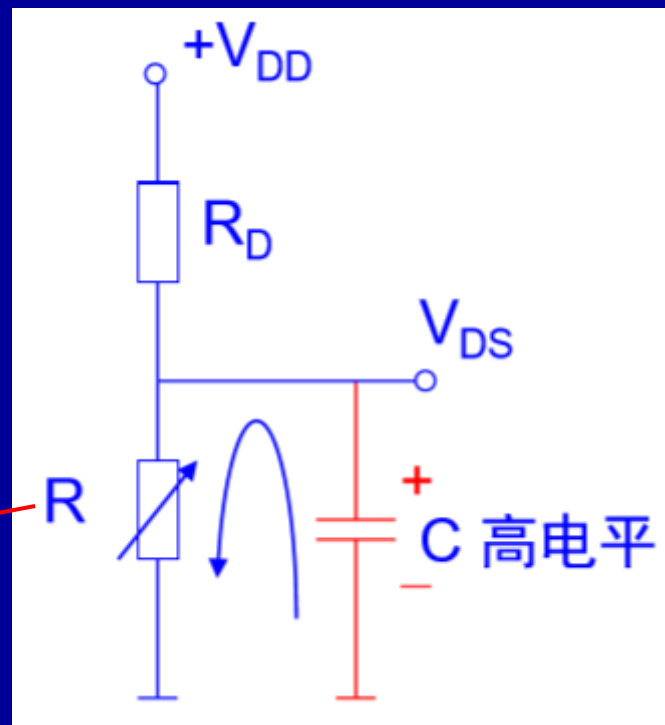
(2) MOS反相器的开关时间

① t_{on}

从工作点B到A，开启时间对应输出电压从**高电压** $0.9V_{DSH}$ 下降到**低电压** $0.1V_{DSH}$ 的时间，电容对沟道电阻放电。

$$R(t): \infty \rightarrow g_{D(on)}^{-1}$$

MOS管开启后的电阻

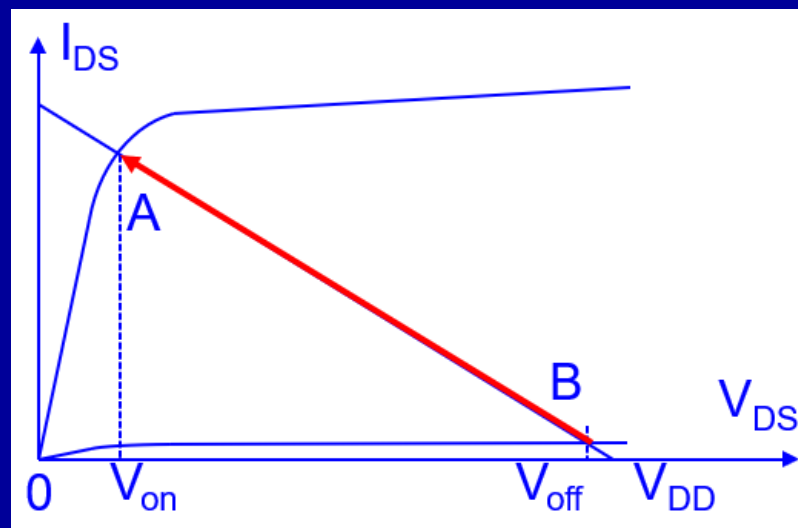


估算 t_{on}

平均电阻: $\bar{R}(t) \approx \frac{1}{g_{D(on)}}$

则: $t_{on} = \bar{R}(t)C = \frac{C}{g_{D(on)}}$

MOS一般工作在线性区，**线性区漏导**等于**饱和区跨导**，故 t_{on} 还可写为 $\frac{C}{g_{ms}}$



MOSFET的开关特性

1. 电阻型负载MOS反相器

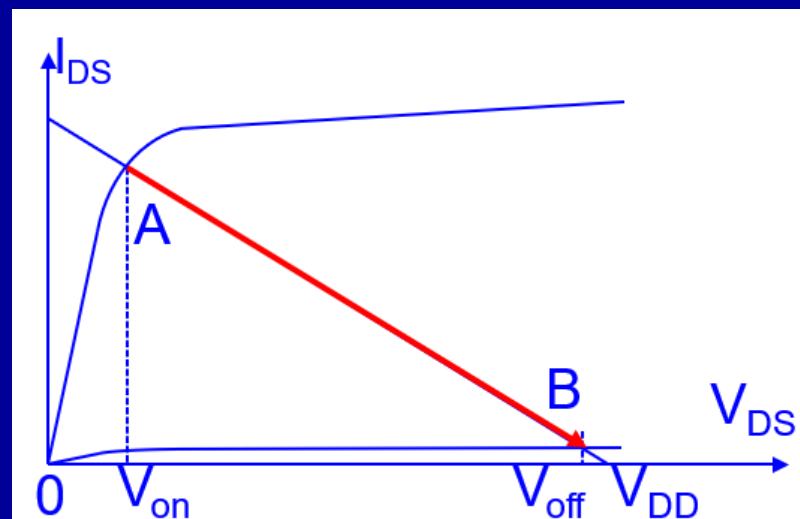
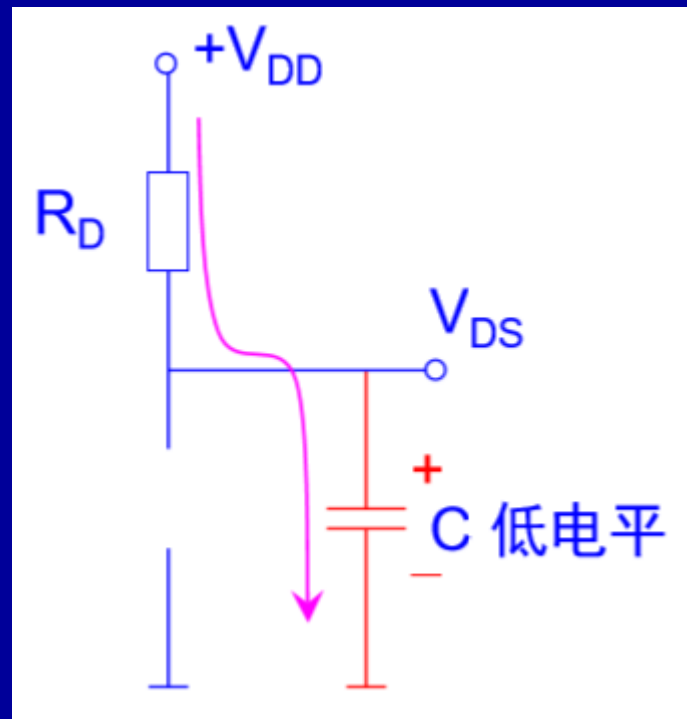
(2) MOS反相器的开关时间

② t_{off}

从工作点A到B，开启时间对应输出电压从低电压 V_{DSL} 上升到高电压 $0.9V_{DSH}$ 的时间， V_{DD} 通过 R_D 对电容充电。

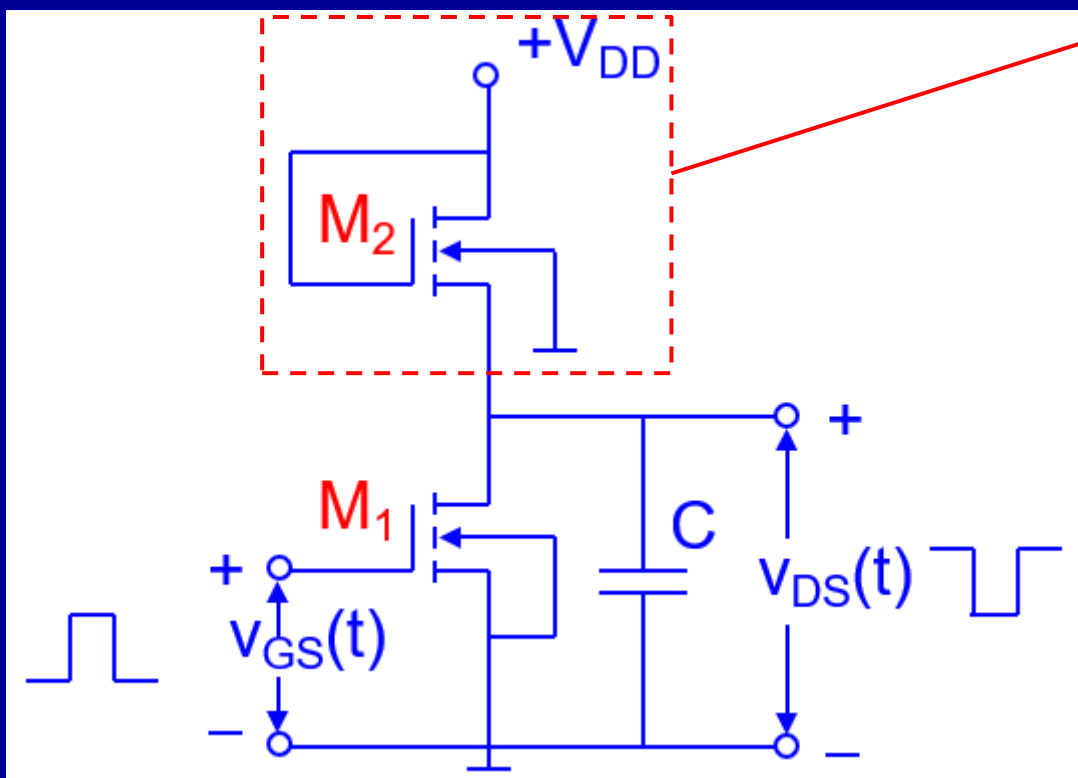
估算 t_{off}

$$t_{off} = R_D C$$



MOSFET的开关特性

2. 增强型-增强型MOS反相器 (E-E MOS)



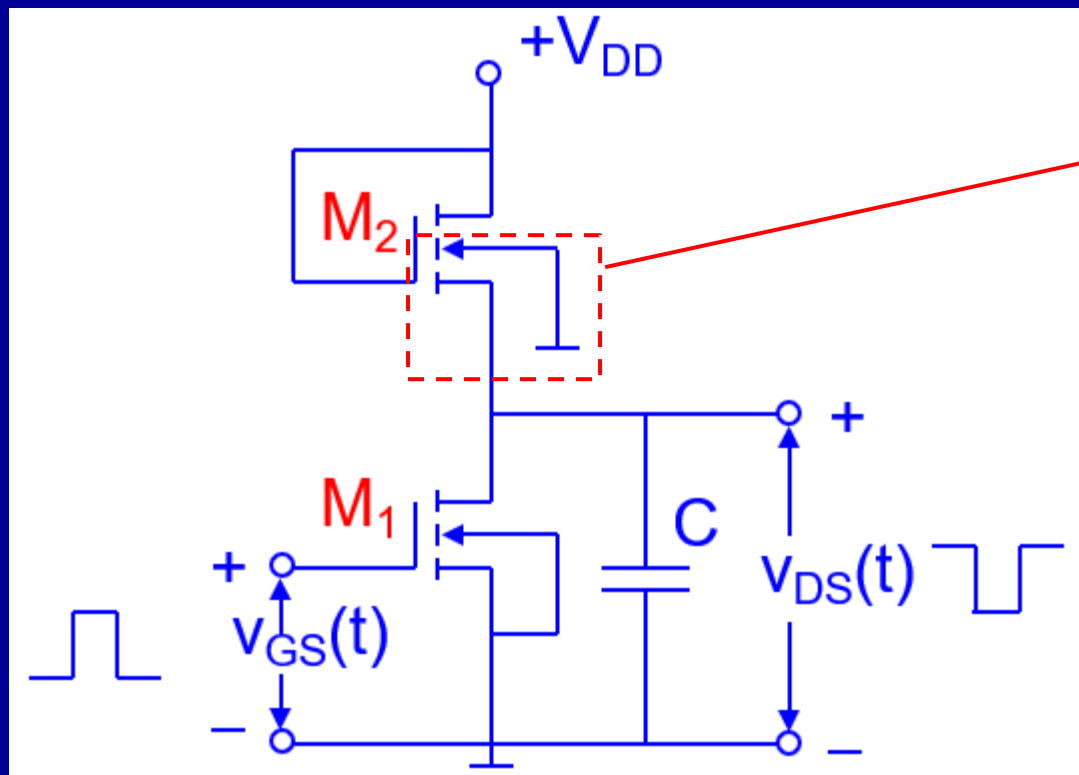
① **M₂栅漏短接**。工作电压一直为 V_{DD} 。 I_{DS} 的饱和条件是 $V_{DS} = V_{GS} - V_T$ 。此时对于 M_2 , $V_{DS2} = V_{GS2} > V_{GS2} - V_{T2}$, M_2 始终处于**饱和状态**, 在 M_1 开启之前, V_{DD} 对 C 充电, 直到 $V_{DS}(t) = V_{DD} - V_{T2}$, 并且 **$V_{DS}(t)$ 最大只能到 $V_{DD} - V_{T2}$** , 因为如果 $V_{DS}(t) > V_{DD} - V_{T2}$, M_2 就截止(关断)了, 相当于“自己把自己截止了”。

V_{DS2} : M_2 的漏源电压 V_{T2} : M_2 的阈值电压

V_{GS2} : M_2 的栅源电压 $V_{DS}(t)$: 输出电压

MOSFET的开关特性

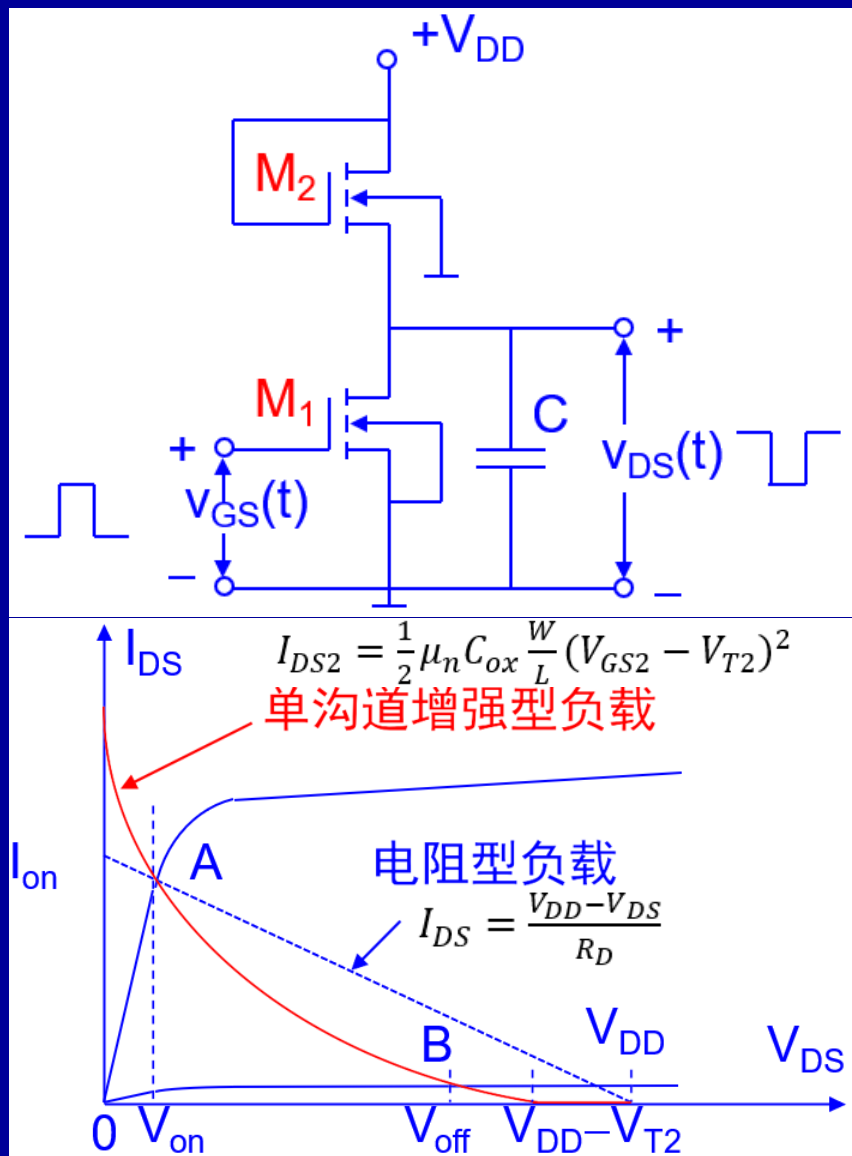
2. 增强型-增强型MOS反相器 (E-E MOS)



② 在此反相器中 M_2 衬底接地，而源上电势 $V_{DS}(t)$ 不为零，会一直增加，所以存在衬偏效应， V_{T2} 会随着 $V_{DS}(t)$ 的增加而一直增加，这样会影响到对电容充电时的电流 I_{DS} （即流经 M_2 的电流）。

MOSFET的开关特性

2. 增强型-增强型MOS反相器 (E-E MOS)



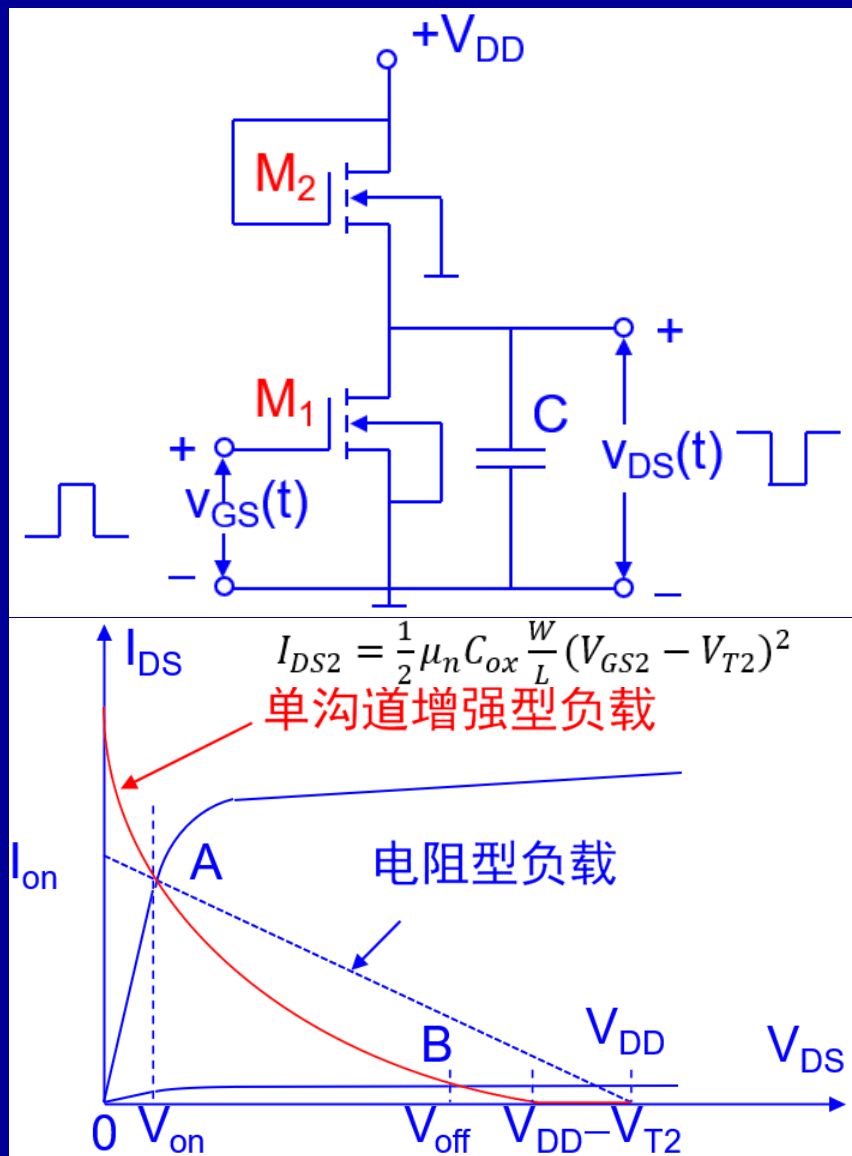
③ M_2 一直工作在饱和区，所以有

$$I_{DS2} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \frac{W}{L} (V_{GS2} - V_{T2})^2$$

由于衬偏效应， V_{T2} 会一直上升，同时 $V_{GS2} = V_{DD} - V_{DS}(t)$ ，随着 $V_{DS}(t)$ 的上升 V_{GS2} 下降，所以 I_{DS2} 会以电压的平方系数下降，如左下图红线，在对电容 C 的充电过程中 I_{DS2} 的下降是非线性的，相较于电阻型负载电流要小，所以E-E MOS反相器的关断过程（电容充电过程）比电阻型负载MOS反相器慢，并且从图中可以看出E-E MOS反相器的逻辑摆幅也会较小（缺点）。

MOSFET的开关特性

2. 增强型-增强型MOS反相器 (E-E MOS)



④ **导通过程** (电容放电过程), 与电阻型负载反相器一样。

导通时(A工作点), M_1 线性, M_2 饱和, 估算导通态电压 V_{on} 和电流 I_{on} :

$$V_{on} = V_{DS}(t)$$

$$V_{GS2} = V_{DD} - V_{on}$$

$$V_{GS1} = V_{GS}(t)$$

$$\beta = \mu C_{ox} \frac{W}{L}$$

M_1 线性区

$$I_{on} = \beta_1 [(V_{GS1} - V_{T1}) V_{on} - \frac{1}{2} V_{on}^2]$$

$$I_{on} \approx \beta_1 (V_{GS1} - V_{T1}) V_{on}$$

M_2 饱和区

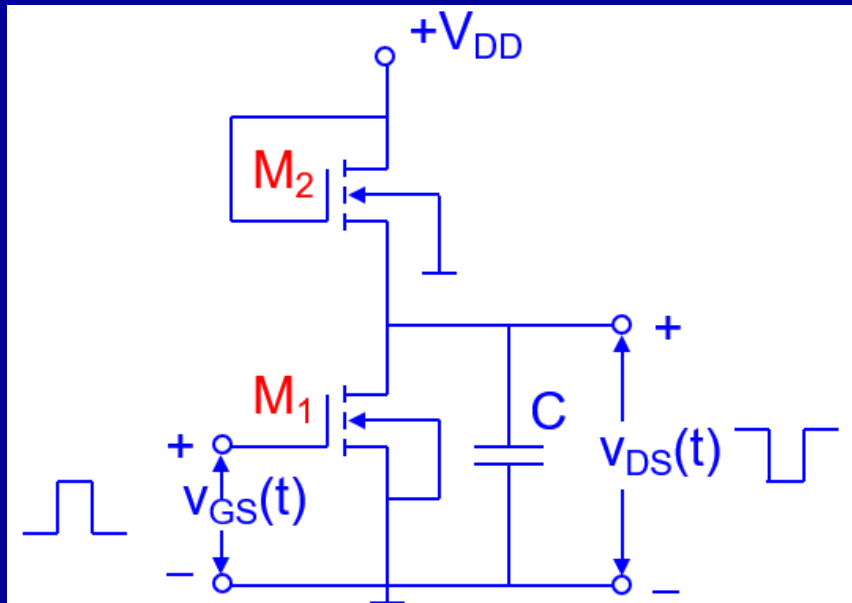
$$I_{on} = \frac{1}{2} \beta_2 [(V_{DD} - V_{on}) - V_{T2}]^2$$

$$I_{on} \approx \frac{\beta_2}{2} (V_{DD} - V_{T2})^2$$

$$V_{on} = \frac{\beta_2}{2\beta_1} \frac{(V_{DD} - V_{T2})^2}{(V_{GS1} - V_{T1})}$$

MOSFET的开关特性

2. 增强型-增强型MOS反相器 (E-E MOS)

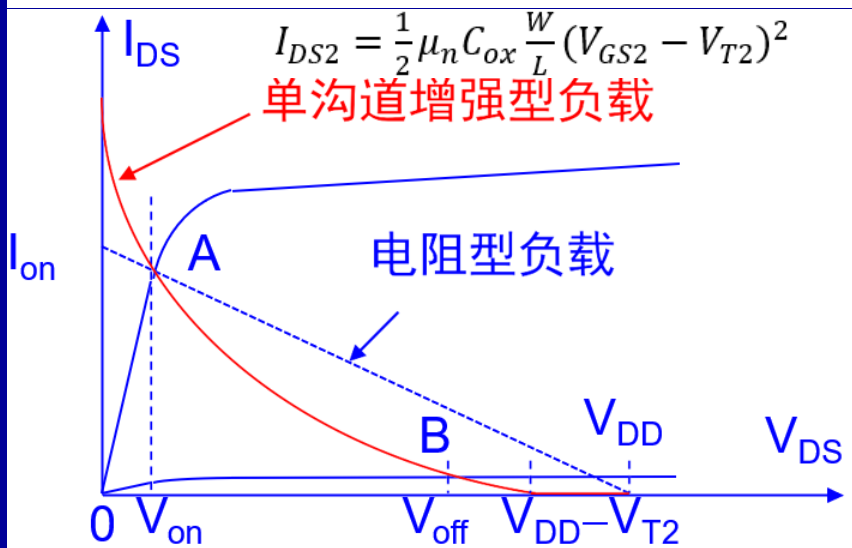


⑤ 关断时(B工作点), M_1 截止, M_2 饱和

$$V_{off} \approx V_{DD} - V_{T2}$$

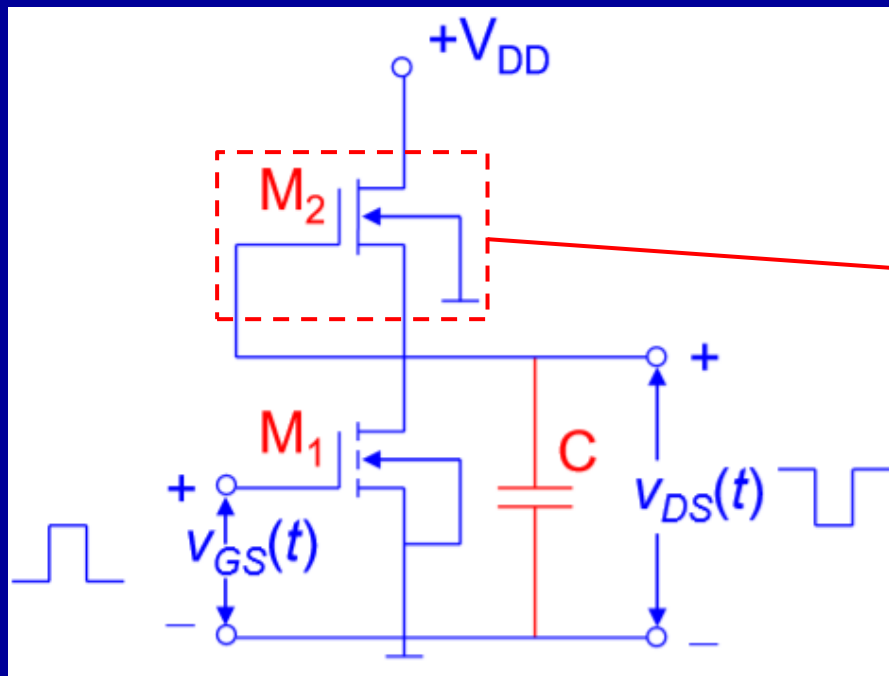
⑥ E-E MOS的**优点**: 面积小, 集成度高, 都是电子导电;

E-E MOS的**缺点**: t_{off} 长, 导通态功耗大, 存在衬偏效应。



MOSFET的开关特性

3. 增强型-耗尽型MOS反相器 (E-D MOS)

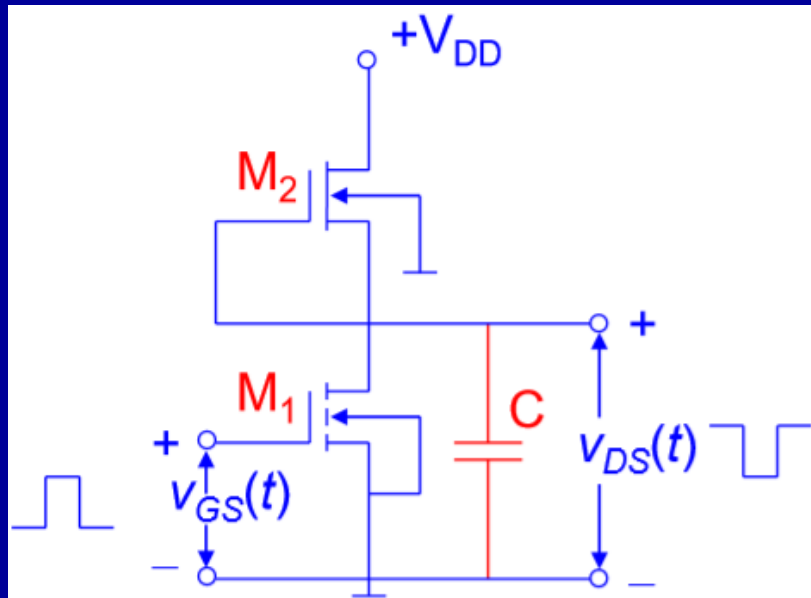


① M_2 : 耗尽型NMOS, 阈值电压 $V_{T2} < 0$, 栅源短接, $V_{GS2} = 0 > V_{T2}$, M_2 始终处于导通状态, 电流会发生变化, $V_{DS}(t)$ 最大约为 V_{DD} 。

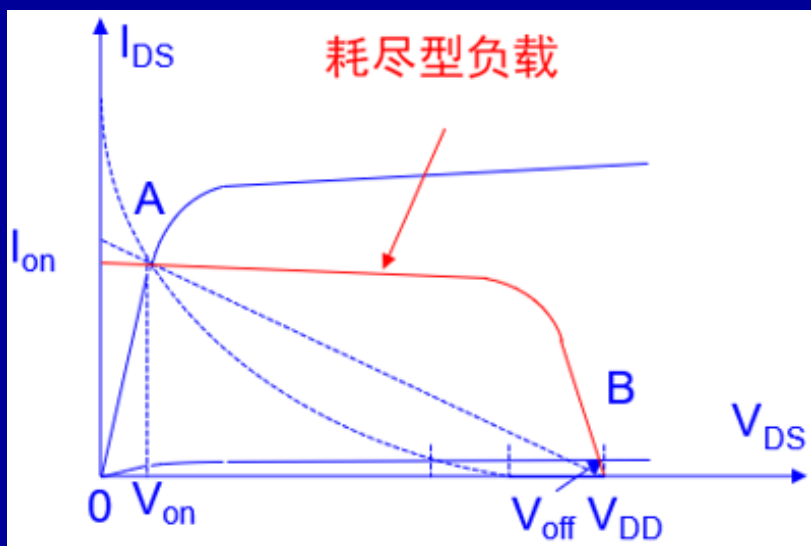
② 导通过程 (电容放电过程) 与前两种反相器一样。

MOSFET的开关特性

3. 增强型-耗尽型MOS反相器 (E-D MOS)



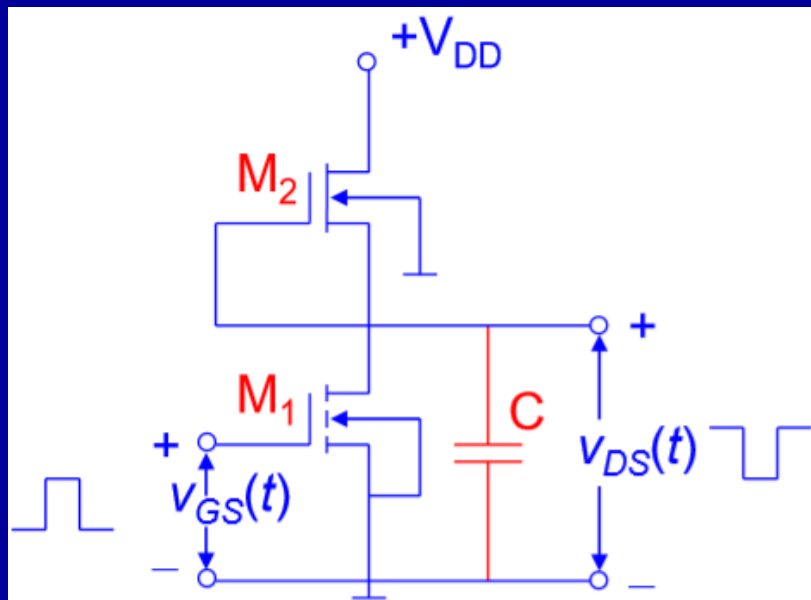
③ 关断过程 (电容充电过程): 初始时 $V_{DS}(t)$ 接近于0, $V_{DS2}=V_{DD}>V_{GS2}-V_{T2}$, 负载电流 I_{DS2} 处于**饱和区**;
随着 $V_{DS}(t)$ 上升, $V_{DS2}=V_{DD}-V_{DS}(t)$ 减小, 当 $V_{DS}(t)>V_{DD}+V_{T2}$ 时, $V_{DS2}<-V_{T2}$, 即 $V_{DS2}<V_{GS2}-V_{T2}$, 负载电流 I_{DS2} 过渡到**线性区**, 如左下图红线所示。



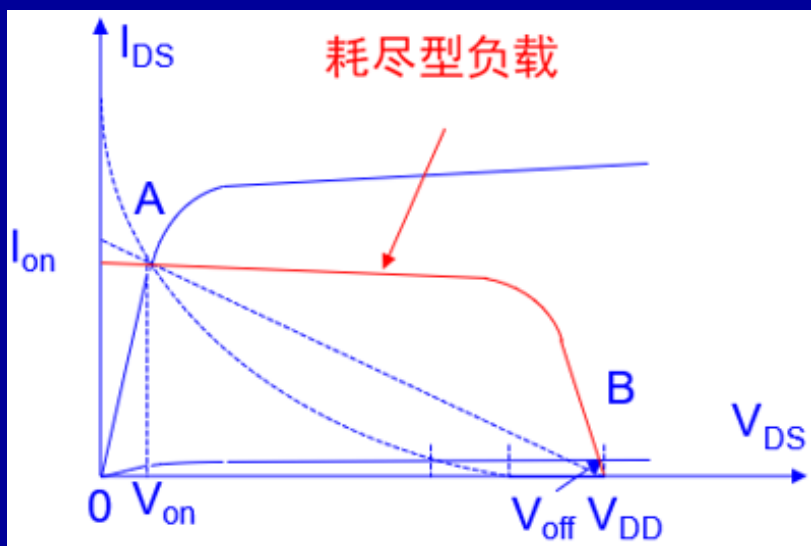
④ E-D MOS反相器在关断过程中电流较大, 因此关断时间比电阻型负载反相器和E-E MOS反相器的短。

MOSFET的开关特性

3. 增强型-耗尽型MOS反相器 (E-D MOS)



⑤ 导通时 (工作点A): M_1 线性, M_2 饱和; 关断时 (工作点B): M_1 截止, M_2 线性。

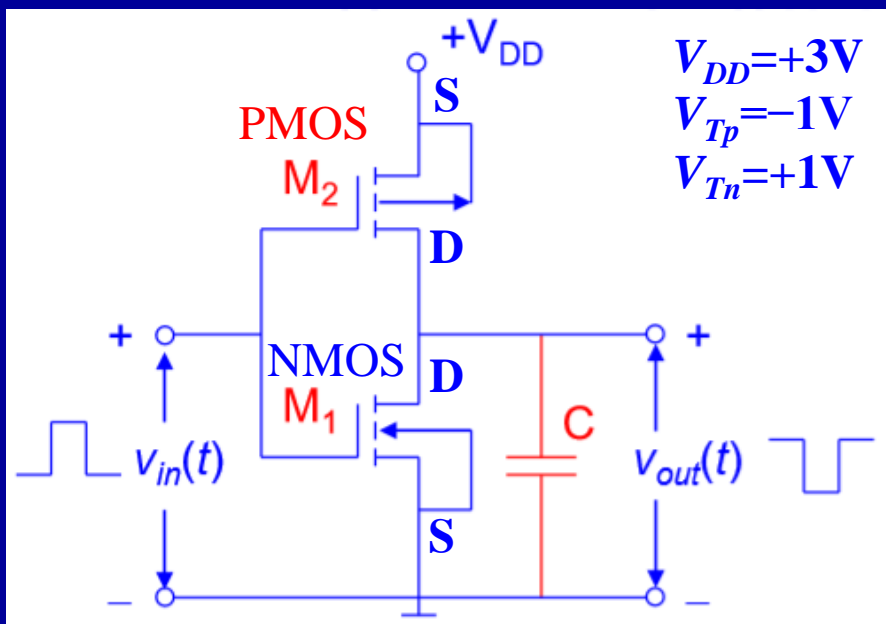


⑥ E-D MOS的优点: t_{off} 短, 集成度高, 都是电子沟道导电;

E-D MOS的缺点: 导通态功耗大, 存在衬偏效应。

MOSFET的开关特性

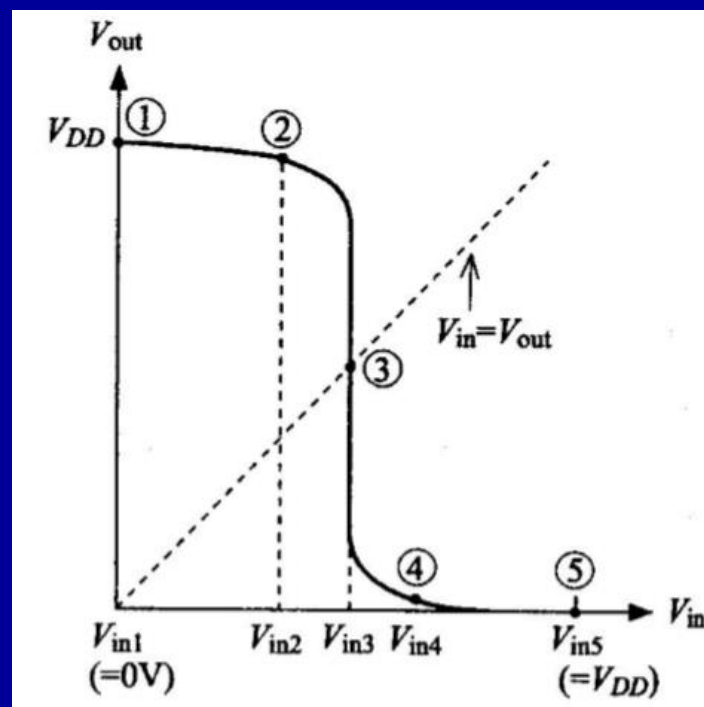
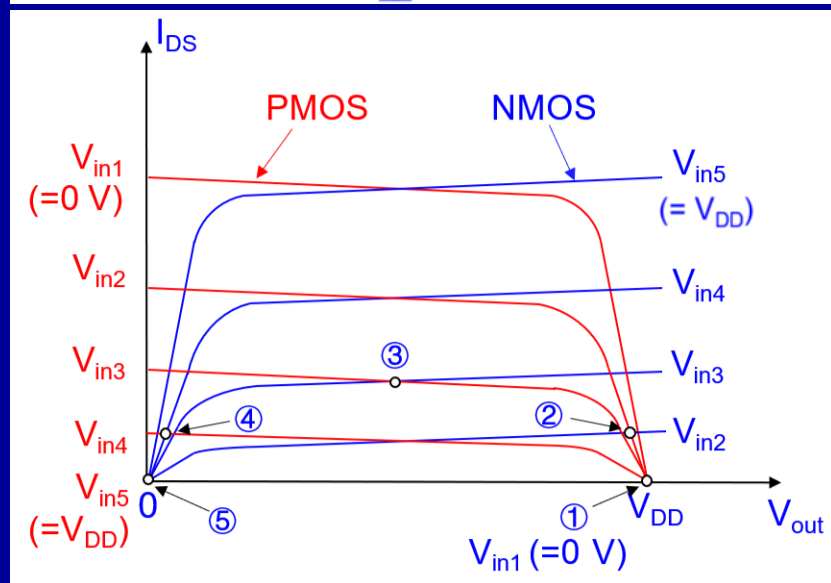
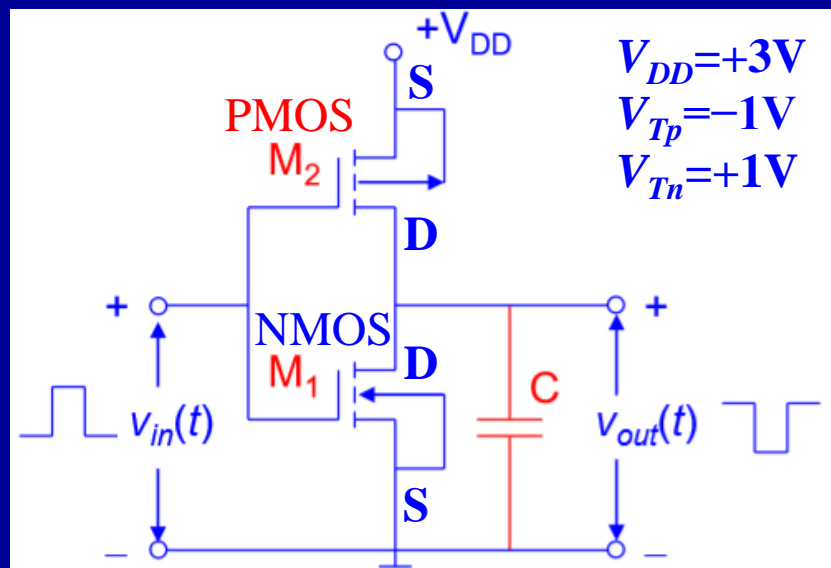
4. 互补MOS反相器 (Complementary MOS, CMOS)



- ◆ 负载使用增强型PMOS，组成经典的CMOS反相器。
- ◆ 此时输入是 V_{in} ，输出是 V_{out} ，假设 $V_{DD}=3V$ ，NMOS 阈值电压 $V_{Tn}=1V$ ，PMOS 阈值电压 $V_{Tp}=-1V$ ，CMOS 完全对称。

MOSFET的开关特性

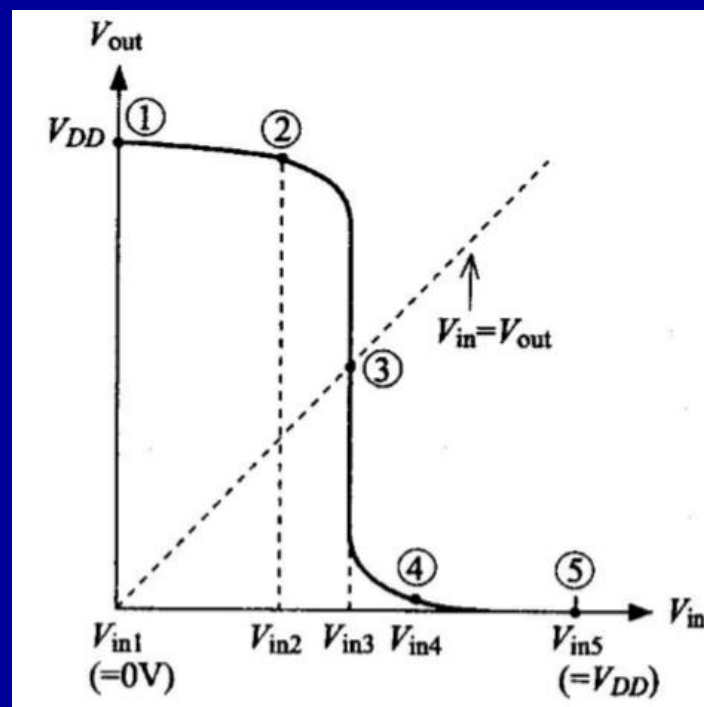
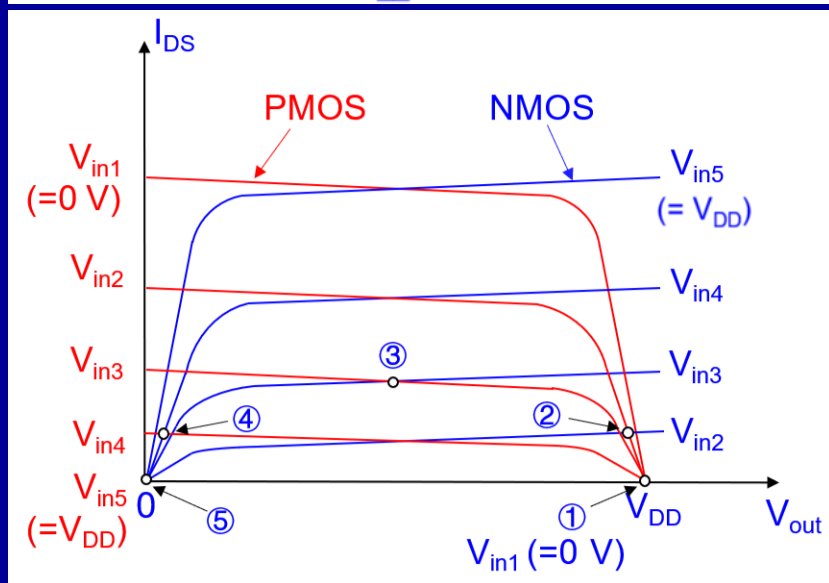
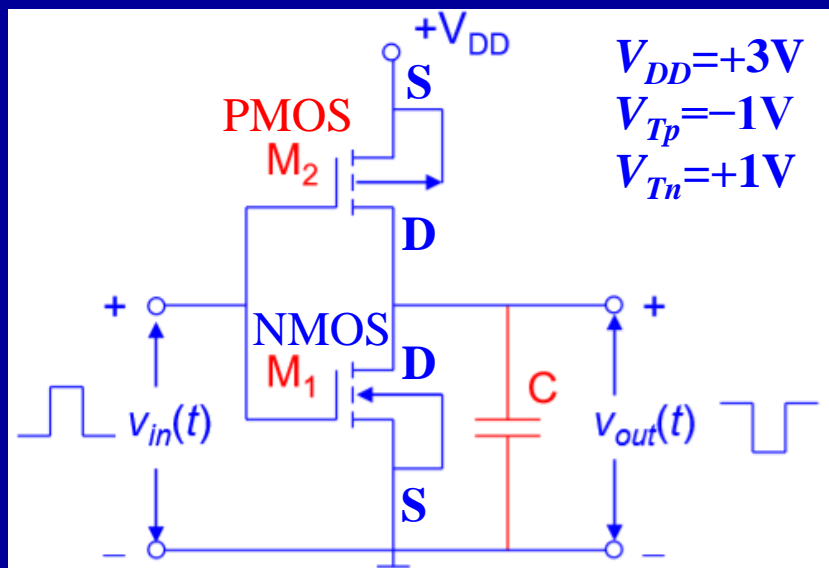
4. 互补MOS反相器 (CMOS)



① $V_{in}=0V$ 时, PMOS $V_{GS_p}=-3V$, 处于导通状态; NMOS $V_{GS_n}=0V$, 处于截止状态, 输出电压 $V_{out} \approx V_{DD}$; 而 $|V_{DS_p}| < |V_{GS_p} - V_{Tp}| = 2V$, 因此PMOS 处于线性区, NMOS截止, 此时几乎没有静态功耗。

MOSFET的开关特性

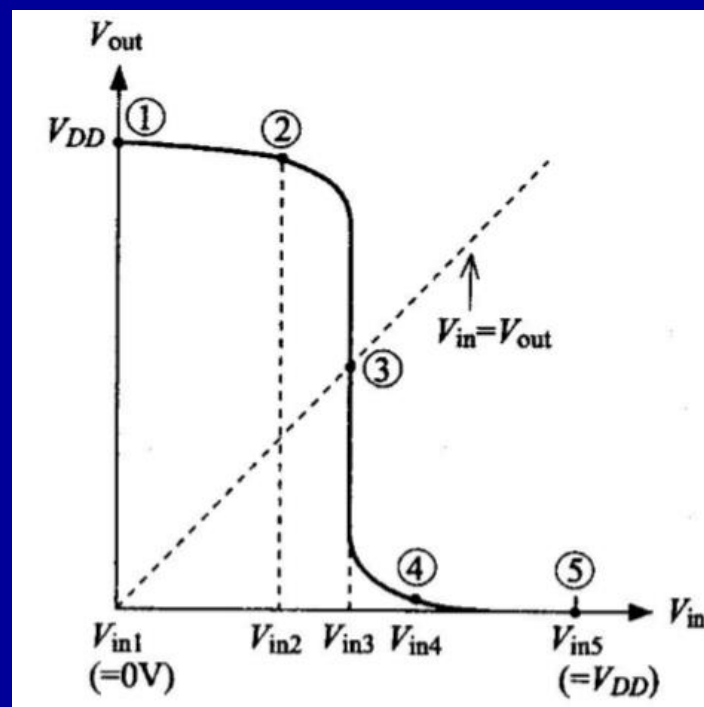
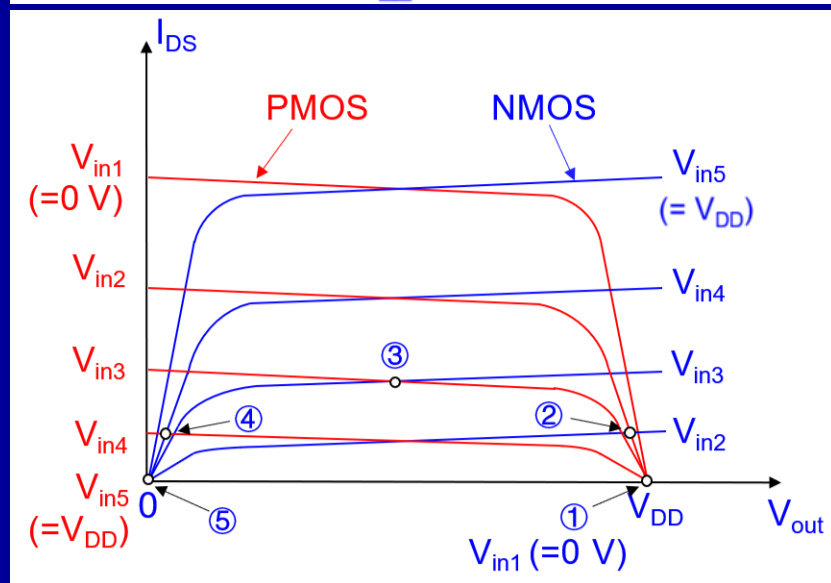
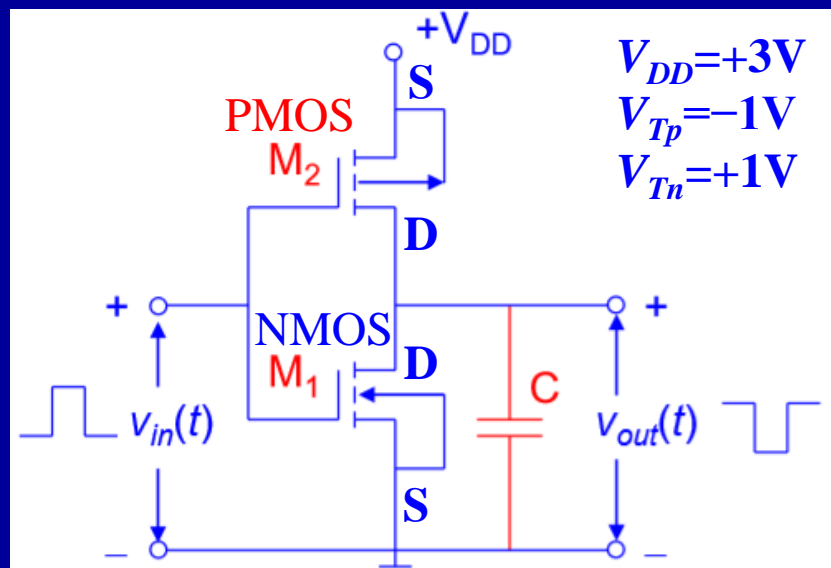
4. 互补MOS反相器 (CMOS)



② $V_{in} = 1.1V$ 时, PMOS $V_{GS_p} = -1.9V$, 处于导通状态; NMOS $V_{GS_n} = 1.1V$, 处于导通状态, V_{out} 略小于 V_{DD} ;
 $|V_{DS_p}| < |V_{GS_p} - V_{Tp}| = 0.9V$, PMOS 处于线性区; 而 $V_{DS_n} > V_{GS_n} - V_{Tn} = 0.1V$, NMOS 处于饱和区。

MOSFET的开关特性

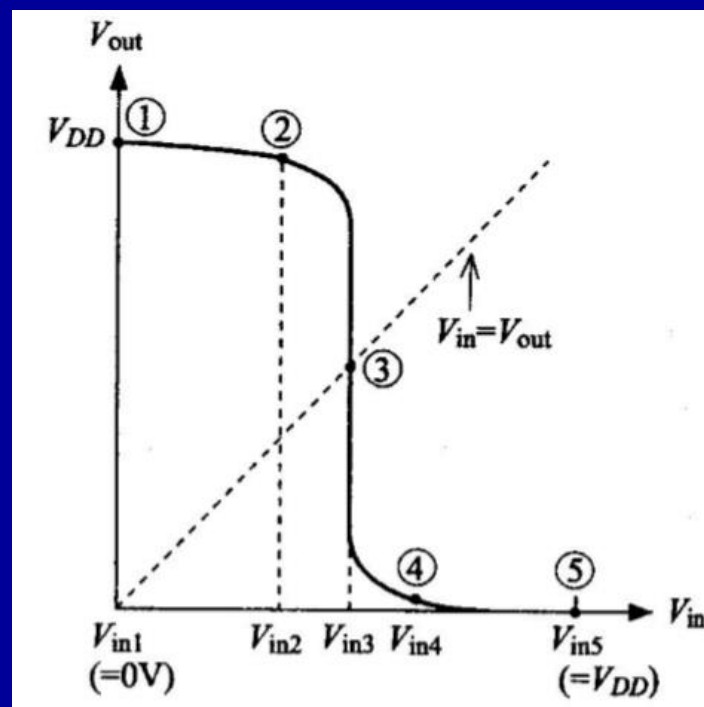
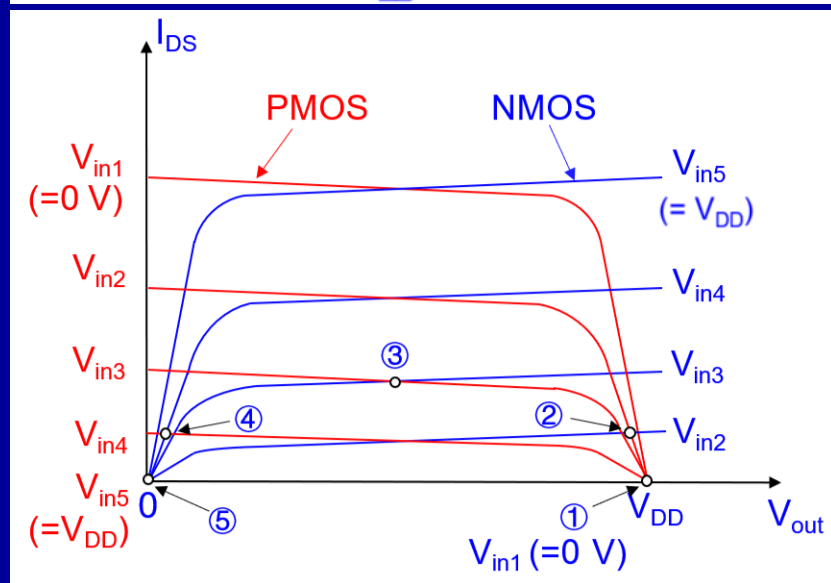
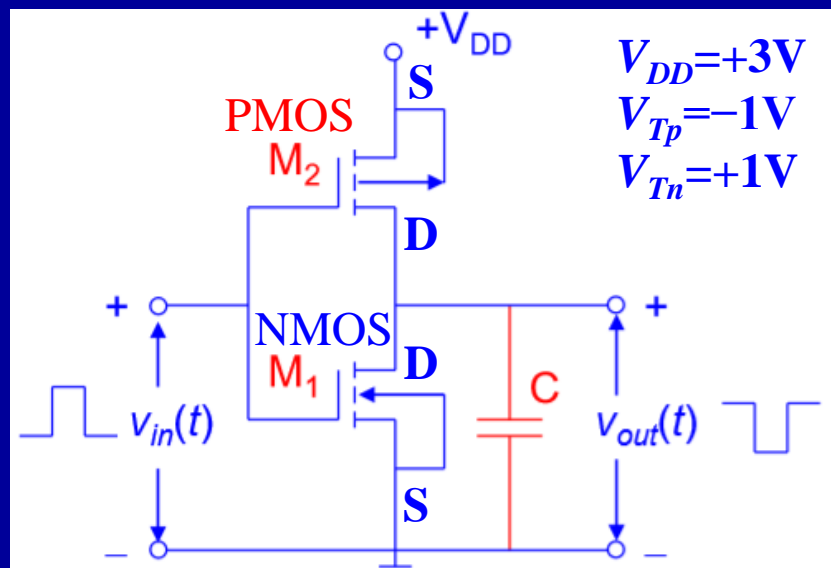
4. 互补MOS反相器 (CMOS)



③ $V_{in} = 1.5V$ 时, PMOS $V_{GSp} = -1.5V$, 处于导通状态; NMOS $V_{GSn} = 1.5V$, 处于导通状态, $V_{out} = 0.5V_{DD}$;
 $|V_{DSp}| > |V_{GSp} - V_{Tp}| = 0.5V$, PMOS处于饱和区; 而 $V_{DSn} > V_{GSn} - V_{Tn} = 0.5V$, NMOS处于饱和区。

MOSFET的开关特性

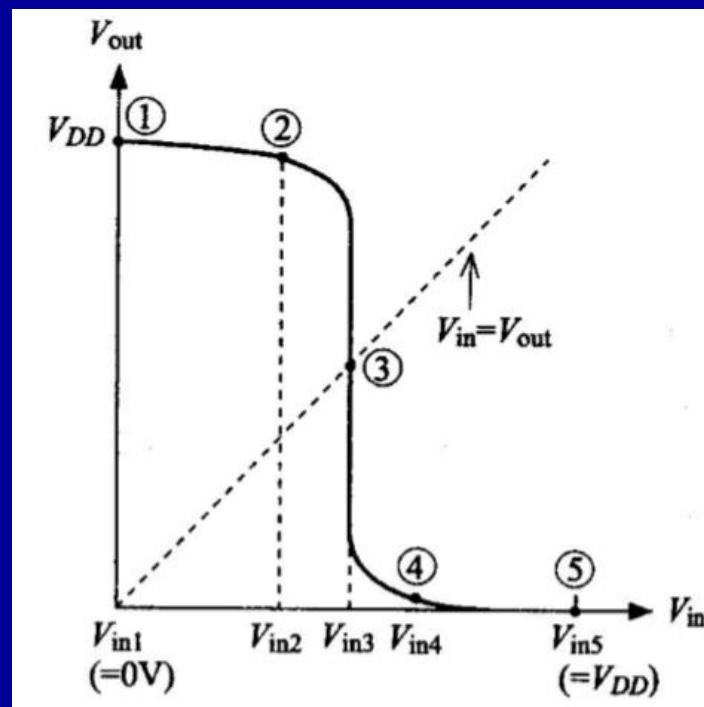
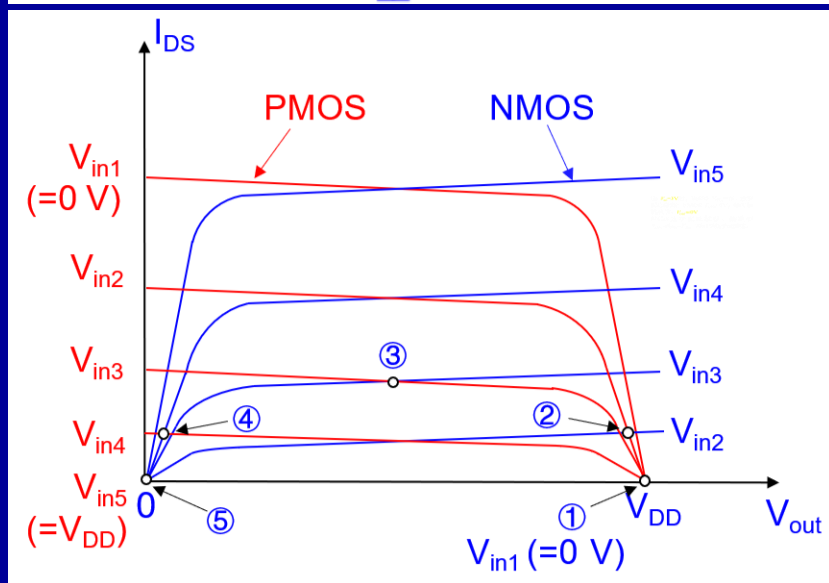
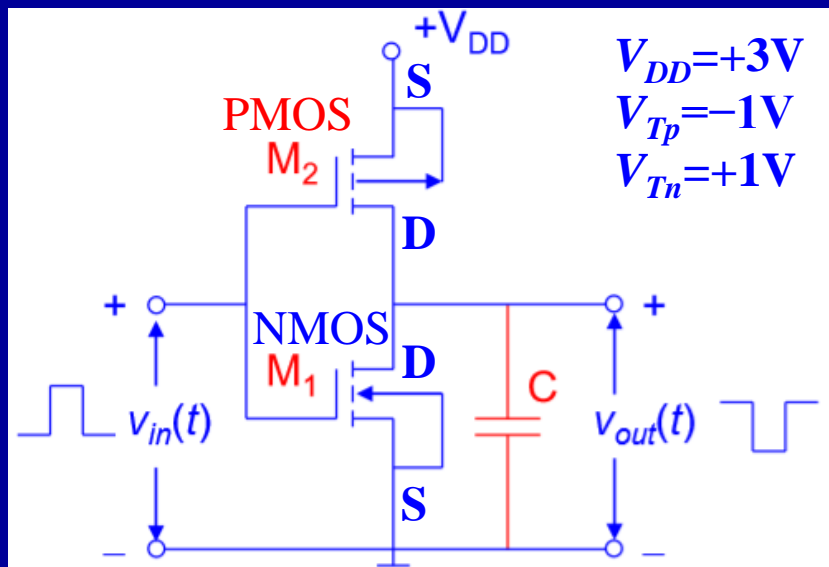
4. 互补MOS反相器 (CMOS)



④ $V_{in} = 1.9V$ 时, PMOS $V_{GS_p} = -1.1V$, 处于导通状态; NMOS $V_{GS_n} = 1.9V$, 处于导通状态, V_{out} 略大于 $0V$;
 $|V_{DS_p}| > |V_{GS_p} - V_{Tp}| = 0.1V$, PMOS 处于饱和区; 而 $V_{DS_n} < V_{GS_n} - V_{Tn} = 0.9V$, NMOS 处于线性区。

MOSFET的开关特性

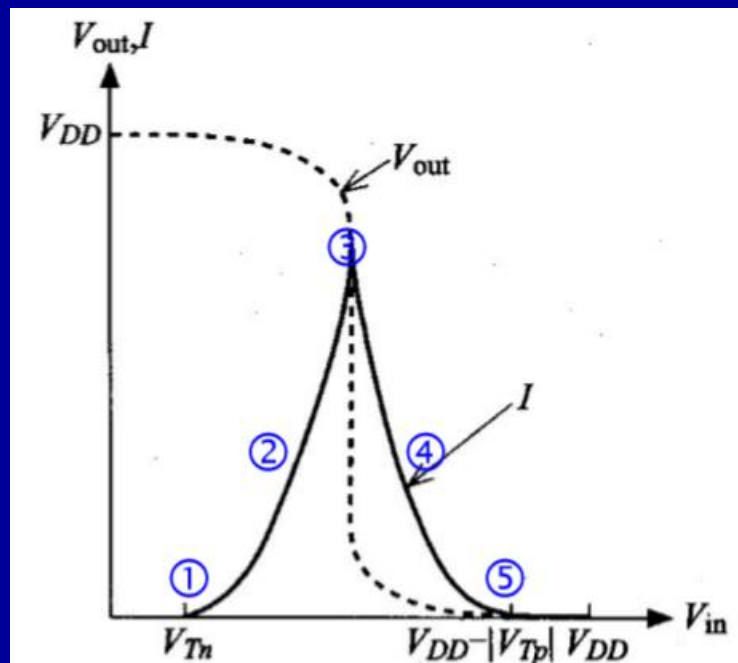
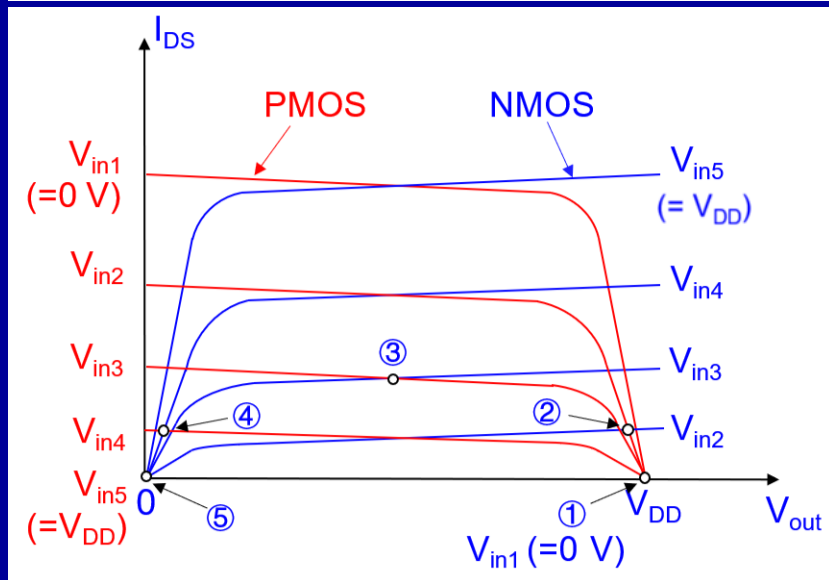
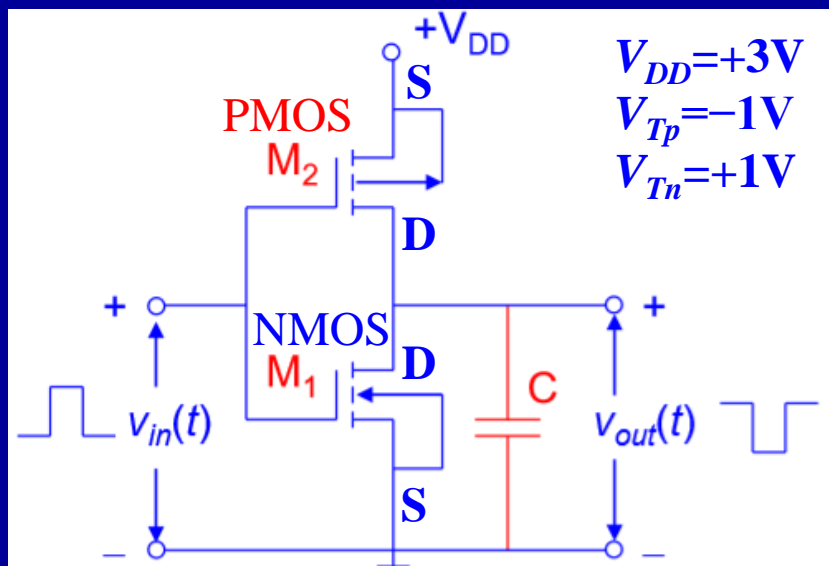
4. 互补MOS反相器 (CMOS)



⑤ $V_{in}=3V$ 时, PMOS $V_{GSp}=0V$, 处于截止状态; NMOS $V_{GSn}=3V$, 处于导通状态, $V_{out} \approx 0V$;
 PMOS截止; 由于 $V_{DSn} < V_{GSn} - V_{Tn} = 2V$, NMOS处于线性区。

MOSFET的开关特性

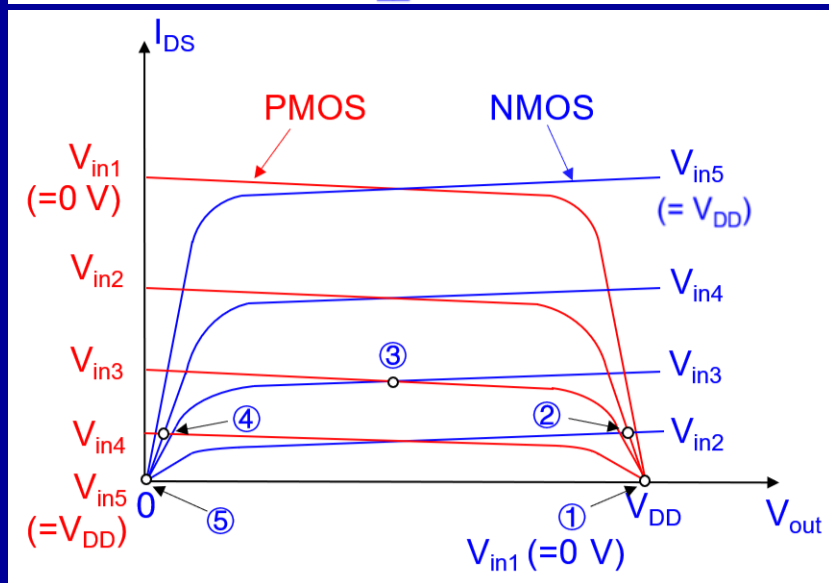
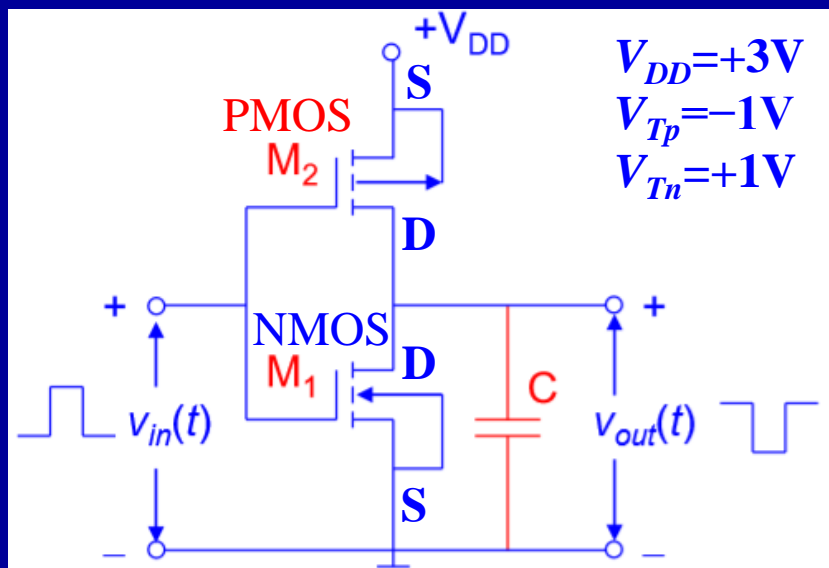
4. 互补MOS反相器 (CMOS)



⑥ 虚线代表电压，实线代表电流；虽然CMOS的静态功耗很小，但是在“0”和“1”转换的过程中，当PMOS与NMOS同时导通且处于饱和区时，流经电路的电流达到最大，此时动态功耗很大。

MOSFET的开关特性

4. 互补MOS反相器 (CMOS)



⑦ CMOS优点：静态功耗小（始终有一个管子处于截止状态），可以将CMOS反相器中的两个管子跨导做得较大，使导通时的等效电阻小一些，从而缩短开关时间，这样在两个状态转换过程中虽然两个管子导通时的电流很大，但是由于电阻较小，开关时间短，所以总的来说总功耗很小。

CMOS缺点：由于管子类型不同，单元面积大。

第五章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)

§5.1 MOSFET的结构和工作原理

§5.2 MOSFET的阈值电压

§5.3 MOSFET的直流特性

§5.4 MOSFET的频率特性

§5.5 MOSFET的开关特性

§5.6 MOSFET的功率特性

§5.7 小尺寸MOSFET

§5.8 MOSFET的最新研究进展

§5.6 MOSFET的功率特性

功率MOSFET的优点：

- ① 多子器件，没有少子存储效应，工作频率高，开关速度快。
- ② MOS管是电压控制器件，输入阻抗高，作功率开关使用时，所需驱动电流小，驱动功率小，驱动电路简单，功率增益大且稳定性好。
- ③ 器件工作时温度上升，晶格散射上升，沟道载流子迁移率下降，电流下降，温度下降，有一个温度负反馈，热稳定性好。

功率MOSFET的缺点：

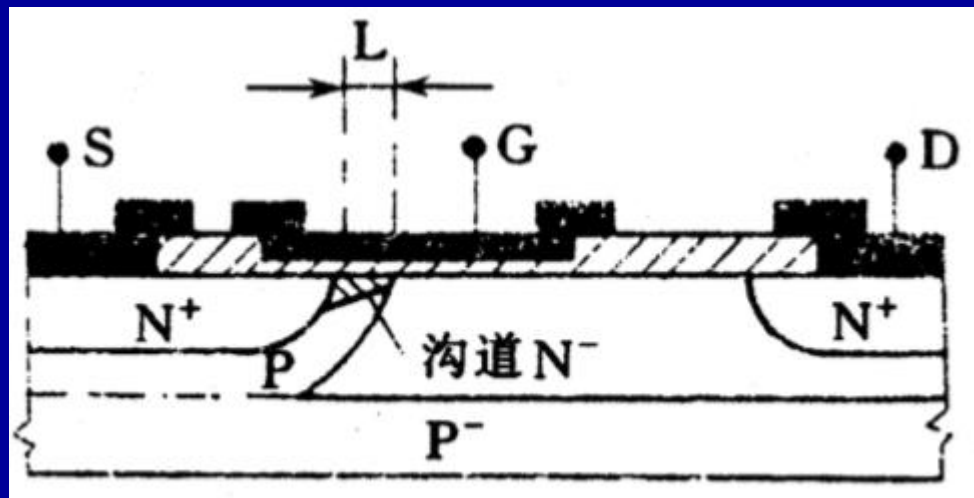
- ① 开启电压 V_{on} 和导通电阻 R_{on} 比双极性晶体管大。

MOSFET的功率特性

1. LDMOS (横向双扩散)

优点：沟道短，跨导大，频率特性好；高压时， N^- 区耗尽区宽度大，**击穿电压大。**

缺点：管芯面积大。



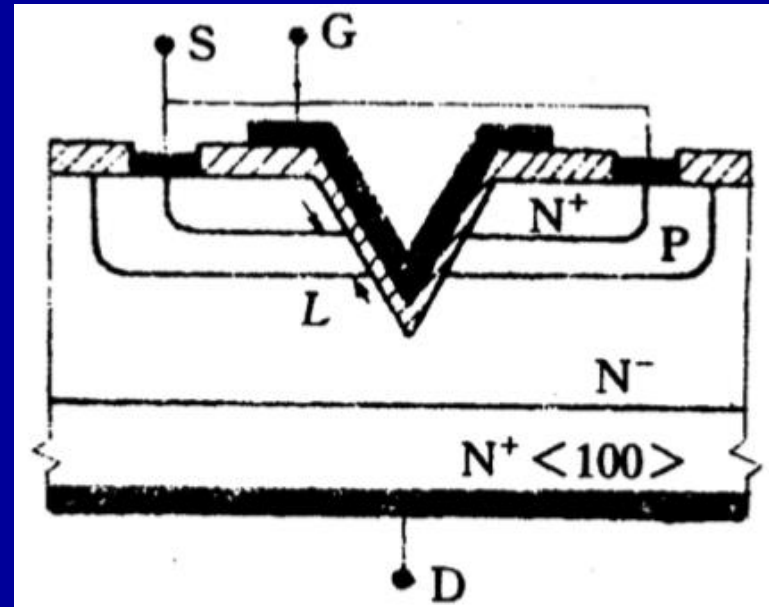
漏端**双扩散**形成一重掺一轻掺两个N型区域， N^- 区紧挨P型衬底，在高压情况下，耗尽区不仅在P型衬底一侧有，在 N^- 区更大，可以有效提高器件击穿电压，同时 N^- 区的存在也避免了穿通效应。

MOSFET的功率特性

2. VVMOS (垂直V型槽)

优点：管芯面积小。

缺点：V形槽会导致尖端电场，使击穿电压下降；导通电阻大；腐蚀很难控制，可靠性下降。



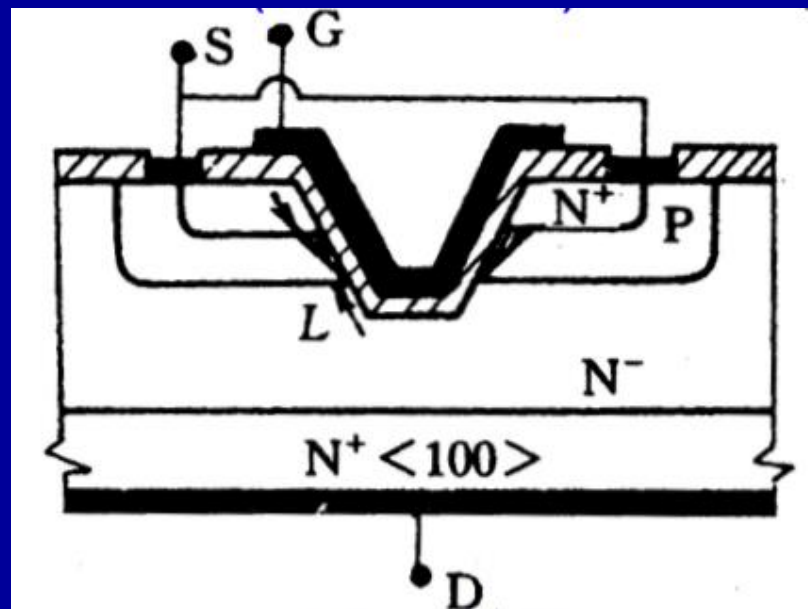
为了减小管芯面积，将器件做成垂直型晶体管，但是V形槽结构在工艺上的控制十分困难，可靠性低，同时V形槽会让电场大部分聚集在其底部，从而使器件较早地击穿，电流在此处会有拥挤效应，所以导通电阻也较大。

MOSFET的功率特性

3. VUMOS (垂直U型槽)

优点：消除了尖端电场，使击穿电压上升； N^- 区飘移电流易展开，导通电阻下降。

缺点：刻蚀很难控制，可靠性下降。



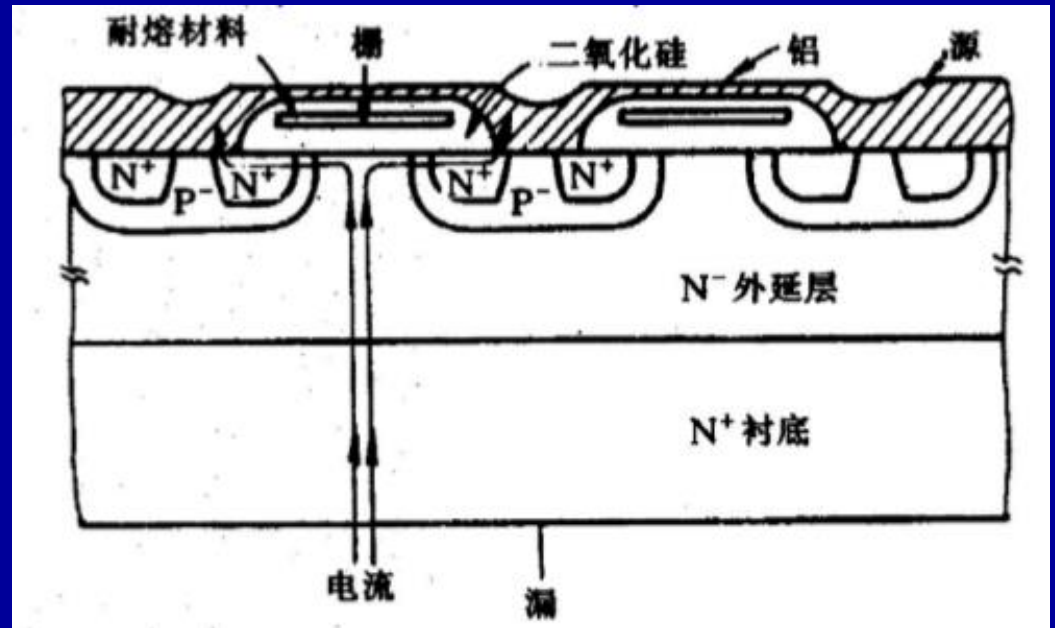
将V形槽改为U形槽，减弱尖端电场和电流拥挤效应。

MOSFET的功率特性

4. VDMOS (垂直双扩散)

优点： 击穿电压很大，可靠性高。

缺点： 导通电阻大。



电流从底部的漏流经 N^+ 衬底和 N^- 外延层，经过沟道进入源，由于有一层很厚的 N^- 区，所以器件**击穿电压高**，导通电阻大，没有刻蚀工艺，因此工艺稳定性高。