

CMOS工艺中的元件



邹志革

Huazhong University of Science and
Technology, Wuhan, China
EST- ICC

感谢李福乐博士为本课件提供的资料!



CMOS集成电路中的元件

- MOS晶体管
 - 版图和结构
 - 电特性
 - 隔离
 - 串联和并联
- 连线
- 集成电阻
- 集成电容
- 寄生二极管和三级管



CMOS集成电路中元件

- MOS晶体管
- 连线
 - 连线寄生模型
 - 寄生影响
- 集成电阻
- 集成电容
- 寄生二极管和三级管



CMOS集成电路中元件

- MOS晶体管
- 连线
- 集成电阻
 - 多晶硅电阻
 - 阱电阻
 - MOS电阻
 - 导线电阻
- 集成电容
- 寄生二极管和三级管



CMOS集成电路中元件

- MOS晶体管
- 连线
- 集成电阻
- 集成电容
 - 多晶硅-扩散区电容
 - 双层多晶硅电容
 - MOS电容
 - 多层“夹心”电容
- 寄生二极管和三级管



CMOS集成电路中的元件

- MOS晶体管
- 连线
- 集成电阻
- 集成电容
- 寄生二极管和三级管
 - 衬底PNP BJT
 - PSD/NWELL Diode
 - NSD/P-epi Diode



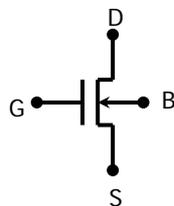
MOS晶体管

- MOS晶体管
 - 最基本的有源元件
 - 在CMOS工艺中，有PMOS和NMOS两种
 - 可用作跨导元件，开关，有源电阻，MOS电容

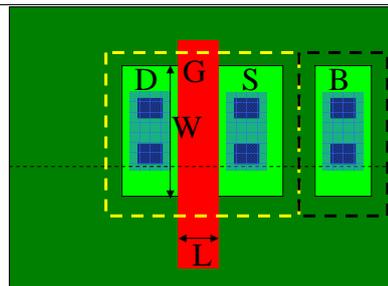


MOS晶体管

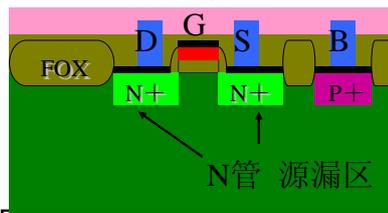
- NMOS晶体管的版图和结构



NMOS晶体管符号



NMOS晶体管版图

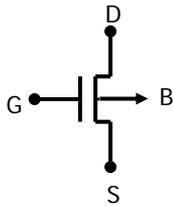


NMOS晶体管剖面图

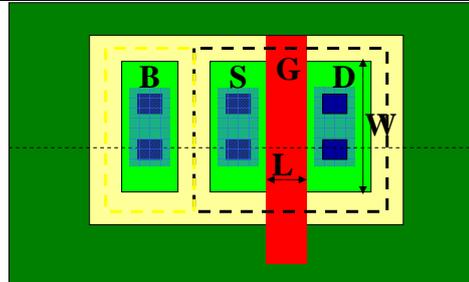


MOS晶体管

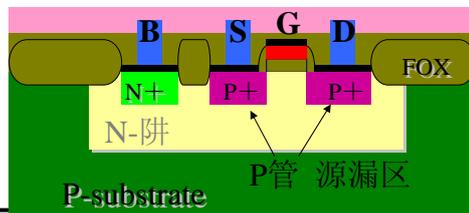
- PMOS晶体管的版图和结构



PMOS晶体管符号



PMOS晶体管版图



PMOS晶体管剖面图

邹志革



MOS晶体管

– 在物理版图中, 只要一条多晶硅跨过一个有源区就形成了一个MOS晶体管, 将其S, G, D, B四端用连线引出即可与电路中其它元件连接.

- MOS晶体管的电特性

– MOS晶体管是用栅电压控制源漏电流的器件, 重要的公式是萨方程(I-V方程):

$$I_{DS} = k' \cdot W/L \cdot [(V_G - V_T - V_S)^2 - (V_G - V_T - V_D)^2]$$

邹志革

EST-ICC

10



MOS晶体管

- MOS晶体管的电特性
 - V_G, V_S, V_D 分别是栅, 源, 漏端的电压, V_T 是开启电压.
 - k' 是本征导电因子, $k' = \mu \cdot C_{ox} / 2$, μ 是表面迁移率, 属于硅材料参数, C_{ox} 是单位面积栅电容, 属于工艺参数
 - W, L 分别是MOSFET的沟道宽度和长度, 属于物理参数
 - 管子的最小沟道长度 L_{min} 标志着工艺的水平——特征尺寸, 如 $0.35\mu m, 0.18\mu m$. W 表示管子的大小, W 越大则管子越大, 导电能力越强, 等效电阻越小.



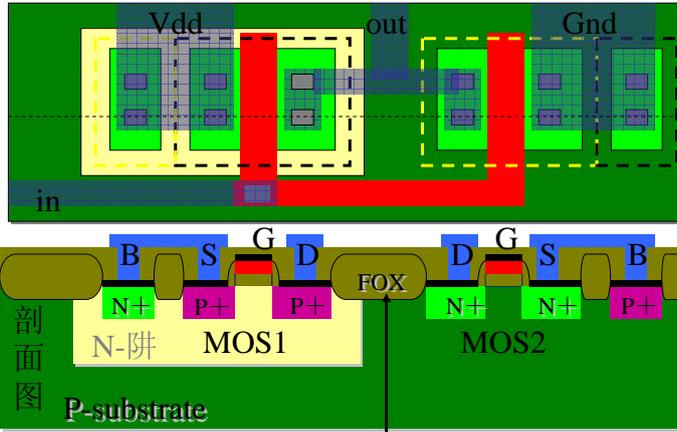
MOS晶体管

- MOS晶体管的电特性
 1. 晶体管的三种工作状态
 - 截止区: $I_{DS} = 0$ 条件: $V_G - V_T - V_S \leq 0$
 - 饱和区: $I_{DS} = k' \cdot W/L \cdot [(V_G - V_T - V_S)^2 - (V_G - V_T - V_D)^2]$
条件: $V_G - V_T - V_S > 0, V_G - V_T - V_D \leq 0$
 - 线性区: $I_{DS} = k' \cdot W/L \cdot [(V_G - V_T - V_S)^2 - (V_G - V_T - V_D)^2]$
条件: $V_G - V_T - V_S > 0, V_G - V_T - V_D > 0$
 2. 晶体管的开启电压公式

$$V_T = V_{T0} + \gamma \left[\sqrt{2\Phi_F + V_{BS}} - \sqrt{2\Phi_F} \right]$$



MOS晶体管的隔离



在集成电路中，两个无关的晶体管都是用场氧隔离的

将MOS1和MOS2隔离开



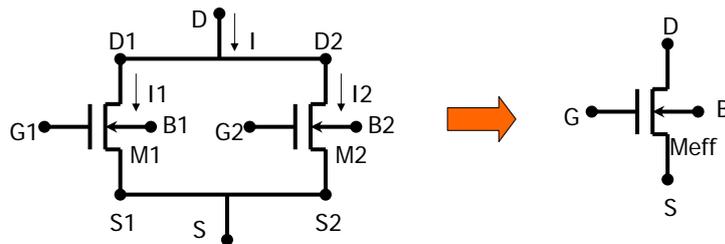
MOS晶体管的并联

晶体管的D端相连, S端相连.

如果两个晶体管中有一个晶体管导通,从D到S就有电流流过,若两个晶体管都导通,则 $I=I_1+I_2$.

每只晶体管相当于一个电阻,它的并联和电阻并联的规律一样,等效电阻减小,电流增大.

M1 D G S B MN L=5u W=100u M=2



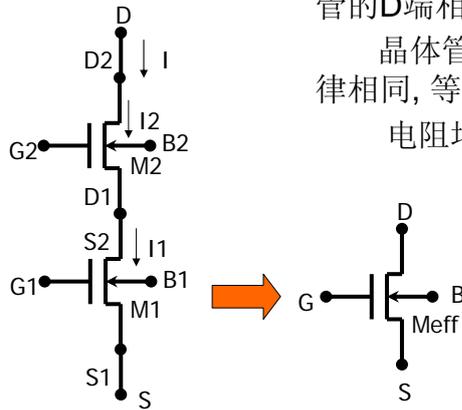


MOS晶体管的串联

* 串联: 晶体管的S端和另外一个晶体管的D端相连.

晶体管的串联和电阻的串联规律相同, 等效

电阻增大, 电流不变: $I=I_1=I_2$.



邹志革

EST-ICC

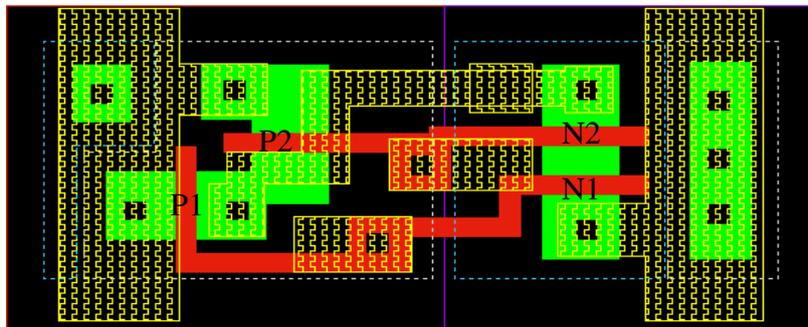
15



MOS晶体管

• MOS晶体管的串联和并联

* 串联和并联的物理实现



P1和P2并联, N1和N2串联

邹志革

EST-ICC

16



连线

- 连线

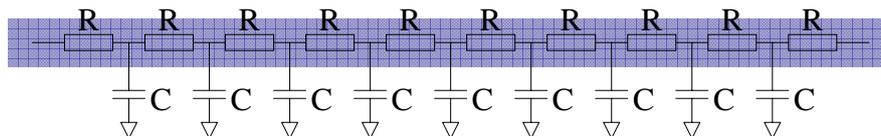
- * 电路由元件和元件间的连线构成
- * 理想的连线在实现连接功能的同时，不带来额外的寄生效应
- * 在版图设计中，可用来做连线的层有：
金属，扩散区，多晶硅



连线

- 连线寄生模型

- * 串联寄生电阻
- * 并联寄生电容



简单的长导线寄生模型



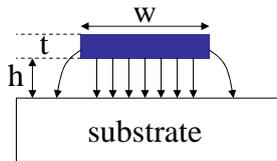
连线

• 串联寄生电阻典型值

- * 金属(铝, 铜)—— $0.05 \Omega/\square$
- * 多晶硅—— $10 \sim 15 \Omega/\square$
- * 扩散区 (N+) —— $20 \sim 30 \Omega/\square$



连线



单位长度电容的经验公式:

$$C = \epsilon \left[\frac{w}{h} + 0.77 + 1.06 \left(\frac{w}{h} \right)^{0.25} + 1.06 \left(\frac{t}{h} \right)^{0.5} \right]$$

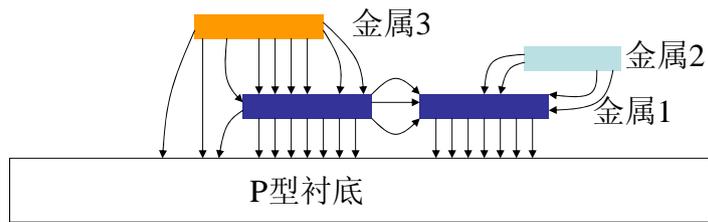
4-metal 0.25um technology

	Ploy	Metal1	Metal2	Metal3	Metal4
最小宽度(um)	0.25	0.35	0.45	0.50	0.60
底板电容(aF/um*um)	90	30	15	9.0	7.0
侧墙电容(两边)(aF/um)	110	80	50	40	30



连线

- 复杂互连线的寄生电容



连线

- 串联寄生电阻和并联寄生电容的影响
 - 电源地上，电阻造成直流和瞬态压降
 - 长信号线上，分布电阻电容带来延迟
 - 在导线长距离并行或不同层导线交叉时，带来相互串扰问题



其他元件

MOS集成电路是以MOS晶体管(MOSFET)为主要元件构成的电路，以及将这些晶体管连接起来的连线，此外，集成电阻，电容，以及寄生三极管，二极管，等也是MOS集成电路中的重要元件。



集成电阻

• 电阻

* 两端元件—— $V=RI$

* 最基本的无源元件之一，是输入输出静电保护电路，模拟电路中必不可少的元件

* 方块电阻，线性，寄生效应



集成电路

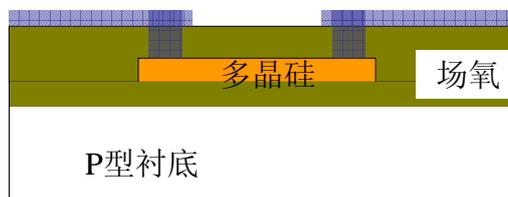
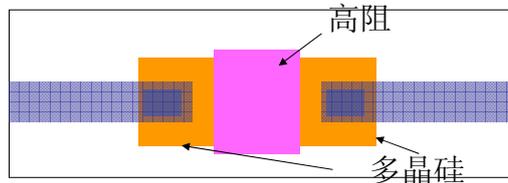


• 多晶硅电阻

- * 多晶硅电阻做在场区上.
- * 其方块电阻较大, 因此可以作为电阻. 如在作电阻的多晶硅处注入杂质, 使其方块电阻变大, 可制作阻值很大的电阻.

$$R = R_{\square \text{poly-Si}} \cdot L/W$$

- * 典型值: $R_{\square \text{poly-Si}} = 1\text{k}$



邹志革

EST-ICC

25

集成电路

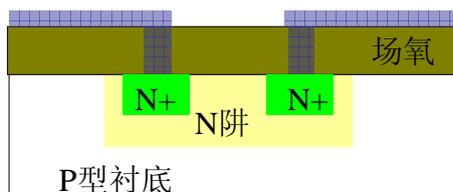
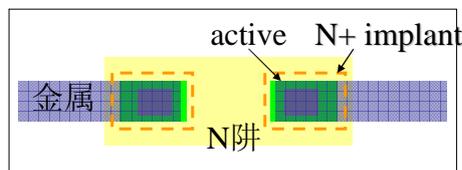


• NWELL电阻

- * 因为阱是低掺杂的, 方块电阻较大, 因此大阻值的电阻亦可以用阱来做

$$R = R_{\square \text{well}} \cdot L/W$$

- * 典型值: $R_{\square \text{well}} = 0.85\text{k}$



邹志革

EST-ICC

26



集成电阻

• MOS管电阻

- * 工作在线性区的MOS管可用作电阻
- * 它是一个可变电阻, 其变化取决于各极电压的变化:

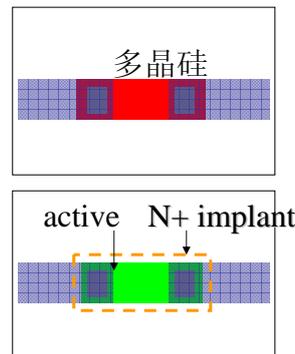
$$R = \frac{V_{DS}}{I_{DS}} = \frac{V_D - V_S}{k[(V_G - V_T - V_S)^2 - (V_G - V_T - V_D)^2]}$$



集成电阻

• 导线电阻

- * 多晶硅导线——10~15 Ω/□
- * 扩散区 (N+) ——20~30 Ω/□





集成电容

• 电容

* 两端元件，电荷的容器—— $Q=CV$



* 最基本的无源元件之一，是电源滤波电路，信号滤波电路，开关电容电路中必不可少的元件

* 单位面积电容，线性，寄生效应

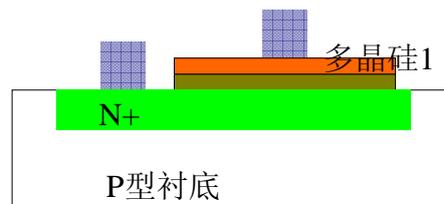
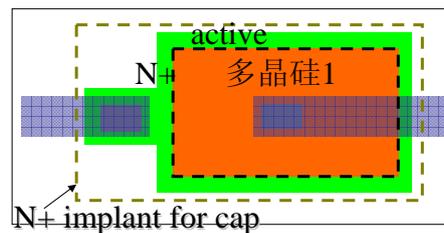


集成电容

• 多晶硅-扩散区电容

* 电容作在扩散区上，它的上极板是第一层多晶硅，下极板是扩散区，中间的介质是氧化层

* 需要额外加一层版





集成电容

• 多晶硅-扩散区电容

* 线性特性

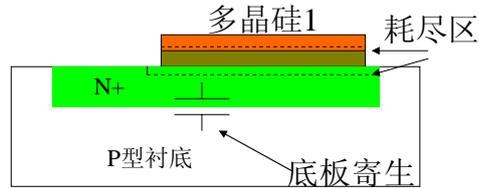
$$C \approx C_0(1 + \alpha_1 V + \alpha_2 V^2)$$

* 典型值 $\alpha_1 : 5 \times 10^{-4} V^{-1}$

$$\alpha_2 : 5 \times 10^{-5} V^{-2}$$

* 单位面积电容小于MOS栅电容

* 底板寄生电容——20% C



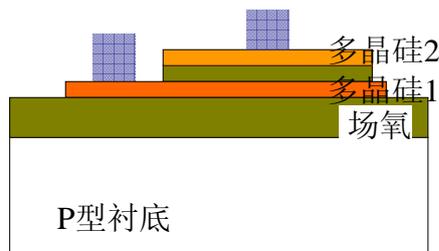
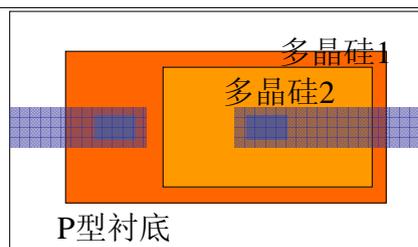
集成电容

• 多晶硅-多晶硅电容:

* 电容作在场区上, 它的两个电极分别是两层多晶硅, 中间的介质是氧化层

* 线性特性和底板寄生与多晶硅-扩散区电容相近

* 典型值: $0.7 \text{fF}/\mu\text{m}^2$





集成电容

• MOS电容:

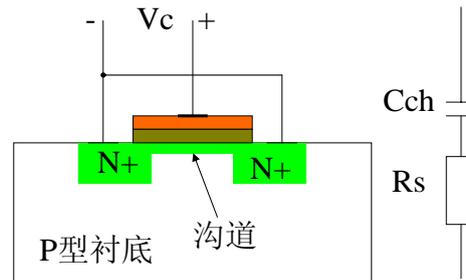
* 结构和MOS晶体管一样, 是一个感应沟道电容, 当栅上加电压形成沟道时电容存在. 一极是栅, 另一极是沟道, 沟道这一极由S(D)端引出.

* 电容的大小取决于面积, 氧化层的厚度及介电数.

$$C = \epsilon \cdot \frac{WL}{t_{ox}}$$

* 单位面积电容最大的电容

* 沟道电阻问题

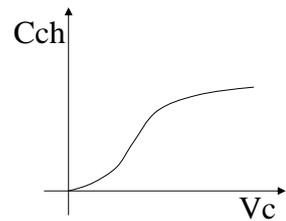


集成电容

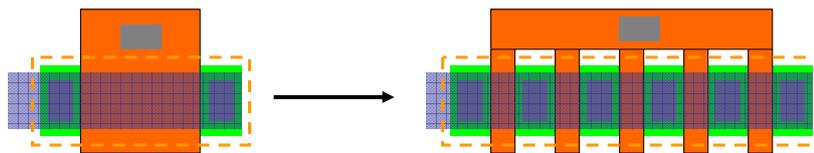
• MOS电容:

* 非线性电容
适用于电源滤波

* 沟道长度需权衡考虑



MOS电容C/V特性



减小沟道电阻的方法



集成电容

- “夹心”电容

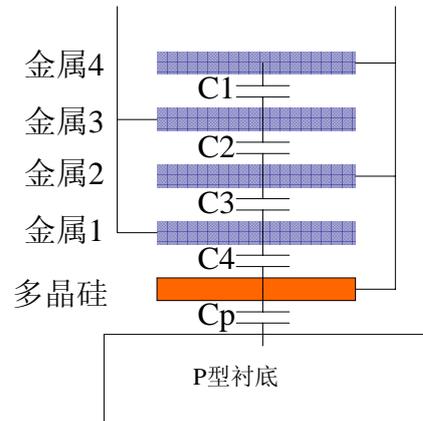
- * 线性电容

- * 电容值为:

$$C=C_1+C_2+C_3+C_4$$

- * 底板寄生电容大约为

(50~60% C)



衬底双极晶体管(BJT)

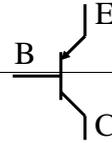
- 衬底BJT

- * 有源元件之一

- * 对于N阱CMOS工艺, 可实现PNP BJT

- * 可用于电压基准电路

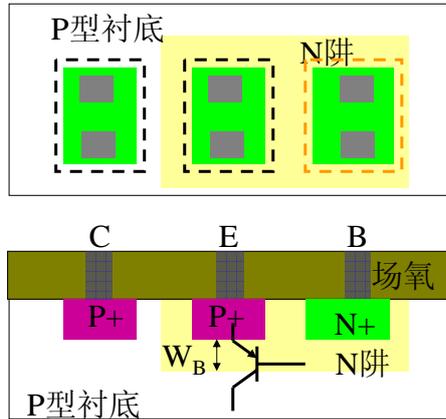
衬底BJT



• PNP BJT的版图和结构

特点:

- 1) 集电极C电压受到限制, 须接地
- 2) 基区宽度 W_B 没有很好控制, 电流增益差别较大
- 3) 结构上的两个主要参数: 基区宽度 W_B 和BE结面积A



衬底BJT



• 电特性

* 饱和电流 I_S 正比于A, 反比于 W_B

* 集电极电流
$$i_C = I_S \exp\left(\frac{v_{BE}}{V_t}\right)$$

* 共发射极电流增益 $\beta_F = i_C / i_B$

• 当 i_C 一定, v_{BE} 具有负温度系数



二极管 (Diode)

- 二极管
 - * 有源元件之一
 - * 对于N阱CMOS工艺，有PSD/NWELL和NSD/P-epi两种Diode
 - * 主要用于ESD保护电路

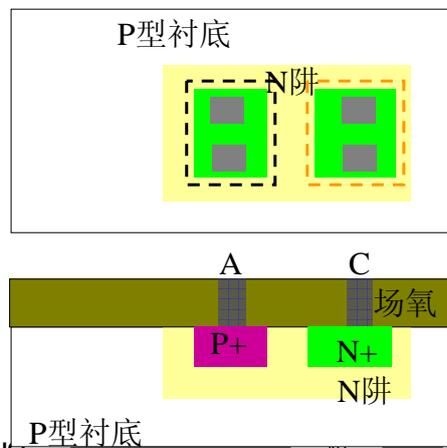


二极管

• PSD/NWELL Diode的版图和结构

特点:

- 1) 存在寄生PNP BJT问题，电流容易漏到衬底，BJT的beta范围可从 <0.1 到 >10
- 2) 有较大的串联寄生电阻
- 3) 结构上的主要参数：结面积A



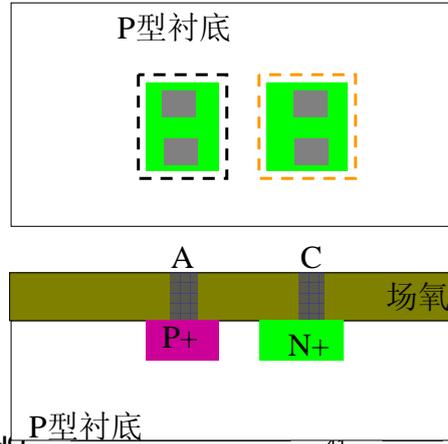


二极管

• NSD/P-epi Diode的版图和结构

特点:

- 1) C端的电压要低于衬底电压才能正向导通
- 2) 在ESD中用于抑制负的尖峰电压
- 2) 结构上的主要参数: 结面积A



邹志革

EST-ICU

41



二极管

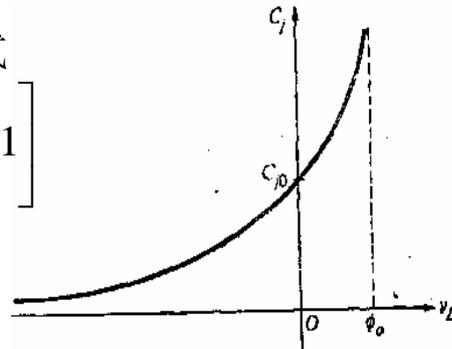
• 电特性

* 饱和电流 I_S 正比于A

* 电流-电压关系公式

$$i_D = I_S \left[\exp\left(\frac{v_D}{V_t}\right) - 1 \right]$$

* PN结电容



邹志革

EST-ICU

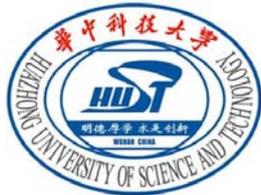
图 2.2.3 耗尽电容与外加电压的关系



本讲小结

- CMOS集成电路工艺中的元件
 - MOS晶体管
 - 集成电阻
 - 集成电容
 - 连线
 - BJT晶体管和二极管
- 元件的版图和结构
- 元件的电特性和寄生效应

The End !



Thanks!

Huazhong University of Science and
Technology, Wuhan, China
EST- ICC