



## 第6章 MOSFET的电气特性

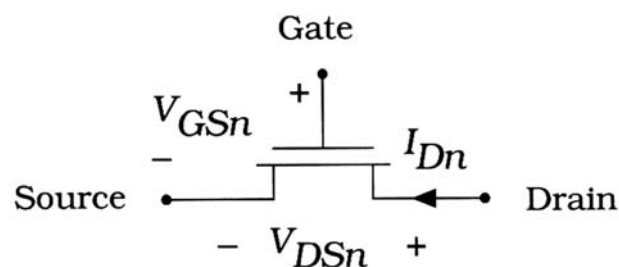
### 本章目录

- ❖6.1 MOS物理学
- ❖6.2 nFET电流-电压方程
- ❖6.3 FET的RC模型
- ❖6.4 pFET特性
- ❖6.5 小尺寸MOSFET模型

### § 6.1 MOS物理学



#### NMOS的电流和电压



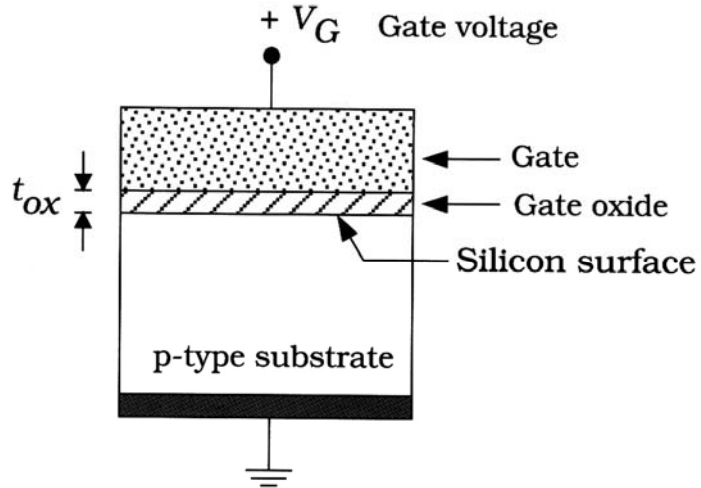
**Figure 6.1** nFET current and voltages

$$I_{Dn} = I_{Dn}(V_{GSn}, V_{DSsn})$$

# § 6.1 MOS物理学



## MOS的结构



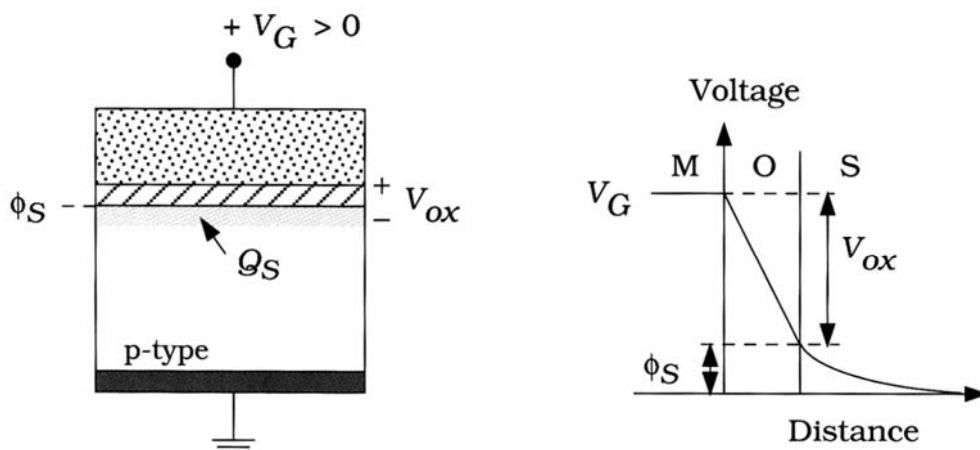
**Figure 6.2** Structure of the MOS system

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \quad \epsilon_{ox} = 3.9\epsilon_0, \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-14} \text{ F/cm}$$

# § 6.1 MOS物理学



## MOS的结构中的电压



**Figure 6.4** Voltages in the MOS system

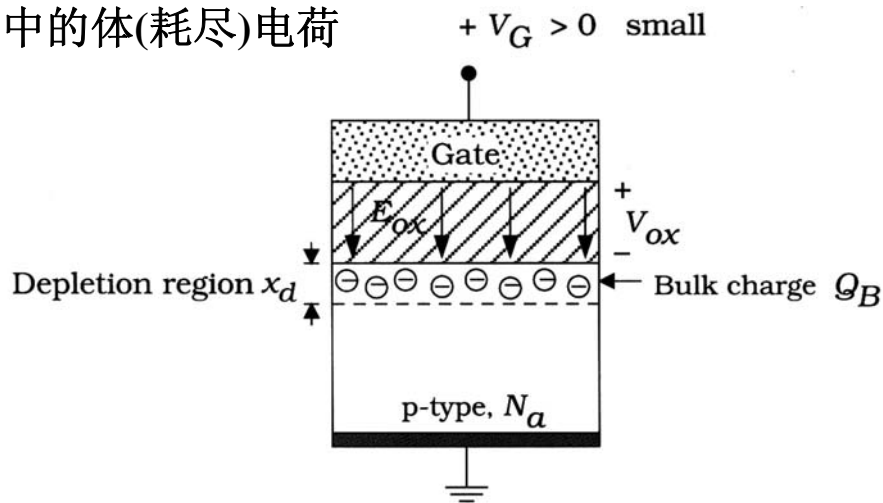
$$V_G = V_{ox} + \phi_S \quad V_{ox}: \text{氧化层的电压降}; \phi_S: \text{表面电势}$$

$$Q_S = -C_{ox} V_{ox} \quad Q_S: \text{表面电荷密度, 单位: C/cm}^2$$

# § 6.1 MOS物理学



## MOS结构中的体(耗尽)电荷



**Figure 6.6** Bulk (depletion) charge in the MOS system

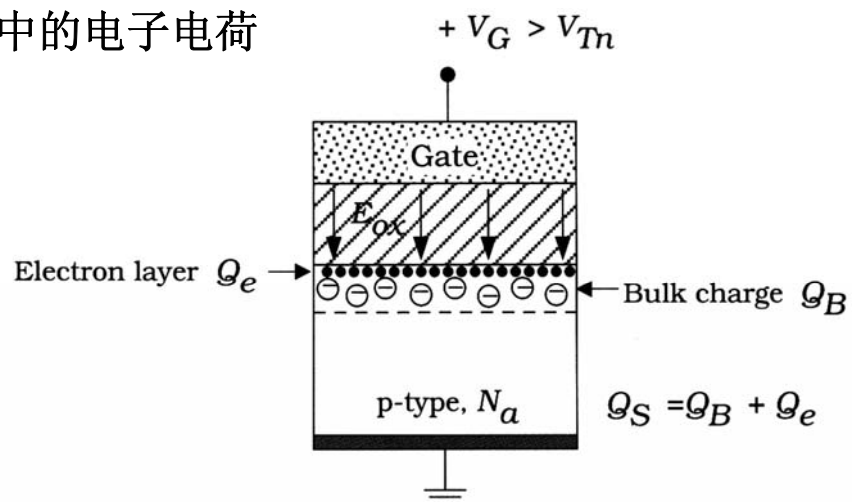
$$Q_B = -\sqrt{2q\epsilon_{Si}N_a\phi_s} \quad Q_B: \text{体电荷密度, 单位: C/cm}^2$$

$$\epsilon_{Si} = 11.8\epsilon_0; N_a: \text{衬底掺杂浓度}$$

# § 6.1 MOS物理学



## MOS的结构中的电子电荷



**Figure 6.7** Formation of the electron charge layer

$$Q_S = Q_B + Q_e \quad Q_e: \text{反型层电子密度}$$

$$V_G > V_{Tn} \text{ 时, } Q_e = -C_{ox}(V_G - V_{Tn})$$



### 阈值电压公式

阈值电压：衬底表面形成强反型时的栅源电压。

强反型：反型层中的载流子浓度与衬底的多数载流子浓度相等。

当表面电势  $\phi_s = 2|\phi_F|$  时，衬底表面出现强反型

$$|\phi_F|: \text{体费米电势}, |\phi_F| = \left( \frac{kT}{q} \right) \ln \left( \frac{N_a}{n_i} \right)$$



### 理想MOS结构的阈值电压

理想MOS：栅和衬底材料一样，氧化层没有电荷

$$V_{Tn} = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_a(2|\phi_F|)} + 2|\phi_F|$$

### 实际MOS结构的阈值电压

$$V_{Tn} = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_a(2|\phi_F|)} + 2|\phi_F| + V_{FB} \quad V_{FB}: \text{平带电压}$$

### 调整后的阈值电压公式

$$V_{Tn} = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_a(2|\phi_F|)} + 2|\phi_F| + V_{FB} + \frac{qD_I}{C_{ox}}$$

$D_I$ : 注入剂量，即每平方厘米注入的离子数



## § 6.1 MOS物理学

例：已知  $T = 300\text{K}$ ,  $N_a = 10^{15} / \text{cm}^3$ ,  $t_{ox} = 50 \text{ \AA} = 50 \times 10^{-8} \text{ cm}$ ,  $V_{FB} = -0.85\text{V}$ ,  $D_I = 4 \times 10^{12} / \text{cm}^2$ , 求  $V_{Tn}$ 。

解：  $\frac{kT}{q} = 0.026\text{V}$        $C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14}}{50 \times 10^{-8}} = 0.69 \times 10^{-6} \text{ F/cm}^2$

$$2|\phi_F| = 2 \times \frac{kT}{q} \times \ln \frac{N_a}{n_i} = 2 \times 0.026 \times \ln \frac{10^{15}}{1.45 \times 10^{10}} = 0.579\text{V}$$

$$\frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2q\epsilon_{Si}N_a(2|\phi_F|)}$$

$$= \frac{1}{0.69 \times 10^{-6}} \times \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 11.8 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 10^{15} \times 0.579} = 0.02\text{V}$$

$$\frac{qD_I}{C_{ox}} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 4 \times 10^{12}}{0.69 \times 10^{-6}} = 0.928\text{V}$$

$$V_{Tn} = 0.02 + 0.579 - 0.85 + 0.928 = 0.677\text{V}$$

2018-9-5

第6章 MOSFET的电气特性

9



## § 6.1 MOS物理学

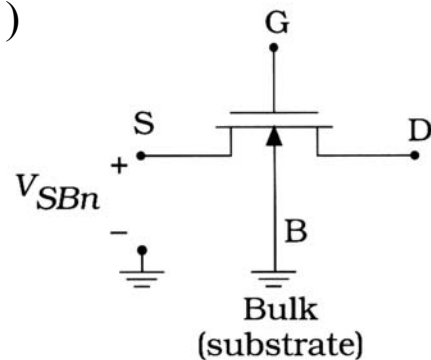
### § 6.2.2 体偏置效应

当源和体（衬底）之间存在  $V_{SBn} > 0$  时

$$V_{Tn} = V_{T0n} + \gamma(\sqrt{2|\phi_F| + V_{SBn}} - \sqrt{2|\phi_F|})$$

体偏置系数：  $\gamma = \frac{\sqrt{2q\epsilon_{Si}N_a}}{C_{ox}}$ ，单位  $\sqrt{\text{V}}$

体偏置效应使阈值电压增大！



**Figure 6.15** Bulk electrode and body-bias voltage

2018-9-5

第6章 MOSFET的电气特性

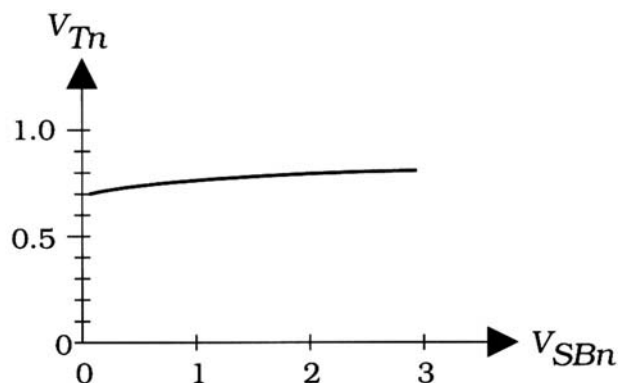
10

## § 6.1 MOS物理学

例6.3, 有一个nFET, 它的 $V_{T0n} = 0.70\text{V}$ ,  $\gamma = 0.08\text{V}^{1/2}$ ,  $2|\phi_F| = 0.58\text{V}$ 。  
 阈值电压与体偏置电压 $V_{SBn}$ 的关系为

$$V_{Tn} = 0.70 + 0.08(\sqrt{0.58 + V_{SBn}} - \sqrt{0.58})$$

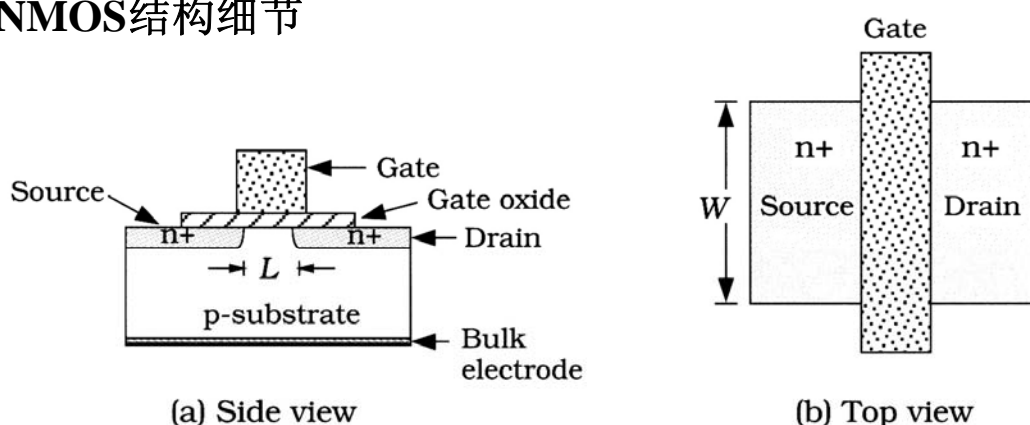
$V_{SBn}(\text{V})$	$V_{Tn}(\text{V})$
0	0.70
1	0.74
2	0.77
3	0.79



**Figure 6.16** Body-bias effect

## § 6.2 nFET电流—电压方程

### NMOS结构细节



**Figure 6.8** Details of the nFET structure

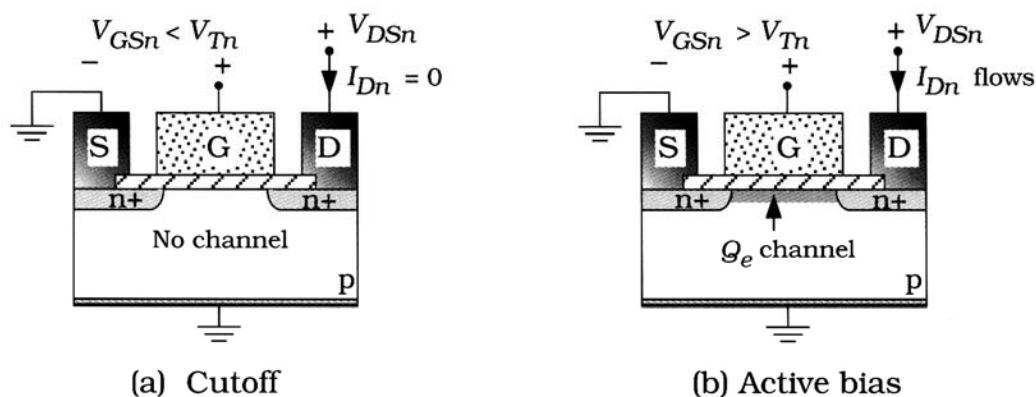
注: 本章讨论中所用的 $W$ 和 $L$ 值是从电气上考虑的尺寸即“有效”值, 不是版图设计时所画的尺寸。

$$L = L' - \Delta L \quad W = W' - \Delta W$$

## § 6.2 nFET电流—电压方程



### NMOS电流—电压方程



**Figure 6.10** Controlling the channel in an nFET

## § 6.2 nFET电流—电压方程



### NMOS电流—电压方程

截止区:  $V_{GSn} < V_{Tn} \quad I_{Dn} = 0$

非饱和区 (线性区):  $V_{GSn} - V_{Tn} > V_{DSn} > 0$

$$I_{Dn} = \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \left[ (V_{GSn} - V_{Tn}) V_{DSn} - \frac{V_{DSn}^2}{2} \right] = \frac{\beta_n}{2} [2(V_{GSn} - V_{Tn}) V_{DSn} - V_{DSn}^2]$$

饱和区:  $V_{DSn} > V_{GSn} - V_{Tn} > 0$

$$I_{Dn} = \frac{1}{2} \mu_n C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) (V_{GSn} - V_{Tn})^2 = \frac{\beta_n}{2} (V_{GSn} - V_{Tn})^2$$

器件互导:  $\beta_n = k_n' \left( \frac{W}{L} \right)$       工艺互导:  $k_n' = \mu_n C_{ox} = \frac{\mu_n \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$





## § 6.2 nFET电流—电压方程

**例6.1:** 一个nFET, 其栅氧层厚度为  $t_{ox} = 12\text{nm}$ ,  
电子迁移率为  $\mu_n = 540\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$

每 $\text{cm}^2$ 的氧化层电容为

$$C_{ox} = \frac{3.9\epsilon_0}{t_{ox}} = \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14}}{1.2 \times 10^{-6}} = 2.88 \times 10^{-7} \text{F/cm}^2$$

工艺互导为

$$k'_n = \mu_n C_{ox} = 540 \times 2.88 \times 10^{-7} = 1.55 \times 10^{-4} \text{A/V}^2 = 155 \mu\text{A/V}^2$$

若氧化层厚度为  $t_{ox} = 8\text{nm}$ ,

则工艺互导为  $k'_n = 233 \mu\text{A/V}^2$ , 说明器件更加灵敏。



## § 6.2 nFET电流—电压方程

**例6.2:** 一个具有下列特性的n沟道MOSFET:

$$t_{ox} = 10\text{nm}, \mu_n = 520\text{cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s}), (W/L) = 8, V_{Tn} = 0.7\text{V},$$

氧化层电容

$$C_{ox} = \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} = \frac{3.9 \times 8.854 \times 10^{-14}}{10 \times 10^{-7}} = 3.453 \times 10^{-7} \text{F/cm}^2$$

工艺互导为

$$k'_n = \mu_n C_{ox} = 520 \times 3.453 \times 10^{-7} = 1.8 \times 10^{-4} \text{A/V}^2 = 180 \mu\text{A/V}^2$$

$$\text{器件互导为 } \beta_n = k'_n \left(\frac{W}{L}\right) = 180 \mu\text{A} \times 8 = 1.44 \text{mA/V}^2$$





## § 6.2 nFET电流—电压方程

若nFET的电压  $V_{GSn} = 2V, V_{DSn} = 2V,$

$$V_{GSn} - V_{Tn} = 2 - 0.7 = 1.3V < V_{DSn} = 2V$$

nFET饱和, 所以

$$I_{Dn} = \frac{\beta_n}{2} (V_{GSn} - V_{Tn})^2 = \frac{1.44}{2} (2 - 0.7)^2 = 1.217mA$$

若nFET的电压  $V_{GSn} = 2V, V_{DSn} = 1.2V,$

$$V_{GSn} - V_{Tn} = 2 - 0.7 = 1.3V > V_{DSn} = 1.2V$$

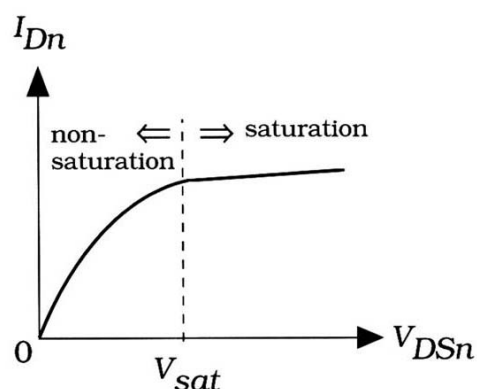
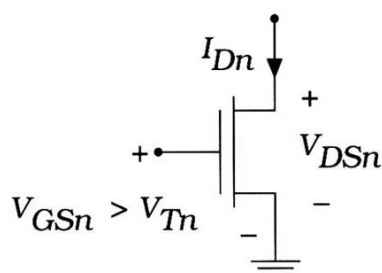
nFET非饱和, 所以

$$\begin{aligned} I_{Dn} &= \frac{\beta_n}{2} [2(V_{GSn} - V_{Tn})V_{DSn} - V_{DSn}^2] \\ &= \frac{1.44}{2} (2 \times 1.3 \times 1.2 - 1.2^2) = 1.210mA \end{aligned}$$



## § 6.2 nFET电流—电压方程

### ❖ 沟道长度调制效应



$$I_{Dn} \approx \frac{\beta_n}{2} (V_{GSn} - V_{Tn})^2 [1 + \lambda(V_{DSn} - V_{sat})]$$

$\lambda$ : 沟道长度调制参数

饱和电压:  $V_{sat} = V_{DSn} |_{\text{peak current}} = V_{GSn} - V_{Tn}$

## § 6.2 nFET 电流—电压方程

### § 6.2.1 SPICE Level 1 方程

$V_{GSn} < V_{Tn}$  时:

$$I_{Dn} = 0$$

$V_{DSn} \leq V_{sat}$  时:

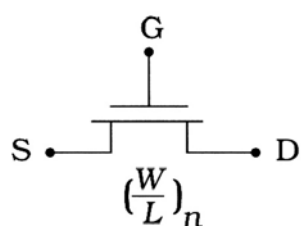
$$I_{Dn} = \frac{\beta_n}{2} [2(V_{GSn} - V_{Tn})V_{DSn} - V_{DSn}^2] (1 + \lambda V_{DSn})$$

$V_{DSn} \geq V_{sat}$  时:

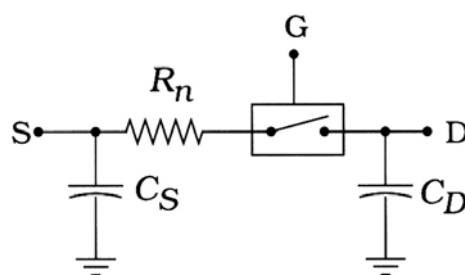
$$I_{Dn} = \frac{\beta_n}{2} (V_{GSn} - V_{Tn})^2 (1 + \lambda V_{DSn})$$

## § 6.3 FET 的 RC 模型

### NMOS 的线性模型



(a) nFET Symbol



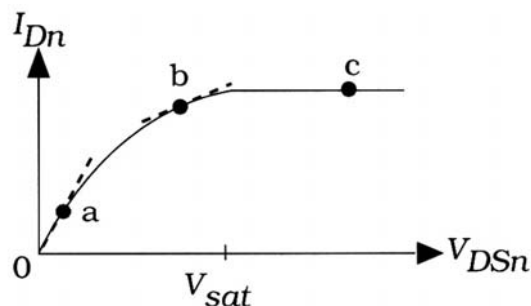
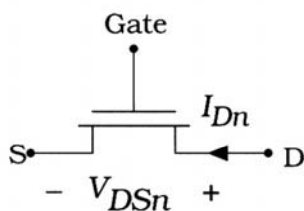
(b) Linear model for nFET

**Figure 6.19** RC model of an nFET

## § 6.3 FET的RC模型



### § 6.3.1 漏源FET电阻



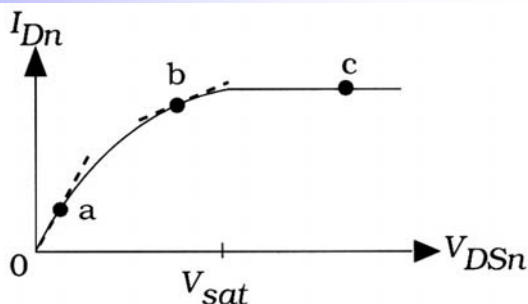
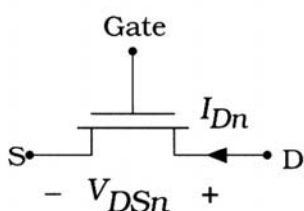
**Figure 6.20** Determining the nFET resistance.

**a点:** 
$$I_{Dn} = \frac{\beta_n}{2} [2(V_{GSn} - V_{Tn})V_{DSn} - V_{DSn}^2]$$

当  $V_{DSn} \ll 2(V_{GSn} - V_{Tn})$  时: 
$$I_{Dn} \approx \beta_n (V_{GSn} - V_{Tn})V_{DSn}$$

$$R_n = \frac{V_{DSn}}{I_{Dn}} = \frac{1}{\beta_n (V_{GSn} - V_{Tn})}$$

## § 6.3 FET的RC模型



**Figure 6.20** Determining the nFET resistance.

**b点:** 
$$I_{Dn} = \frac{\beta_n}{2} [2(V_{GSn} - V_{Tn})V_{DSn} - V_{DSn}^2]$$

$$R_n = \frac{V_{DSn}}{I_{Dn}} = \frac{2}{\beta_n [2(V_{GSn} - V_{Tn}) - V_{DSn}]}$$

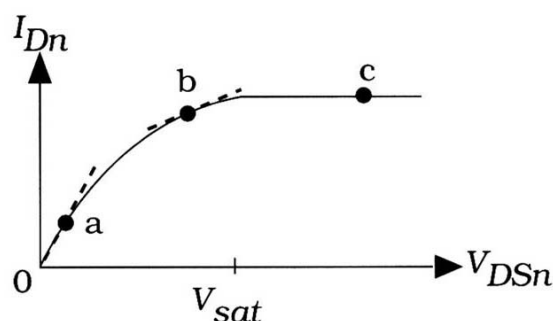
**c点:** 
$$I_{Dn} = \frac{\beta_n}{2} (V_{GSn} - V_{Tn})^2 \quad R_n = \frac{V_{DSn}}{I_{Dn}} = \frac{2V_{DSn}}{\beta_n (V_{GSn} - V_{Tn})^2}$$

## § 6.3 FET的RC模型

**a点:**  $R_n = \frac{V_{DSn}}{I_{Dn}} = \frac{1}{\beta_n (V_{GSn} - V_{Tn})}$

**b点:**  $R_n = \frac{V_{DSn}}{I_{Dn}} = \frac{2}{\beta_n [2(V_{GSn} - V_{Tn}) - V_{DSn}]}$

**c点:**  $R_n = \frac{V_{DSn}}{I_{Dn}} = \frac{2V_{DSn}}{\beta_n (V_{GSn} - V_{Tn})^2}$



简单公式：把电阻模拟成与晶体管宽长比有关的函数

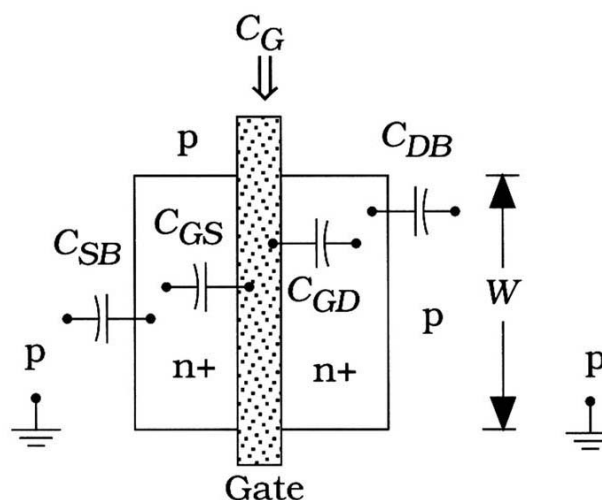
$$R_n = \frac{\eta}{\beta_n (V_{DD} - V_{Tn})}, \text{ 因子 } \eta = 1 \sim 6$$

简化公式，选择  $\eta = 1$ :  $R_n = \frac{1}{\beta_n (V_{DD} - V_{Tn})}$

## § 6.3 FET的RC模型

### § 6.3.2 FET电容

FET电容顶视图



•MOS电容:  $C_G, C_{GS}, C_{GD}$

•结电容:  $C_{DB}, C_{SB}$

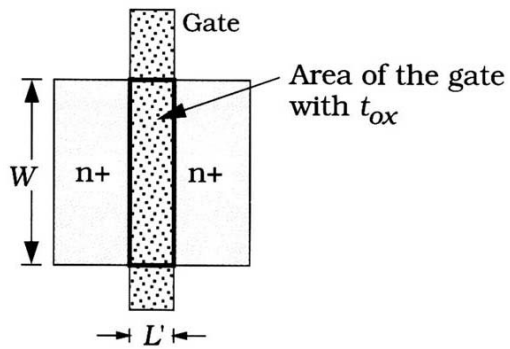
## § 6.3 FET的RC模型



### 1 MOS电容

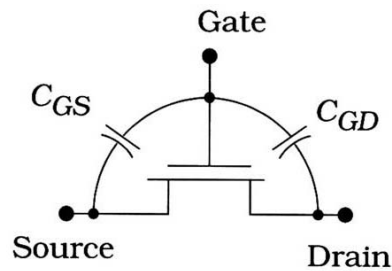
栅极电容:

$$C_G = C_{ox}WL'$$



栅源电容和栅漏电容:

$$C_{GD} \approx C_{GS} \approx \frac{1}{2}C_G$$



2018-9-5

第6章 MOSFET的电气特性

25

## § 6.3 FET的RC模型



### 2 结电容

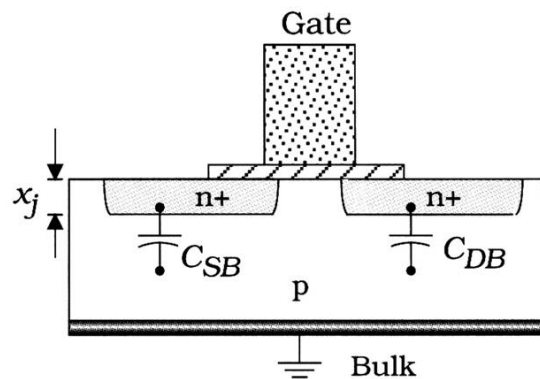
PN结零偏电容 $C_0$

$$C_0 = C_j A_{pn}$$

$C_j$ : 单位面积零偏电容,

单位:  $F/cm^2$

$A_{pn}$ : PN结面积



**Figure 6.23** Junction capacitances in a MOSFET

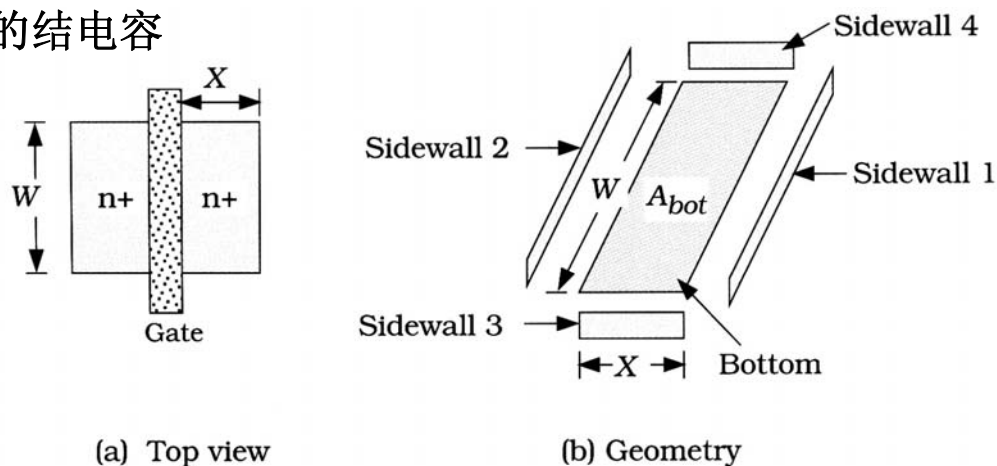
2018-9-5

第6章 MOSFET的电气特性

26

## § 6.3 FET的RC模型

### FET的结电容



**Figure 6.25** Calculation of the FET junction capacitance

底部电容  $C_{bot}$       底部面积:  $A_{bot} = XW$   
 底部电容:  $C_{bot} = C_j A_{bot} = C_j XW$

## § 6.3 FET的RC模型

### FET的结电容

#### 侧壁电容 $C_{sw}$

侧壁面积:

$$A_{sw} = 2(W \times x_j) + 2(X \times x_j)$$

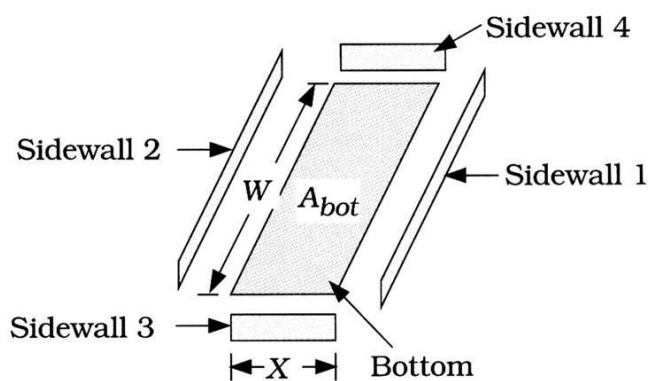
$$= x_j \times 2(W + X) = x_j P_{sw}$$

底部周长:  $P_{sw} = 2(W + X)$

侧壁电容:  $C_{sw} = C_j A_{sw} = C_j x_j P_{sw} = C_{jsw} P_{sw}$

$C_{jsw}$ : 单位周长侧壁电容  $C_{jsw} = C_j x_j$

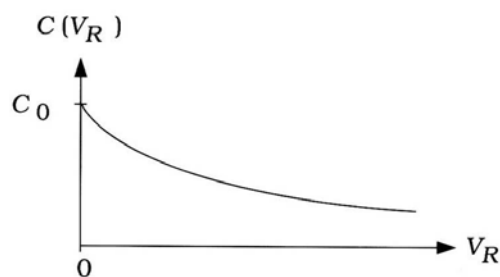
n+区的总零偏电容:  $C_n = C_{bot} + C_{sw} = C_j A_{bot} + C_{jsw} P_{sw}$



## § 6.3 FET的RC模型

PN结加反偏压 $V_R$ : 
$$C = \frac{C_0}{\left(1 + \frac{V_R}{\phi_0}\right)^{m_j}}$$

$\phi_0$ 是结的内建电势: 
$$\phi_0 = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$



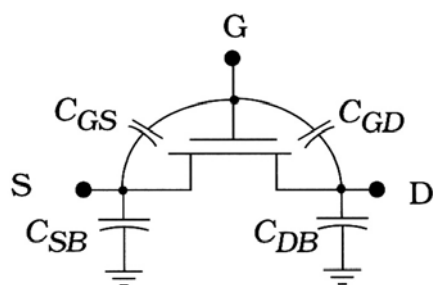
$m_j$ 是结的台阶系数: 突变结 $m_j = 1/2$ ; 线性渐变结 $m_j = 1/3$

n+区的总反偏电容: 
$$C_n = \frac{C_j A_{bot}}{\left(1 + \frac{V_R}{\phi_0}\right)^{m_j}} + \frac{C_{jsw} P_{sw}}{\left(1 + \frac{V_R}{\phi_{0sw}}\right)^{m_{jsw}}}$$

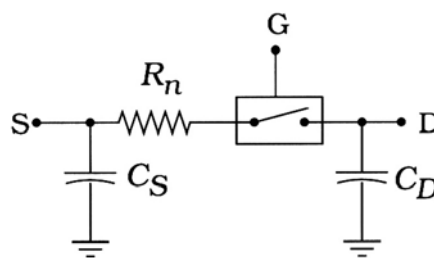
$m_{jsw}$ 和 $\phi_{0sw}$ 是侧壁参数

## § 6.3 FET的RC模型

### § 6.3.3 模型建立



(a) nFET



(b) Linear model for nFET

**Figure 6.27** Final construction of the nFET RC model

NMOS线性模型:

$$R_n = \frac{1}{\beta_n (V_{DD} - V_{Tn})}$$

$$C_S = C_{GS} + C_{SB}$$

$$C_D = C_{GD} + C_{DB}$$



## § 6.3 FET的RC模型



例6.6: 为图6.28中的nFET建立开关模型, 单位用微米 ( $\mu\text{m}$ ) 表示。设电源电压  $V_{DD} = 3.3\text{V}$

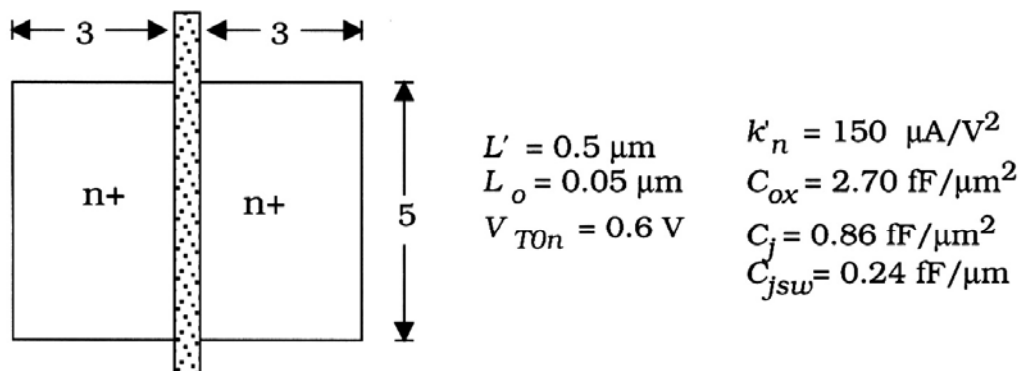
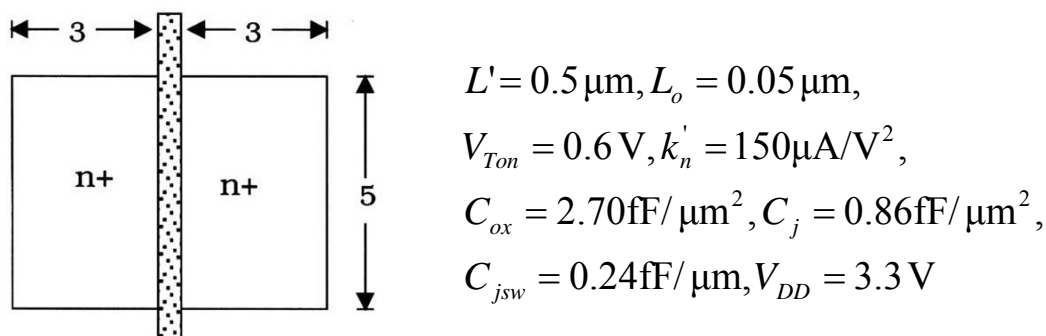


Figure 6.28 FET geometry for modeling example

## § 6.3 FET的RC模型



沟道电阻为: 
$$R_n = \frac{1}{\frac{5}{0.4} \times 150 \times 10^{-6} \times (3.3 - 0.6)} = 197.5 \Omega$$

栅电容为: 
$$C_G = 2.7 \times 5 \times 0.5 = 6.75 \text{fF} \quad \therefore C_{GS} = C_{GD} = \frac{1}{2} C_G = 3.375 \text{fF}$$

源或漏的结电容为:

$$C_n = C_j A_{bot} + C_{jsw} P_{sw} = 0.86 \times 5 \times 3.05 + 0.24 \times 2 \times (5 + 3.05) = 16.98 \text{fF}$$

最终源和漏电容为: 
$$C_D = C_S = 16.98 + 3.375 = 20.36 \text{fF}$$



## § 6.4 pFET特性

### PMOS电流—电压方程

截止区:  $V_{SGp} < |V_{Tp}| \quad I_{Dp} = 0$

非饱和区 (线性区):  $V_{SGp} - |V_{Tp}| > V_{SDp} > 0$

$$I_{Dp} = \mu_p C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) \left[ (V_{SGp} - |V_{Tp}|) V_{SDp} - \frac{V_{SDp}^2}{2} \right] = \frac{\beta_p}{2} [2(V_{SGp} - |V_{Tp}|) V_{SDp} - V_{SDp}^2]$$

饱和区:  $V_{SDp} > V_{SGp} - |V_{Tp}| > 0$

$$I_{Dp} = \frac{1}{2} \mu_p C_{ox} \left( \frac{W}{L} \right) (V_{SGp} - |V_{Tp}|)^2 = \frac{\beta_p}{2} (V_{SGp} - |V_{Tp}|)^2$$

器件互导:  $\beta_p = k'_p \left( \frac{W}{L} \right)$     工艺互导:  $k'_p = \mu_p C_{ox} = \frac{\mu_p \epsilon_{ox}}{t_{ox}}$



## § 6.4 pFET特性

### PMOS的RC模型

沟道电阻  $R_p = \frac{1}{\beta_p (V_{DD} - |V_{Tp}|)}$

电容    栅极电容     $C_{Gp} = C_{ox} W L'$

栅源和栅漏电容     $C_{GS} \approx C_{GD} \approx \frac{1}{2} C_{Gp}$

结电容     $C_p = C_j A_{bot} + C_{jsw} P_{sw}$



## § 6.5 小尺寸MOSFET模型

### § 6.5.1 尺寸缩小原理

#### 1 恒定电场缩小 (CE: constant electrical field)

尺寸和电压按同一比例缩小 (全比例缩小): 尺寸缩小 $S(S>1)$ 倍, 电压减小 $S$ 倍——理想模型

#### 2 恒定电压缩小 (CV: constant voltage)

仅尺寸缩小 $S$ 倍, 电压保持不变——最普遍的模式

#### 3 准恒压缩小 (QCV: quasi-constant voltage)

尺寸和电压按不同比例缩小: 尺寸缩小 $S$ 倍, 电压减小 $U(S>U>1)$ 倍——最实用的模型



## § 6.5 小尺寸MOSFET模型

各种尺寸缩小原理的比较

参数	CE	CV	QCV
器件最小尺寸	$1/S$	$1/S$	$1/S$
电压	$1/S$	1	$1/\sqrt{S}$
电场强度	1	$S$	$\sqrt{S}$
器件面积	$1/S^2$	$1/S^2$	$1/S^2$
$C_{ox}$	$S$	$S$	$S$
栅电容	$1/S$	$1/S$	$1/S$
工艺互导	$S$	$S$	$S$
电流	$1/S$	$S$	1
电流密度	$S$	$S^3$	$S^2$
器件导通电阻	1	$1/S$	$1/\sqrt{S}$
门延时	$1/S$	$1/S^2$	$1/S^{3/2}$
功率	$1/S^2$	$S$	$1/\sqrt{S}$
功率密度	1	$S^3$	$S^{3/2}$
功率-延时积	$1/S^3$	$1/S$	$1/S^2$



## § 6.5 小尺寸MOSFET模型

### § 6.5.2 小尺寸器件效应

#### 1 短沟道效应 (SCE: Short-Channel Effect)

阈值电压随着沟道长度 $L$ 的缩小而减小。

$$V_T = V_{T,long} - (\Delta V_T)_{SCE}$$

#### 2 窄沟道效应 (NWE: Narrow-Width Effect)

阈值电压随着沟道宽度 $W$ 的缩小而增加。

$$V_T = V_{T,long} + (\Delta V_T)_{NWE}$$

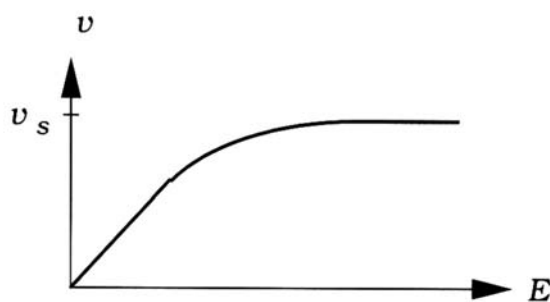


## § 6.5 小尺寸MOSFET模型

#### 3 速度饱和效应

随着电场强度的增加，载流子的漂移速度最终达到饱和。

$$E = \frac{V_{DS}}{L} \quad v = \mu E$$



**Figure 6.35** Velocity-field relation for charged particles in silicon

室温下硅中电子的饱和速度:  $v_s = 10^7$  cm/s