

# 场效应器件物理

---

## 第12章 MOSFET进阶

# 12.1 非理想效应

---

本节内容

- **MOSFET亚阈特性**
- **沟道长度调制效应**
- **迁移率变化**
- **速度饱和**
- **弹道运输**

# 12.1 非理想效应

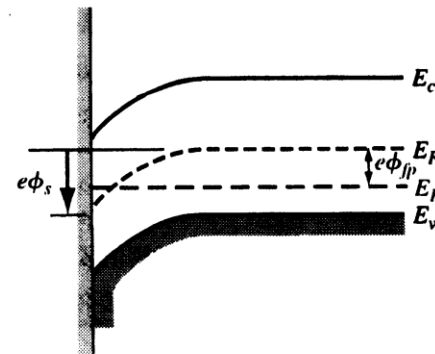
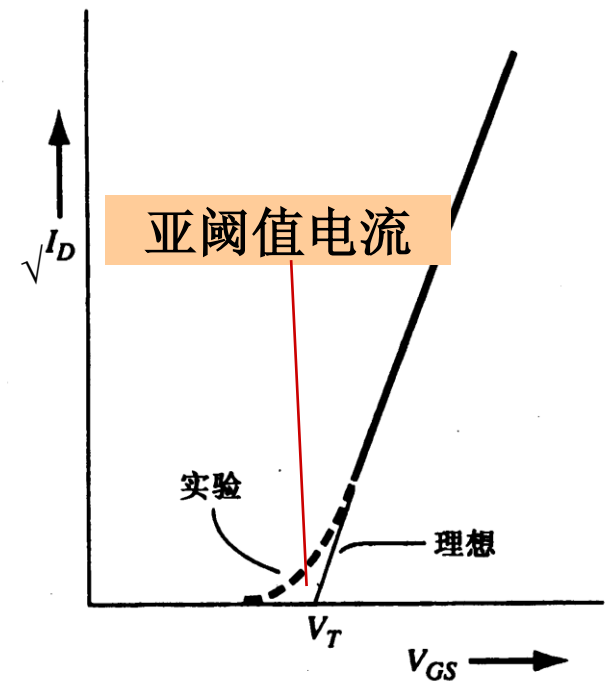
## 亚阈值电流: 定义

$$V_{GS} \leq V_T$$

- ◆ 理想MOSFET:  $I_D=0$
- ◆ 实际MOSFET: 存在亚阈值电流  $I_{Dsub}$
- 亚阈区,  $V_{GS}$  稍小于  $V_T$ ,
  - ◆ 表面势:

$$\phi_{fp} \leq \phi_s \leq 2\phi_{fp}$$

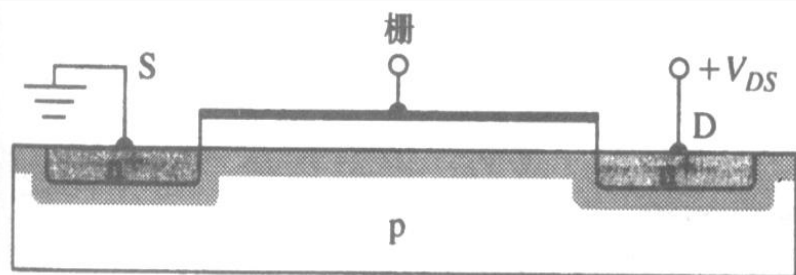
- ◆ 半导体表面处于弱反型区
- ◆ 弱反型沟道, 形成亚阈值电流  $I_{Dsub}$
- $I_{Dsub}$  形成机制?



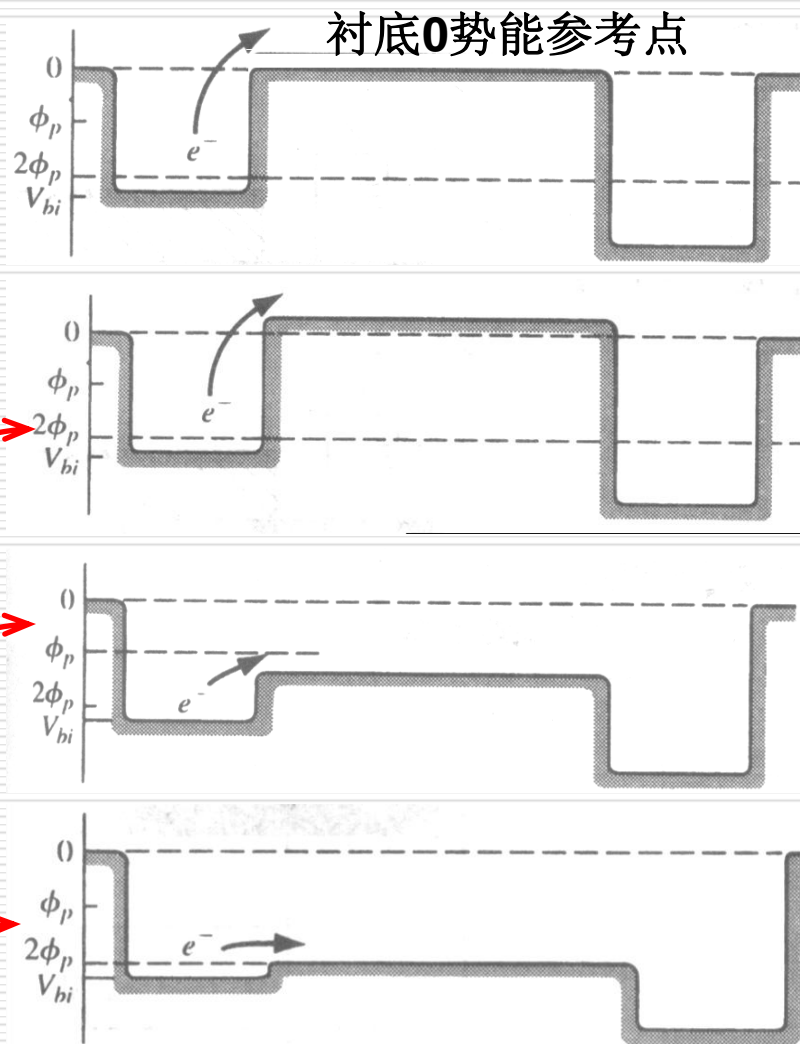
# 12.1 非理想效应

## 亚阈值电流: 形成机制

n沟道MOSFET



- ❑ 堆积状态: 势垒很高 → 电子无法跃过 → 无法形成表面电流
- ❑ 弱反型状态: 势垒较低 → 电子有一定几率越过势垒 → 形成亚阈值电流
- ❑ 强反型状态: 势垒极低 → 大量电子越过势垒 → 形成沟道电流



# 12.1 非理想效应

## 亚阈值电流: 电压特性

- 亚阈值电流表达式:

$$I_{D(\text{sub})} \propto \left[ \exp\left(\frac{eV_{GS}}{kT}\right) \right] \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-eV_{DS}}{kT}\right) \right]$$

- ◆  $I_D$  与  $V_{GS}$  有关, 且随  $V_{GS}$  指数增加,

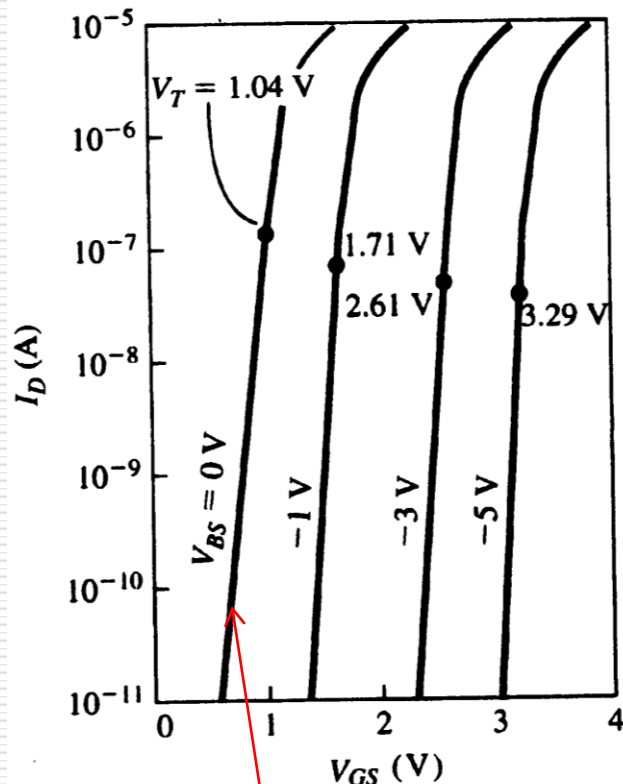
当  $V_{GS}$  改变 60mV,  $I_{D(\text{sub})}$  改变一个数量级

- ◆ 若  $V_{DS} > 4 (kT/e)$ , 最后括号部分将近似等于 1

$I_{D\text{sub}}$  近似与  $V_{DS}$  无关

- **思考:** 随着  $V_{GS}$  增加, 曲线斜率变化原因?

- **思考:**  $V_{DS}$  为某一常数时, 随着  $V_{GS}$  增加, 器件先进入哪个工作区?

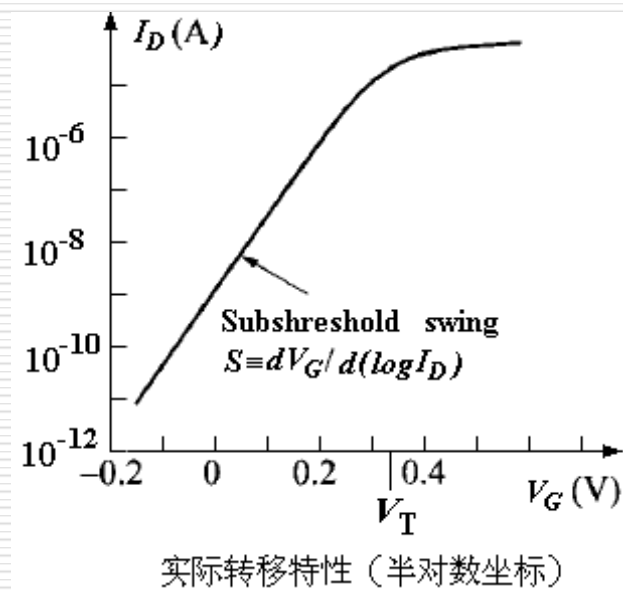


半对数坐标中亚阈值电流与  $V_{GS}$  之间呈现直线

# 12.1 非理想效应

## 亚阈值电流：亚阈值摆幅

- 亚阈值摆幅S (Subthreshold swing)：漏电流减小一个数量级所需的栅压变化量， $S=dV_{GS}/d(\lg I_{Dsub})$
- S也是半对数亚阈特性曲线斜率的倒数
- S小好？大好？
- ◆ S越小)  $V_{GS}$  的降低能快速关断器件
- ◆ S是量化MOS管如何随栅压快速关断的参数
- 亚阈值摆幅S影响因素
- ◆  $S \propto (C_{ox} + C_{dep} + C_{it}) / C_{ox}$ ；  $C_{it}$ : 界面陷阱电容
- ◆ 减薄栅氧厚度 ( $C_{ox}$  增大)、降低衬底掺杂 ( $C_{dep}$  减小)、减小表面陷阱密度 ( $C_{it}$  减小)



# 12.1 非理想效应 亚阈值电流对器件的影响

## □ 开关特性变差:

- ◆ 由于存在亚阈电流 $I_{Dsub}$ ,  $V_{GS}$ 略低于 $V_T$ 时关态电流 $I_{off}$ 不为0,
- ◆  $I_{Dsub}$ 变成关态电流的主要组成部分。
- ◆  $I_{Dsub}$ 的存在增大了待机状态的静态功耗。

## □ $V_T$ 不能很小, 否则 $V_{GS}=0$ 时的 $I_{off}$ ( $I_{Dsub}$ ) 会增大, 静态功耗增加

## □ 减小 $I_{Dsub}$ 影响的措施

- ◆ 增大 $C_{OX}$ , 减小亚阈值摆幅, 使器件可以快速关断
- ◆ 提高关断/待机状态下器件的阈值电压 $V_T$ :

通过衬底和源之间加反偏, 使 $V_T$ 增加, 从而使 $V_{GS} (=0) \ll V_T$

# 12.1 非理想效应

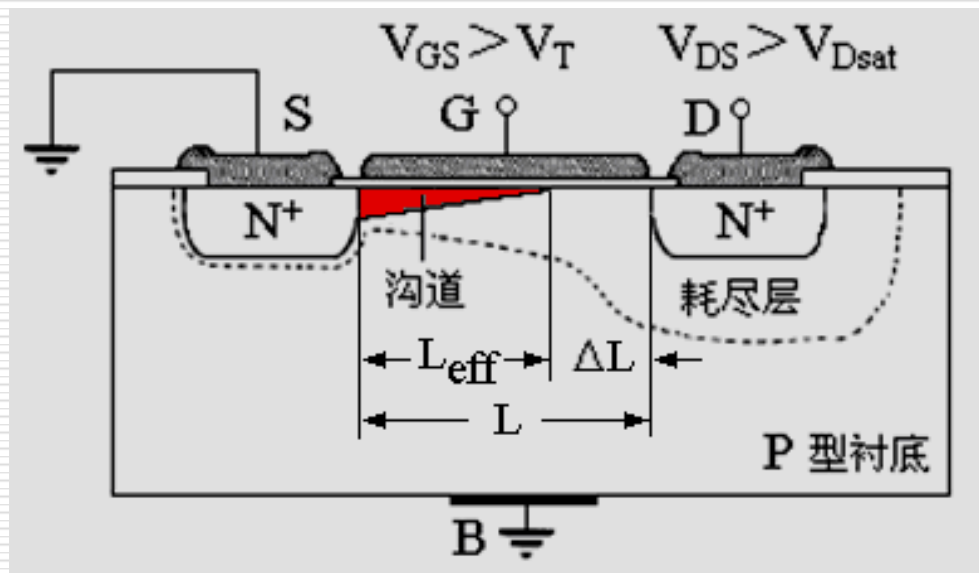
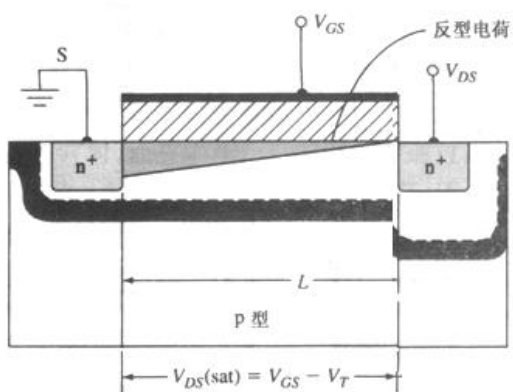
## 亚阈值电流的应用

- 亚域区的利用：
  - ◆  $V_{GS}$  比  $V_T$  小，存在  $I_{dsub}$ ，可认为器件导通
  - ◆ 亚域区内栅压变， $I_{dsub}$  变，可实现放大
  - ◆ 与正常放大相比， $I_D$  小，功耗小。
  - ◆ 低压低功耗电路中可以使器件工作在亚阈区。
- 利用亚阈特性进行微弱信号放大的应用研究正得到越来越大的重视



# 12.1 非理想效应

## 沟道长度调制效应:机理



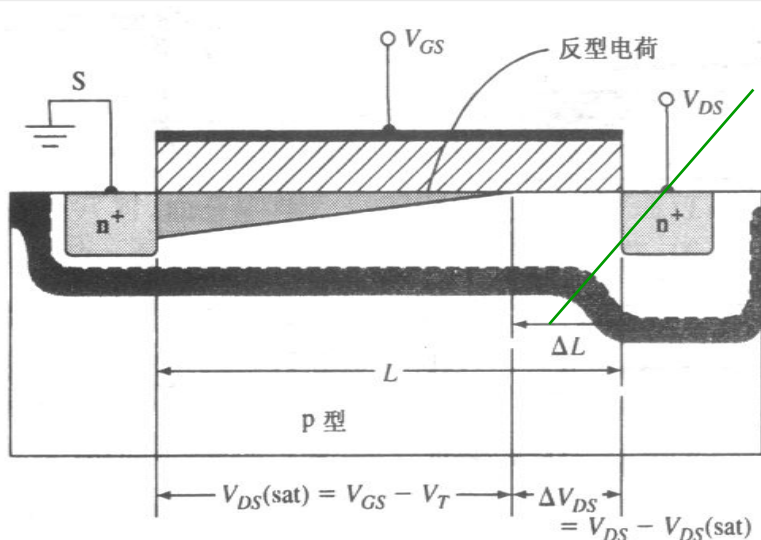
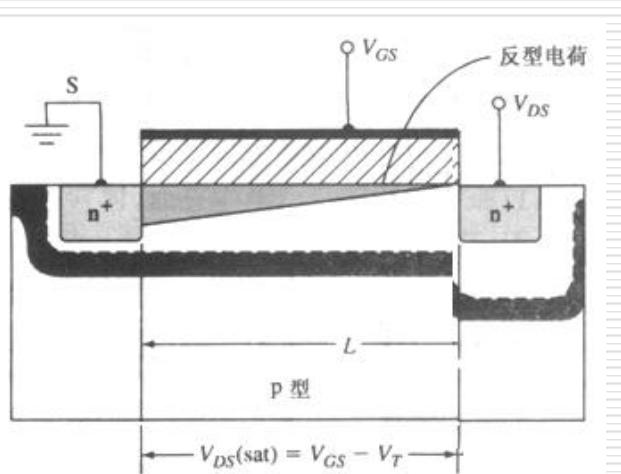
饱和区:  $V_{DS} \uparrow \Rightarrow \Delta V_{DS} (=V_{DS} - V_{DS(sat)}) \uparrow \Rightarrow \Delta L \uparrow \Rightarrow$  有效沟长  $L' = (L - \Delta L) \downarrow$

- 理想长沟:  $L' \approx L$ , 导电沟道区的等效电阻近似不变, 饱和区电流饱和
- 实际器件(短沟):  $L' < L$ , 导电沟道区的等效电阻减小,  $I_D$ 增加,

——沟道长度调制效应  $I_D \propto \frac{1}{L} \Rightarrow$  漏源电流  $I_D' = \left( \frac{L}{L - \Delta L} \right) I_D > I_D$

# 12.1 非理想效应

## 沟道长度调制效应:模型1



漏-衬pn结空间电荷区的扩展

n<sup>+</sup>p结内建电势差的近似值

沟道夹断时漏-衬结空间电荷区宽度  $x_{p1} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_a}(\phi_{fp} + V_{DS(sat)})}$  (结反偏压  $\phi_{fp} + V_{DS(sat)}$ )

沟道夹断后漏-衬结空间电荷区宽度  $x_{p2} \approx \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_a}(\phi_{fp} + V_{DS(sat)} + \Delta V_{DS})}$  (结反偏压  $\phi_{fp} + V_{DS(sat)} + \Delta V_{DS}$ )

夹断区长度  $\Delta L = x_{p2} - x_{p1} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_a}[\sqrt{\phi_{fp} + V_{DS(sat)} + \Delta V_{DS}} - \sqrt{\phi_{fp} + V_{DS(sat)}}]}$

$$\text{漏源电流 } I_D' = \left( \frac{L}{L - \Delta L} \right) I_D$$

# 12.1 非理想效应

## 沟道长度调制效应:模型2

夹断区横向电场满足的一维泊松方程  $\frac{dE}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$

夹断区的电荷密度  $\rho(x) = -eN_a$  (与空间坐标无关)

夹断区内  $x$  点的电场强度  $E(x) = \int_0^x \frac{\rho}{\epsilon_s} dx = -\frac{eN_a x}{\epsilon_s} - E_{sat}$  (边界条件  $E|_{x=0} = E_{sat}$ )

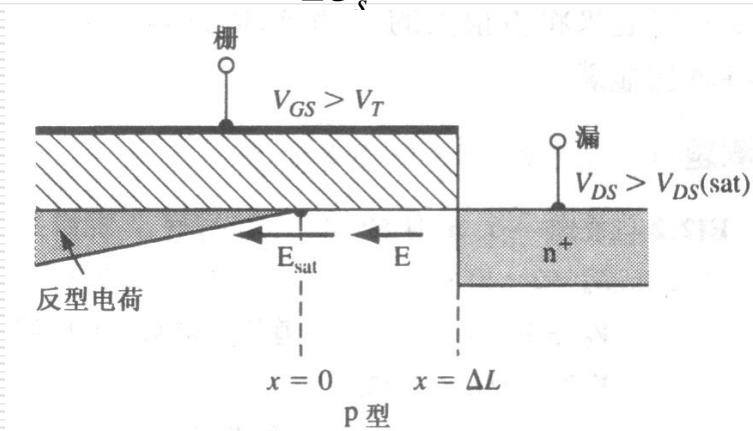
夹断区内  $x$  点的电势  $\phi(x) = -\int E(x) dx = \frac{eN_a x^2}{2\epsilon_s} + E_{sat} x + C1$

夹断区两端的电势差  $\Delta V_{DS} = \int_0^{\Delta L} E(x) dx = \phi(\Delta L) - \phi(0) = \frac{eN_a \Delta L^2}{2\epsilon_s} + E_{sat} \Delta L$

夹断区长度

$$\Delta L = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_a} [\sqrt{\phi_{sat} + (V_{DS} - V_{DS(sat)})} - \sqrt{\phi_{sat}}]}$$

其中  $\phi_{sat} = \frac{2\epsilon_s}{eN_a} \left( \frac{E_{sat}}{2} \right)^2$



2015-6-15

漏源电流  $I_D' = \left( \frac{L}{L - \Delta L} \right) I_D$

# 12.1 非理想效应

## 沟道长度调制效应:模型3

- 考虑沟道长度调制效应的IV常用表达式：电流随着 $V_{DS}$ 的升高而上升

$$I_{D(sat)} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

- 沟道长度调制效应系数： $\lambda = \frac{\Delta L}{LV_{DS}}$

- 不是一个常数，和沟长有关： $\lambda \propto \frac{1}{L}$

- 放大应用时，影响电压放大倍数的参数：饱和区输出电阻

$$R_o = R_{ds} = \frac{1}{\lambda I_{D(sat)}}$$

沟道越短， $\lambda$ 越大， $R_o$ 越小，器件的电压放大倍数下降

# 12.1 非理想效应

## 沟道长度调制效应:影响因素

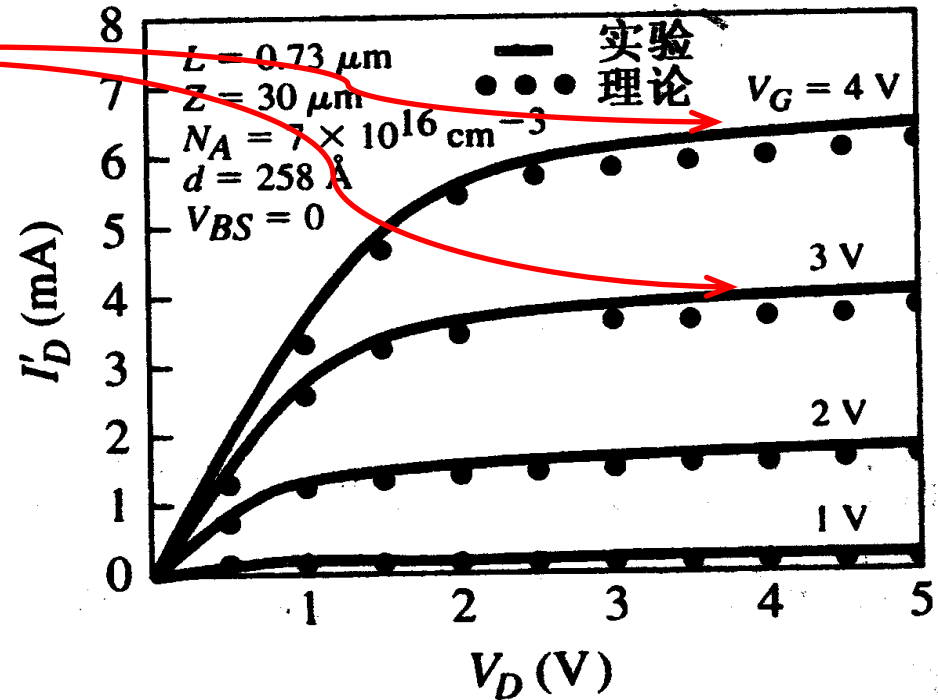
◆ 在饱和区, 实测  $I_D$  随  $V_{DS}$  增加而缓慢增加

◆ 影响因素:  $N_a$ 、 $L$

$$I_{D(sat)} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$\lambda = \frac{\Delta L}{LV_{DS}}$$

$$\Delta L = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_a}} [\sqrt{\phi_{sat} + (V_{DS} - V_{DS(sat)})} - \sqrt{\phi_{sat}}]$$

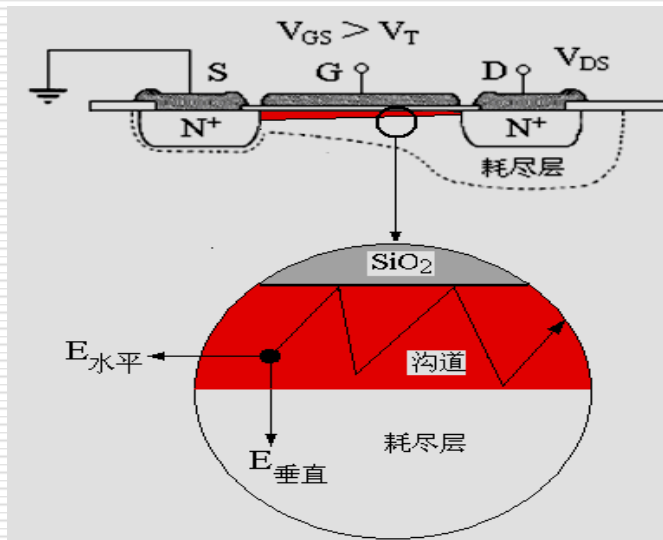


衬底掺杂浓度  $N_a$  越小  $\Rightarrow \Delta L$  的绝对值越大  $\Rightarrow$  沟道长度调制效应越显著

沟道长度  $L$  越小  $\Rightarrow \Delta L$  的相对值越大  $\Rightarrow$  沟道长度调制效应越显著

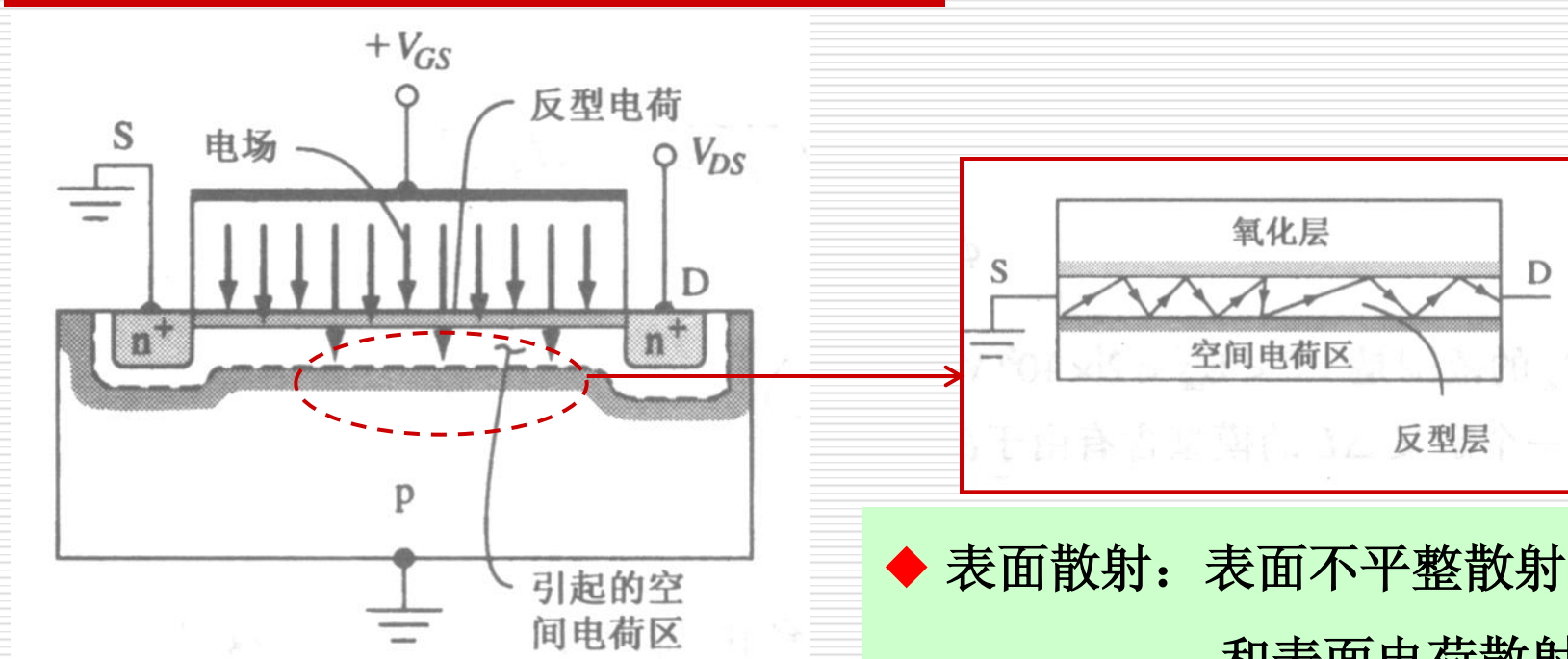
# 12.1 非理想效应 迁移率变化:纵向电场的影响(1)

- MOSFET载流子迁移率不是理想情况下的常数，受沟道内电场的影响



- 沟道中的电场
  - ◆ 由 $V_{DS}$ 形成的沿沟道方向的电场分量
  - ◆ 由 $V_G$ 形成的与沟道垂直方向的电场分量

# 12.1 非理想效应 迁移率变化:纵向电场的影响(1)



◆ 表面散射：表面不平整散射  
和表面电荷散射

$V_{GS} \uparrow \Rightarrow$  沟道内的纵向电场  $\uparrow$   
 $\Rightarrow$  沟道载流子的运动更趋近界面  
 $\Rightarrow$  表面散射  $\uparrow \Rightarrow$  表面迁移率  $\mu_s \downarrow \Rightarrow \mu = f(V_{GS})$

# 12.1 非理想效应 迁移率变化:纵向电场的影响(2)

- 表面迁移率（记为 $\mu_{\text{eff}}$ ）与反型层中垂直方向的电场 $E_{\text{eff}}$ 关系：

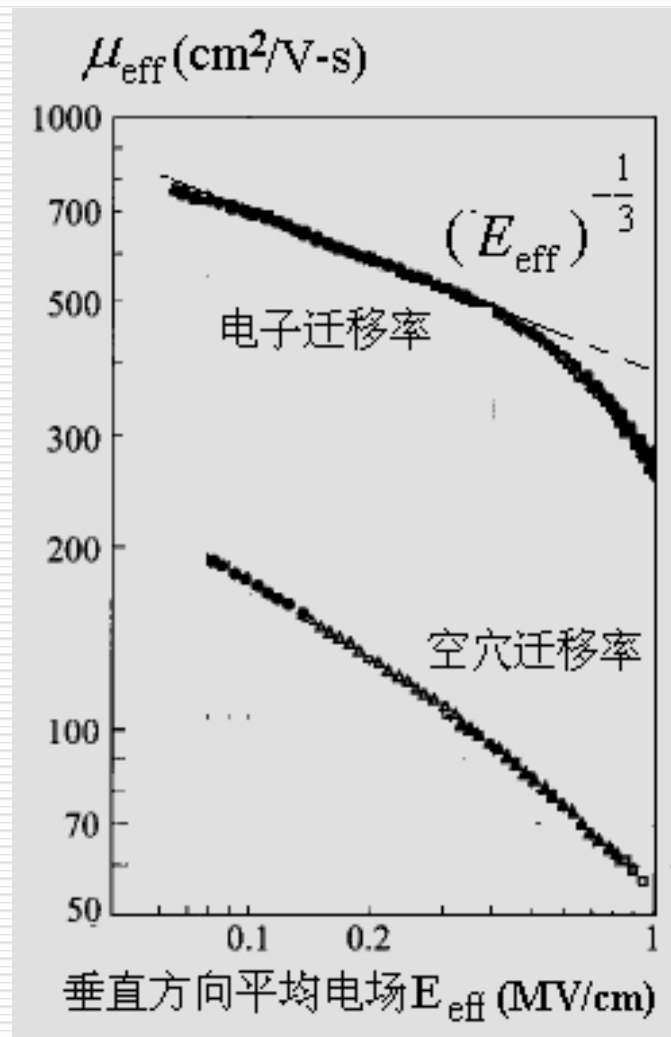
$$\mu_{\text{eff}} = \mu_0 \left( \frac{E_{\text{eff}}}{E_0} \right)^{-1/3}$$

- ◆  $\mu_0$ 和 $E_0$ 为实验曲线的拟合参数
- $\mu_0$ 为低场表面迁移率
- $E_0$ 为迁移率退化时的临界电场
- ◆  $E_{\text{eff}}$ 反型层中所有电子受到的平均电场，与 $t_{\text{ox}}$ 关系不明显，取决于氧化层下方

电荷：

$$E_{\text{eff}} = \frac{1}{\epsilon_s} \left( |Q_{\text{SD}}(\text{max})| + \frac{1}{2} Q_{\text{n}} \right)$$

- $\mu_{\text{eff}}$ 受温度影响大：晶格散射





# 12.1 非理想效应 迁移率变化:纵向电场的影响(3)

## □ 对漏电流、跨导的影响

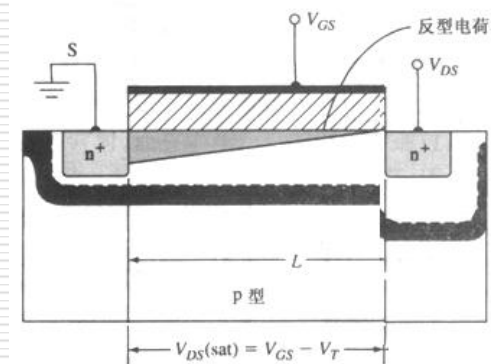
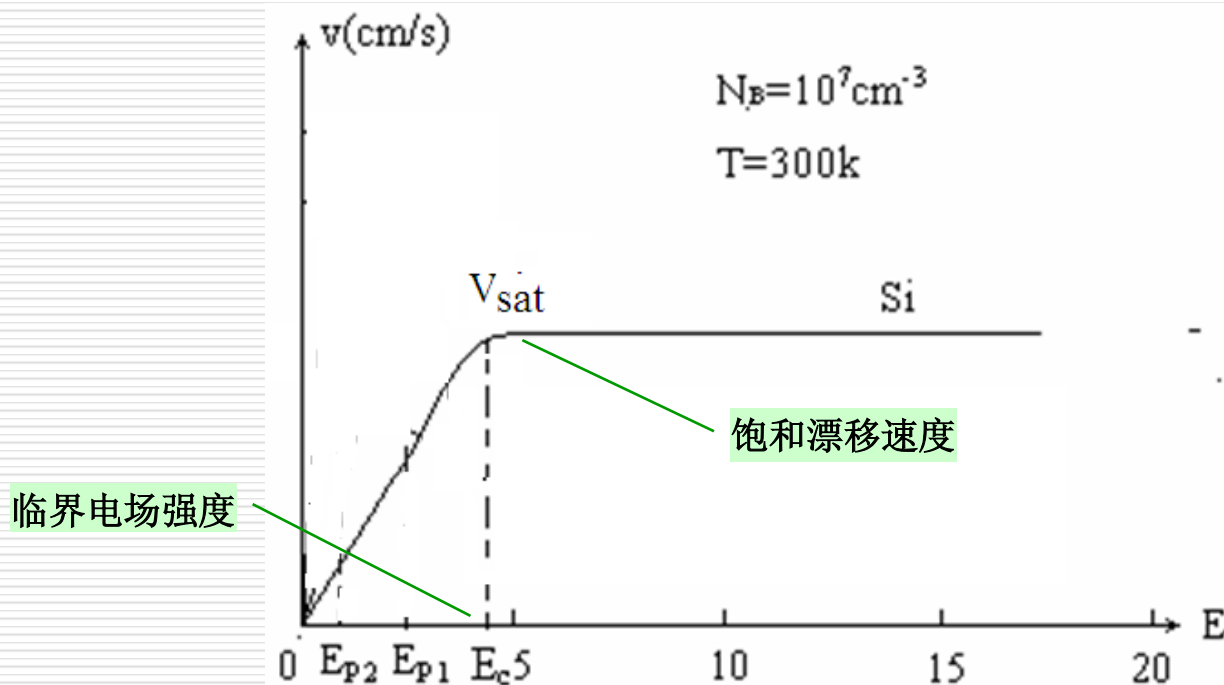
$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$I_{D(sat)} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$g_{mL} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} V_{DS} \quad g_{ms} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{L} (V_{GS} - V_T)$$

- ◆  $V_{GS}$ 增加, 反型层电荷有效迁移率降低, 漏电流、跨导随栅压增加而增加的趋势变缓

# 12.1 非理想效应 迁移率变化: 漂移速度与电场的关系



Si: 载流子速度饱和时

$$E_C = 3 \times 10^4 \text{ V/cm}$$

$$v_{\text{sat}} = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$$

- $E$ 较低时,  $\mu$ 为常数, 半导体载流子漂移速度与沟道方向电场成正比

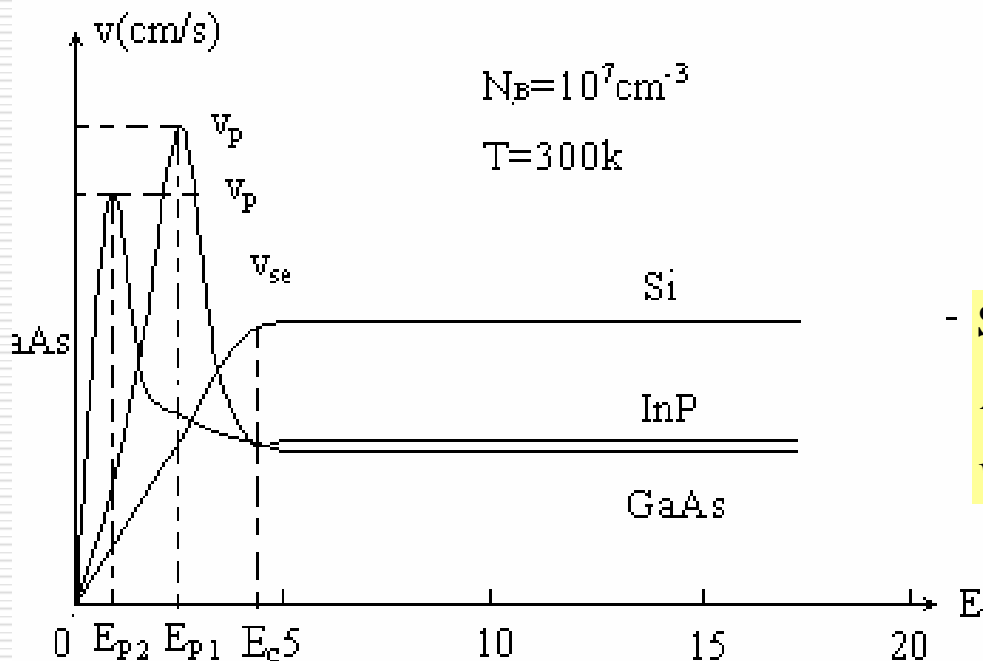
$$v = \mu E$$

- $E$ 较高时, 达到一临界电场 $E_C$ 时, 载流子漂移速度将达到饱和速度

$v_{\text{Sat}}$ , 使载流子的 $\mu$ 下降

$$\mu = v_{\text{sat}} / E$$

# 12.1 非理想效应 迁移率变化: 漂移速度与电场的关系



- Si: 载流子速度饱和时  
 $E_C = 3 \times 10^4 \text{ V/cm}$   
 $v_{\text{sat}} = 1 \times 10^7 \text{ cm/s}$

$E \propto \frac{V_{DS}}{L}$

- 短沟道易饱和 ( $V_{DS} = 3 \text{ V}, L = 1 \mu\text{m}$  时,  $E = 3 \times 10^4 \text{ V/cm}$ )
- 高电压易饱和

# 12.1 非理想效应

## 迁移率变化:Si的情形

有效迁移率（记为 $\mu$ ）常用经验公式：

$$\mu = \frac{\mu_{\text{eff}}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{\text{eff}} E}{v_{\text{Sat}}}\right)^2\right]^{\frac{1}{2}}}$$

载流子速度饱和， $V_{\text{DS}} \uparrow$ ，载流子 $v$ 不变，电流饱和：

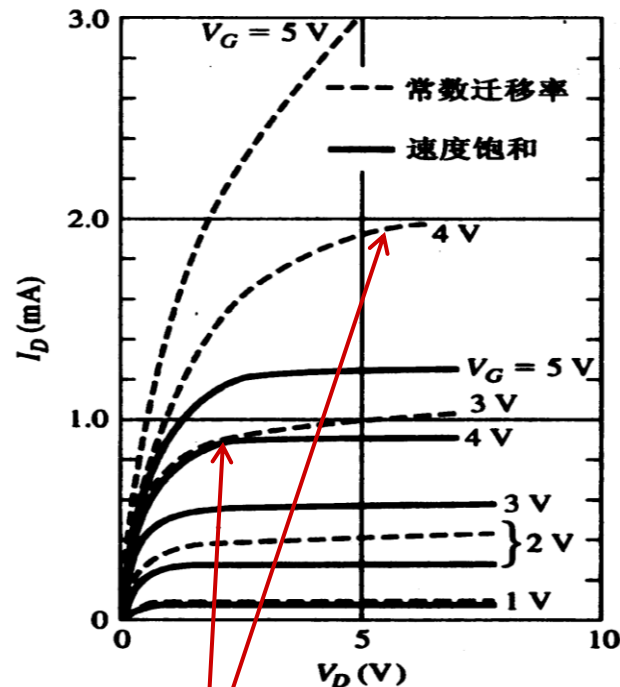
$$J = \sigma E = en\mu_n E = env$$

若 $\mu$ 为常数， $V_{\text{DS}} \uparrow$ ， $E \uparrow$ ， $v \uparrow$ ，直到漏端夹断，

发生夹断饱和  $V_{\text{DS}(sat)0} = V_{\text{GS}} - V_T$

速度饱和时，器件还未发生夹断饱和，

属于提前饱和，  $V_{\text{DS}(sat)1} < V_{\text{GS}} - V_T$



与理想 $\mu$ 相比，曲线提前拐弯， $V_{\text{DS}(sat)}$ 和 $I_{\text{DS}(sat)}$ 都减小

# 12.1 非理想效应

## 迁移率变化:速度饱和效应

- ◆ 饱和漏源电流与栅压成线性关系

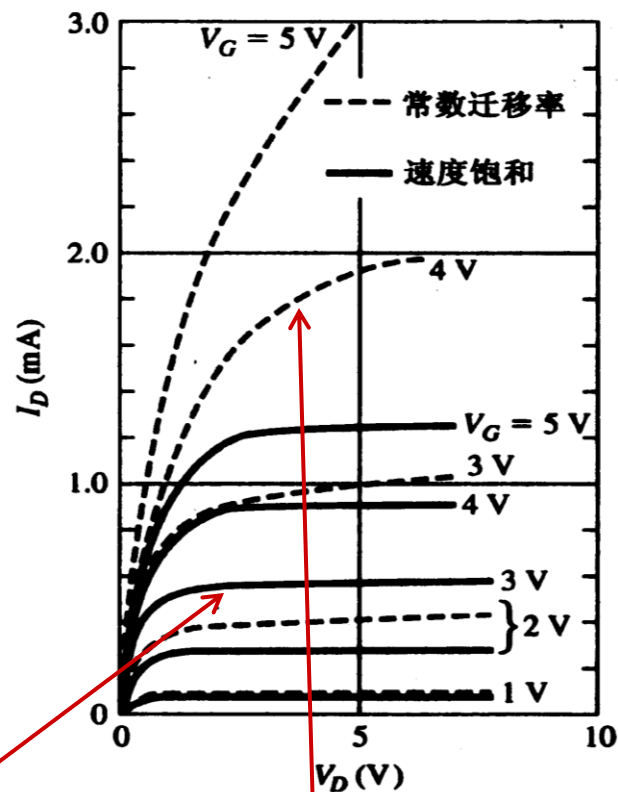
$$I_D(\text{sat}) = WC_{\text{ox}}(V_{GS} - V_T)u_{\text{sat}}$$

- ◆ 饱和区跨导与偏压及沟道长度无关

$$g_{ms} = \frac{\partial I_D(\text{sat})}{\partial V_{GS}} = WC_{\text{ox}}u_{\text{sat}}$$

- ◆ 截止频率与栅压无关

$$f_T = \frac{g_m}{2\pi C_G} = \frac{WC_{\text{ox}}u_{\text{sat}}}{2\pi(C_{\text{ox}}WL)} = \frac{u_{\text{sat}}}{2\pi L}$$

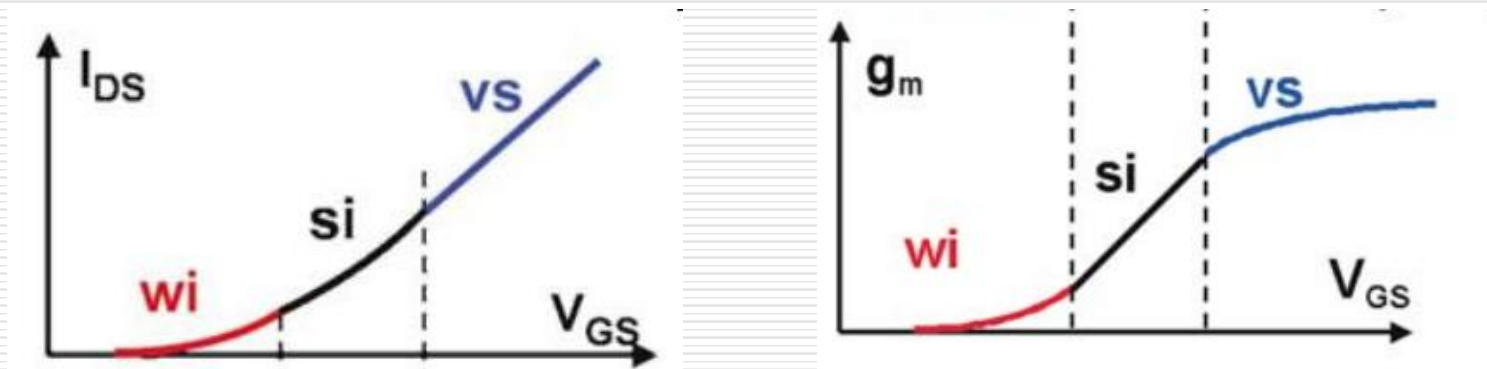


速度饱和时：  
等栅压差，等电流差，  
⇒  $g_m$  与栅压无关

夹断饱和时：  
等栅压差，电流差不等，  
⇒  $g_m$  与栅压有关

# 12.1 非理想效应

## 迁移率变化:速度饱和效应



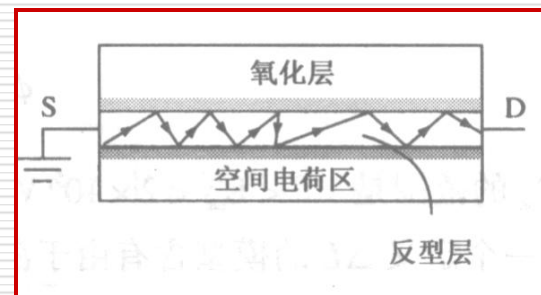
- $V_{GS} - V_T < 0$ : 弱反型区,  $I_D$ 与 $V_{GS}$ 指数关系(较小),  $g_m$ 与 $V_{GS}$ 指数关系
- $V_{GS} - V_T > 0$ (较小): 强反型区, 器件易发生夹断饱和,  
 $I_D$ 与 $V_{GS}$ 平方关系, 中电流,  $g_m$ 与 $V_{GS}$ 线性关系
- $V_{GS} - V_T > 0$ (很大): 器件很难发生夹断饱和, 易发生速度饱和,  
大电流, 但跨导饱和。
- 模拟放大电路设计中: 放大用MOSFET避免工作在速度饱和区

# 12.1 非理想效应

## 弹道输运

### □ 弹道输运MOSFET

- ◆ 沟道长度 $L < 0.1\mu\text{m}$ ，小于散射平均自由程
- ◆ 载流子从源到漏运动大部分没有一次碰撞
- ◆ 高速器件



### □ 非弹道输运MOSFET

- ◆ 沟道长度 $L > 0.1\mu\text{m}$ ，大于散射平均自由程
- ◆ 载流子从源到漏运动需经过多次散射
- ◆ 载流子运动速度用平均漂移速度表征

弹道输运：速度过冲

# 12.1 非理想效应

弹道输运： $I_D$ 对 $V_{GS}$ 的依赖关系

- 长沟器件：载流子速度正比于电场

$$v = \mu E$$

$$I_D \propto (V_{GS} - V_T)^2$$

- 短沟器件：电场大于临界电场，速度饱和。

$$v = v_{se}$$

$$I_D \propto (V_{GS} - V_T)$$

- 发生弹道输运的短沟器件：载流子速度大于饱和速度。

$$I_D \propto (V_{GS} - V_T)^{3/2}$$



# 12.1 非理想效应

需掌握内容

- MOSFET亚阈特性
  - ◆ 亚阈电流的定义和特点
  - ◆ 亚阈值摆幅的定义和物理意义
  - ◆ 亚阈特性的应用
- 沟道长度调制效应的定义对IV特性的影响
- 迁移率变化和速度饱和效应的概念和对器件特性的影响。
  - ◆ 垂直沟道的电场 ( $V_{gs}$ ) 对表面迁移率的影响。
  - ◆ 平行沟道的电场 ( $V_{ds}$ ) 产生的速度饱和。
- 弹道运输和非弹道运输的特点。

# 12.2 按比例缩小

---

- 器件缩小的意义
- 器件缩小的几种方式
- 恒场按比例缩小参数的变化
- 按比例缩小可能引发的短沟道效应

# 12.2 按比例缩小

## MOSFET发展

### □ MOSFET IC的发展趋势:

- ◆ 工艺特征尺寸:  $0.25\mu\text{m} \rightarrow 0.18\mu\text{m} \rightarrow 0.13\mu\text{m} \rightarrow 90\text{nm} \rightarrow 60\text{nm}$   
 $\rightarrow 45\text{nm} \rightarrow 32\text{nm} \rightarrow 22\text{nm} \rightarrow 16\text{nm}$
- ◆ 最小沟长 $L \rightarrow kL$ , 缩小因子 $k \approx 0.7$ ,

### □ 尺寸缩小好处:

- ◆ 提高集成度: 同样功能所需芯片面积更小
- ◆ 提升功能: 同样面积可实现更多功能
- ◆ 降低成本: 单管成本降低
- ◆ 改善性能: 电容减小, 使电路延时减小,  
速度加快;  
电源电压减小, 器件的功耗降低

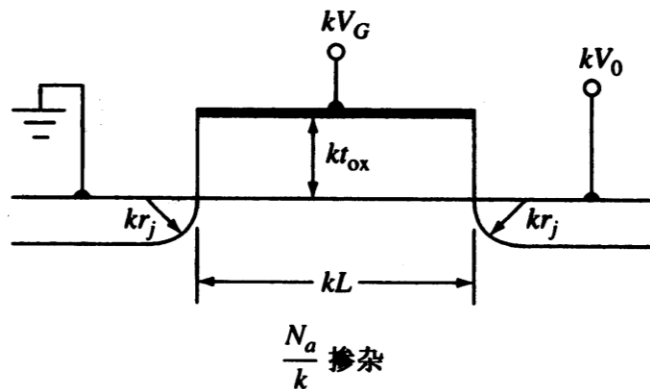
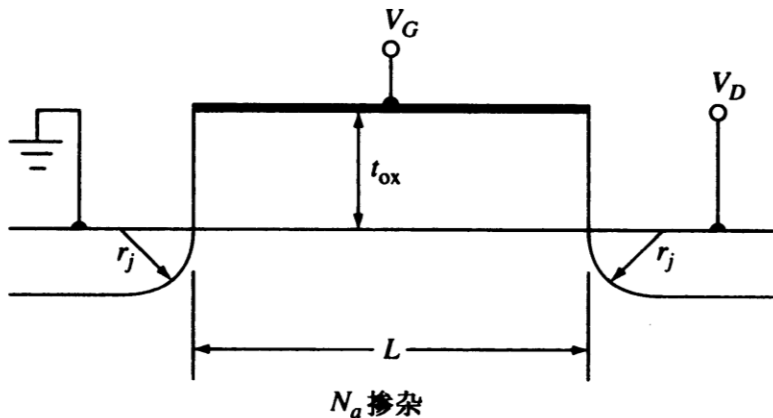
# 12.2 按比例缩小

## 缩小方式

- 完全按（恒定电场）比例缩小(**Full Scaling**)
  - ◆ 尺寸与电压按同样比例缩小
  - ◆ 电场强度保持不变
  - ◆ 最为理想，但难以实现（器件阈值电压不能按比例缩小）
  
- 恒压按比例缩小(**Fixed Voltage Scaling**)
  - ◆ 尺寸按比例缩小，电压保持不变
  - ◆ 电场强度随尺寸的缩小而增加，强场效应加重
  
- 一般化按比例缩小(**General Scaling**)
  - ◆ 尺寸和电场按不同的比例因子缩小
  - ◆ 迄今为止的实际做法

# 12.2 按比例缩小

## 完全按比例缩小:规则



$$L' = kL \xrightarrow{E_x \text{ 不变}} V_{DS}' = kV_{DS} \xrightarrow{\text{栅漏压要匹配}} V_{GS}' = kV_{GS}, V_T' = kV_T$$

$$\xrightarrow{E_y \text{ 不变}} t_{ox}' = kt_{ox},$$

$$L' = kL \longrightarrow \text{漏衬结耗尽层 } x_D' = kx_D \xrightarrow{x_D \propto \sqrt{\frac{V_{DS}}{N_a}}} N_a' = N_a / k$$

# 12.2 按比例缩小

## 完全按比例缩小:结果

- 按比例缩小的参数：尺寸与电压按同样比例缩小
  - 器件尺寸参数 ( $L$ ,  $t_{ox}$ ,  $W$ ,  $x_j$ ) :  $k$ 倍
  - 掺杂浓度 ( $N_a$ ,  $N_d$ ) :  $1/k$ 倍
  - 电压 $V$ :  $k$ 倍
- 对其他器件参数的影响
  - 电场 $E$ : 1倍
  - 耗尽区宽度 $X_d$ :  $k$ 倍
  - 电阻 $R$  (与 $L/W$ 成正比) : 1倍; 总栅电容 (与 $WL/t_{ox}$ 成正比) :  $k$ 倍
  - 漏电流 $I$  (与 $WV/L$ 成正比):  $k$ 倍
- 对电路参数的影响
  - 器件密度 (与 $WL$ 成反比) :  $1/k^2$ 倍
  - 每器件功耗 $P$  (与 $IV$ 成正比) :  $k^2$ 倍
  - 器件功率密度 (每器件功耗/器件面积) (与 $IV/WL$ 成正比) : 1
  - 电路延迟时间 (与 $RC$ 成正比) :  $k$ 倍

# 12.2 按比例缩小

## 完全按比例缩小:小结

$$V_T = \frac{\sqrt{2\epsilon\epsilon_0 N_a (2\phi_{fp})}}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp} \quad (\text{第一项} \propto \sqrt{k}, \text{后二项与} k \text{依赖关系弱})$$

- 沟道长度减小到一定程度后,缓变沟道近似不再成立,器件的电场增加,增加的电场会引起偏离长沟特性的一系列二级物理效应,统称为短沟道效应。包括:
  - ◆ 沟长缩短后,  $V_{DS}$  产生的高E时载流子速度饱和,跨导下降
  - ◆ 阈值电压随沟长的减小而下降,不再是常数
  - ◆ 亚阈特性退化,亚阈电流随沟长的减小而增加,器件关不断
  - ◆ 诱发器件发生各种击穿:栅氧击穿、漏衬雪崩、源漏穿通
  - ◆ 影响器件寿命的热载流子效应

# 12.2 按比例缩小

## 完全按比例缩小:小结

- 缩小原则：应使短沟道器件保持电学上的长沟道特性，标志：
  - ◆  $V_{DS} > 3kt/e$ , 弱反型区  $I_{Dsub}$  与  $V_{DS}$  无关
  - ◆  $I_D$  与  $1/L$  成正比
- 长沟道特性最小沟长（经验公式）：
  - ◆  $L \geq c1[r_j t_{ox}(W_S + W_D)^2]^{1/3}$
  - ◆  $c1$  为常数（0.4）， $r_j$  源漏结深， $t_{ox}$  氧化层厚度
  - ◆  $W_S + W_D$  源漏区耗尽层宽度之和
- 有利于器件继续发展的技术（可延缓短沟道效应）：
  - ◆ 高K介质：放缓了器件对栅介质厚度缩小的需求，使缺陷减少，E减小
  - ◆ FinFET器件的使用：薄体区，减缓穿通，改善亚阈值摆幅，减小电路功耗



# 12.2 按比例缩小

需掌握内容

- 器件缩小的意义
- 器件缩小的**3**种方式
- 恒场按比例缩小参数的变化结果
- 按比例缩小可能引发的短沟道效应有哪些

# 12.3 阈值电压修正

---

- 阈值电压的短沟效应
- 阈值电压的窄沟效应
- 阈值电压的离子注入调整技术

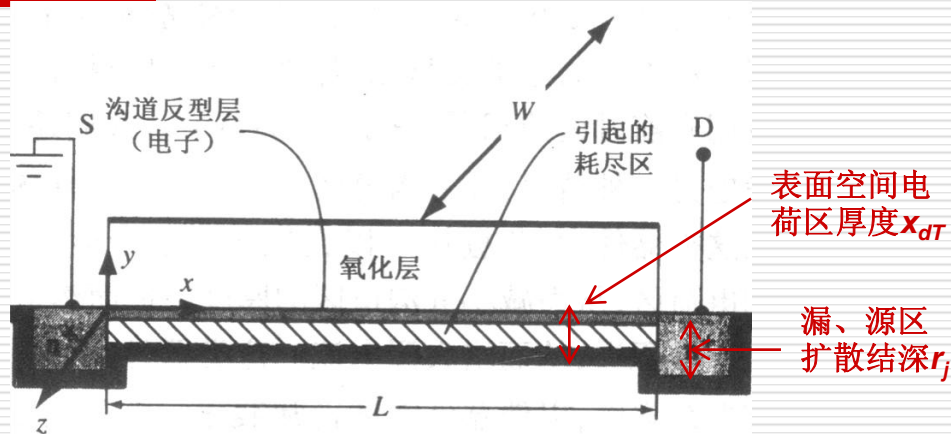
# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 与 $L$ 、 $W$ 的相关性

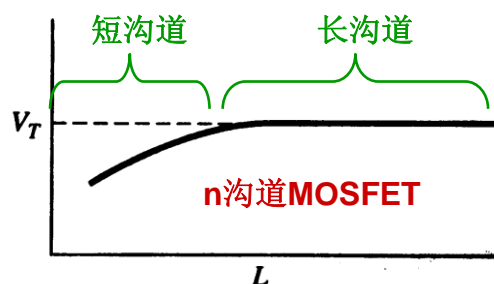
长、宽沟道MOSFET的阈值电压

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp}$$

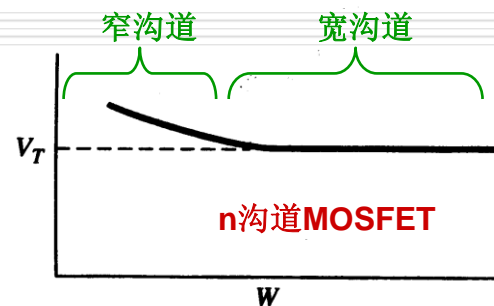
$V_{TN}$ 与沟道长度 $L$ 、宽度 $W$ 无关



短沟道MOSFET ( $L \sim r_j$ )的阈值电压  
随沟道长度 $L$ 的变化而变化

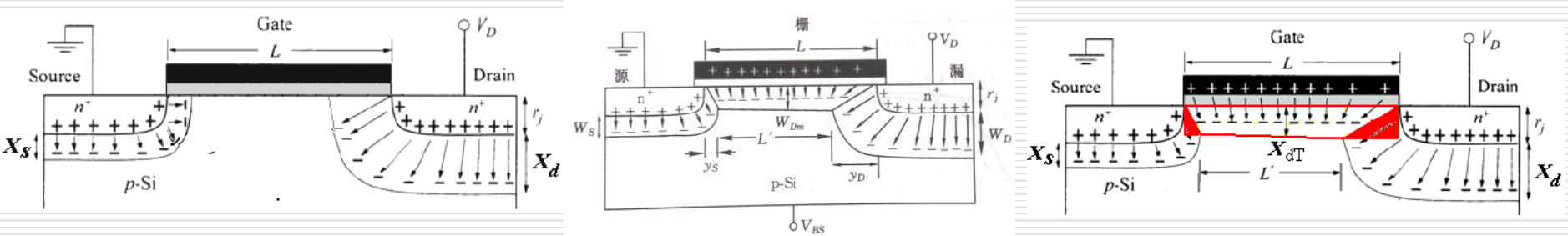


窄沟道MOSFET ( $W \sim x_{dT}$ )的阈值电压  
随沟道宽度 $W$ 的变化而变化



# 12.3 阈值电压修正

$V_T$ 随L的变化



- 利用电荷共享模型分析（实际MOSFET）：
  - ◆ 源衬结(0偏)和漏衬结（反偏）的耗尽层向沟道区扩展
  - ◆ 近似认为：左右下方两个三角形内的耗尽层电荷在 $V_{DB}$ 、 $V_{SB}$ 下产生，只梯形内的空间电荷由 $V_{GS}$ 控制产生。
- 理想情况（长沟器件）：两侧三角形内空间电荷的量相对少，近似栅氧下方耗尽层电荷都是在 $V_{GS}$ 控制产生
- ◆ 实际情况（短沟器件）：两侧三角形内空间电荷的量相对增加，实际需 $V_{GS}$ 控制产生的电荷减少， $V_T$ 减小

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp}$$

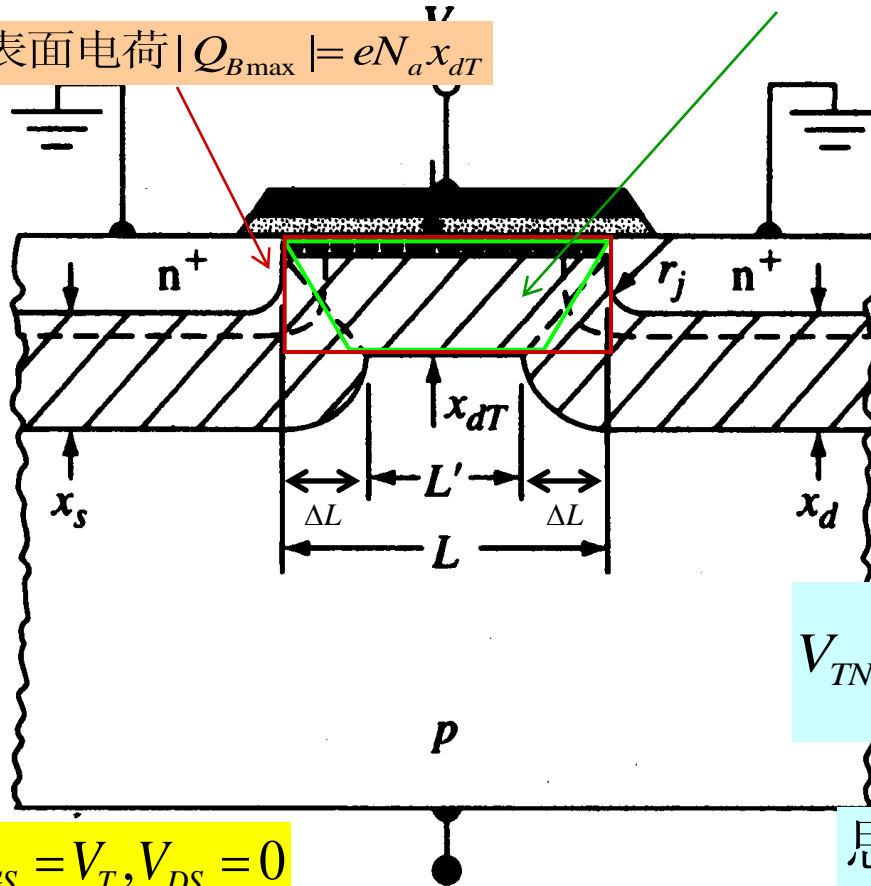
# 12.3 阈值电压修正 $V_T$ 随L的变化:表面空间电荷

理想模型(适用长沟道) :  $L \approx L'$

受  $V_{GS}$  控制的表面总电荷  $|Q_B| = eN_a x_{dT} WL$

单位栅面积的表面电荷  $|Q_{Bmax}| = eN_a x_{dT}$

实际情形(短沟明显):  $L < L'$ , 栅氧化层下, 只梯形内的空间电荷在  $V_{GS}$  作用下形成。



受  $V_{GS}$  控制的表面总电荷

$$|Q'_B| = eN_a x_{dT} \frac{L+L'}{2} W$$

单位面积的表面电荷

$$|Q'_{Bmax}| = eN_a x_{dT} \left(1 - \frac{\Delta L}{L}\right)$$

(利用  $L' = L - 2\Delta L$ )

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp}$$

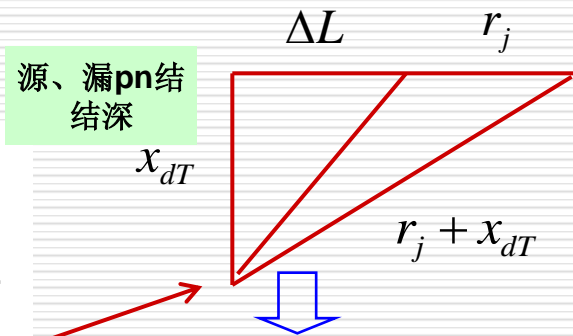
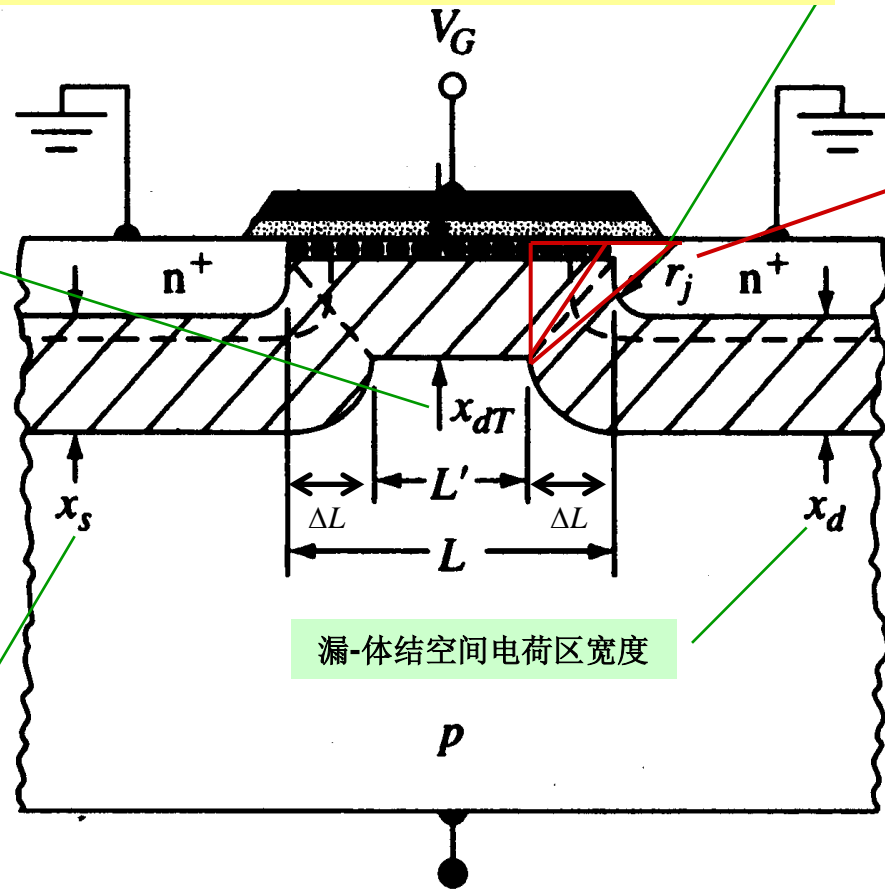
偏置条件:  $V_{GS} = V_T, V_{DS} = 0$

思考:  $V_{DS} > 0$  的影响?

# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 随L的变化: $\Delta L$ 的计算

- 假定:
- (1)  $V_{DS} = 0, V_{GS} = V_T$ ;
  - (2)  $x_s \approx x_d \approx x_{dT}$
  - (3) 近栅端, 杂质各方向扩散结深近似相等



$$\Delta L = r_j \left( \sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1 \right)$$

$$|Q'_{Bmax}| = eN_a x_{dT} \left( 1 - \frac{\Delta L}{L} \right)$$

$$= eN_a x_{dT} \left[ 1 - \frac{r_j}{L} \left( \sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1 \right) \right]$$

# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 随L的变化: $\Delta V_T$ 的计算

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_{fp} + \frac{|Q'_{Bmax}|}{C_{ox}} = V_{FB} + 2\phi_{fp} + \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left[ 1 - \frac{r_j}{L} \left( \sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1 \right) \right]$$



$$\Delta V_T \equiv V_T(\text{短沟道}) - V_T(\text{长沟道}) = -\frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left[ \frac{r_j}{L} \left( \sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1 \right) \right] < 0$$



若沟道长度L短到与漏-源结深 $r_j$ 相当时, 阈值电压 $V_T$ 与沟道长度L有关, 此时 $V_T$ 随L的减少而减少

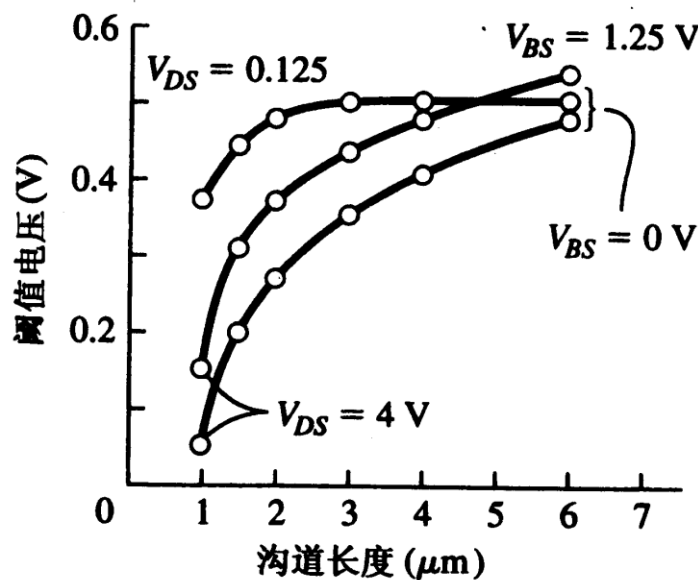
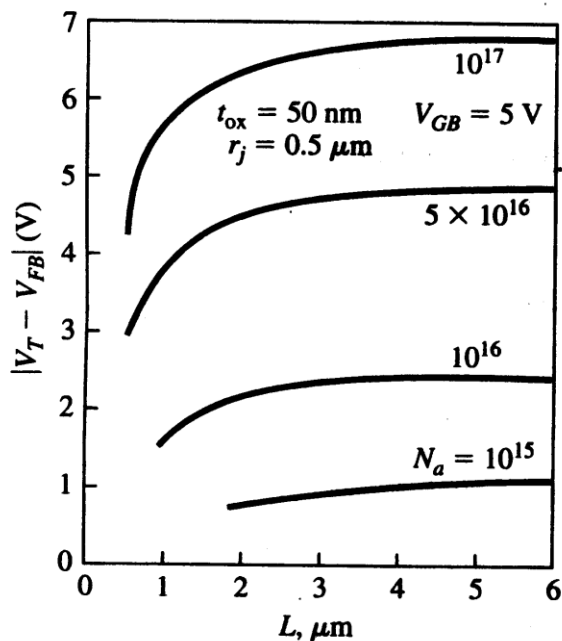
计算实例: n沟道MOSFET,  $N_a = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $t_{ox} = 45 \text{ nm}$ ,  $L = 1.25 \mu\text{m}$ ,  $r_j = 0.5 \mu\text{m}$   
 $\Rightarrow C_{ox} = 7.67 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ ,  $\phi_{fp} = 0.376 \text{ V}$ ,  $x_{dT} = 0.18 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta V_T = -0.140 \text{ V}$

# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 随L的变化:关系曲线

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_{fp} + \frac{|Q'_{Bmax}|}{C_{ox}} = V_{FB} + 2\phi_{fp} + \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left[ 1 - \frac{r_j}{L} \left( \sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1 \right) \right]$$

$$\Delta V_T = -\frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left[ \frac{r_j}{L} \left( \sqrt{1 + \frac{2x_{dT}}{r_j}} - 1 \right) \right] < 0$$



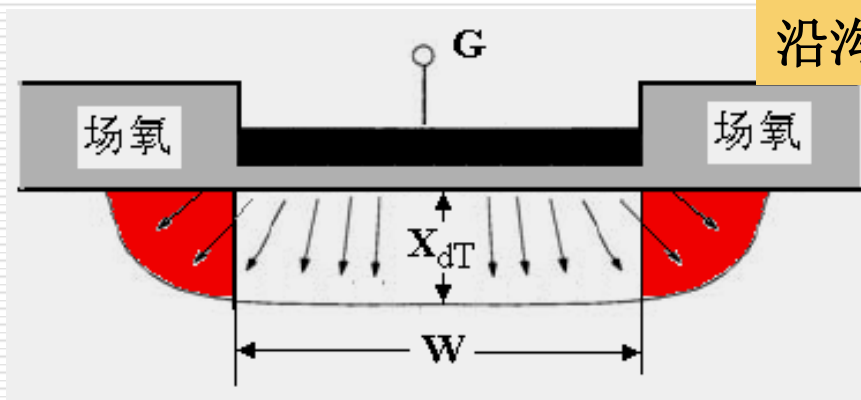
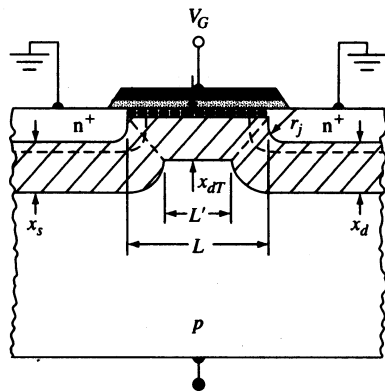
沟道长度/源漏扩散结深 =  $L/r_j \downarrow \Rightarrow |\Delta V_T| \uparrow$   
 衬底掺杂浓度  $N_a \uparrow \Rightarrow$  表面电荷密度  $\uparrow \Rightarrow |\Delta V_T| \uparrow$

漏源电压  $V_{DS} \uparrow \Rightarrow / \Delta V_T / \uparrow$   
 体源电压  $V_{BS} / \uparrow \Rightarrow / \Delta V_T / \downarrow$



# 12.3 阈值电压修正

$V_T$ 随 $W$ 的变化:表面电荷



- MOSFET半导体表面耗尽层在宽度方向将存在横向展宽现象
- ◆ 阈值反型点时， $V_{GS}$ 产生了中间矩形和两侧的空间电荷
- ◆ 理想情况(宽沟器件): 栅两侧空间电荷的量相对少，可忽略，阈值反型点时，近似认为只中间矩形内的耗尽层电荷需要栅压产生
- ◆ 实际情况(窄沟器件): 两侧空间电荷的量相对多，不可忽略，阈值反型点时，需 $V_{GS}$ 产生的耗尽层电荷增多， $V_T$ 增大

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp}$$

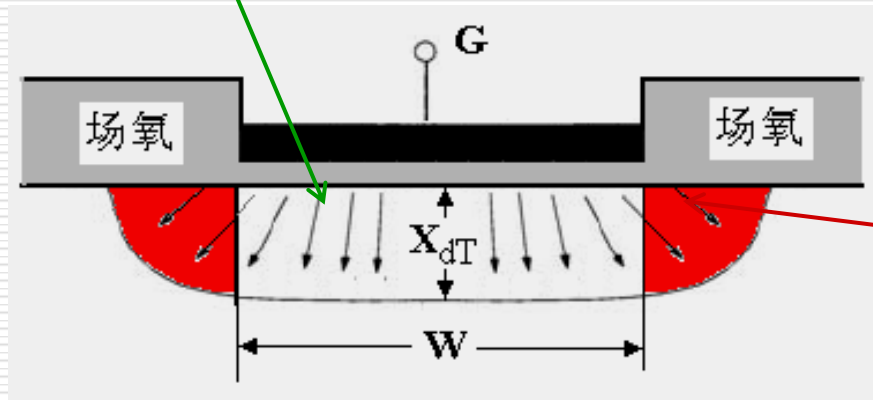
# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 随 $W$ 的变化:表面电荷

理想模型(适用宽沟道) :

受 $V_{GS}$ 控制的表面总电荷  $|Q_B| = eN_a x_{dT} WL$

单位面积的表面电荷  $|Q_{Bmax}| = eN_a x_{dT}$



若栅边缘处耗尽层的扩展相等, 均为耗尽层最大厚度 $x_{dT}$ , 则两侧为1/4圆

边缘两个 $\frac{1}{4}$ 圆柱体的体积:

$$2 \cdot \frac{1}{4} \pi x_{dT}^2 \cdot L$$

实际情形(适用窄沟道) :

受 $V_{GS}$ 控制的表面总电荷  $|Q'_B| = eN_a x_{dT} \left( WL + L \cdot \frac{\pi}{2} x_{dT} \right)$

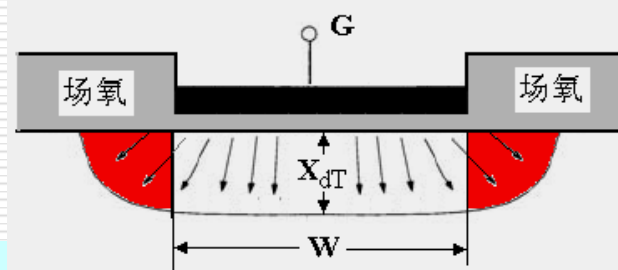
单位面积的表面电荷  $|Q'_{Bmax}| = eN_a x_{dT} \left( 1 + \frac{\pi}{2} \frac{x_{dT}}{W} \right)$

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} + V_{FB} + 2\phi_{fp}$$

# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 随 $W$ 的变化: $\Delta V_T$ 的计算

$$V_T = V_{FB} + 2\phi_{fp} + \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left( 1 + \frac{\pi X_{dmax}}{2W} \right)$$



$$\Delta V_T \equiv V_T(\text{窄沟道}) - V_T(\text{宽沟道}) = \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left( \frac{\pi x_{dT}}{2W} \right) > 0$$

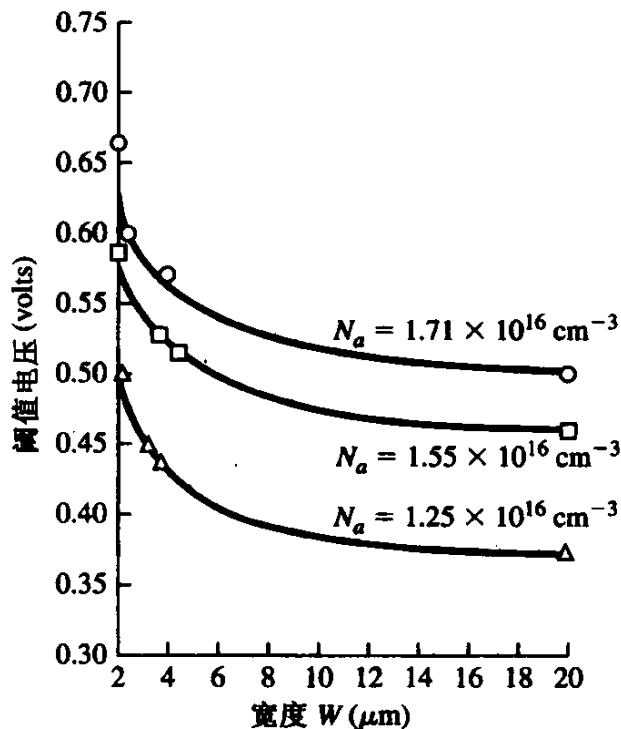
若衬底非均匀掺杂，沟道边缘非1/4圆柱体，则 $\Delta V_T = \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left( \frac{\xi x_{dT}}{W} \right)$

若沟道宽度 $W$ 窄到与表面空间电荷区宽度 $x_{dT}$ 相当时，阈值电压 $V_T$ 与沟道宽度 $W$ 有关，此时 $V_T$ 随 $W$ 的减少而增加

计算实例:n沟道MOSFET,  $N_a = 3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $t_{ox} = 45 \text{ nm}$ ,  $W = 1.59 \mu\text{m}$ ,  $r_j = 0.5 \mu\text{m}$ ,  $\xi = \pi/2$   
 $\Rightarrow C_{ox} = 7.67 \times 10^{-8} \text{ F/cm}^2$ ,  $\phi_{fp} = 0.376 \text{ V}$ ,  $x_{dT} = 0.18 \mu\text{m} \Rightarrow \Delta V_T = 0.2 \text{ V}$

# 12.3 阈值电压修正

## $V_T$ 随 $W$ 的变化:关系曲线



$$V_T = V_{FB} + 2\phi_{fp} + \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left( 1 + \frac{\pi X_{dmax}}{2W} \right)$$

$$\Delta V_T = \frac{eN_a x_{dT}}{C_{ox}} \left( \frac{\pi x_{dT}}{2W} \right) > 0$$

沟道宽度 / 表面空间电荷区厚度

$$W / x_{dT} \downarrow \Rightarrow |\Delta V_T| \uparrow$$

- ◆ 短沟道效应:  $L$ 减小,  $V_T$ 减小; 窄沟道效应:  $W$ 减小,  $V_T$ 增加。
- ◆ 若器件同时受到两种效应的影响, 则两模型需合并, 采用三维空间电荷区近似综合分析, 不再讨论

# 12.3 阈值电压修正

## 离子注入调整 $V_T$ :原理

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}} + 2\phi_{fp} + \phi_{ms}$$
$$= f(N, Q'_{ss}, \phi_{ms}, C_{ox})$$

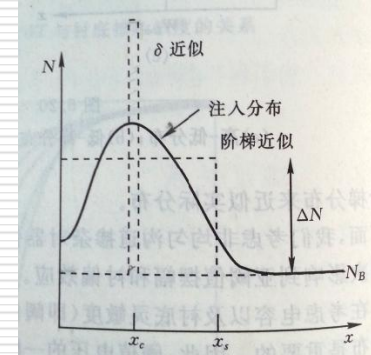
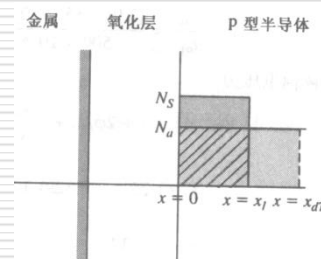
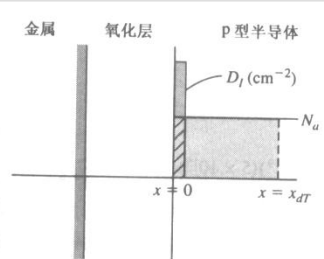
$$|Q'_{SDmax}| = eN_a x_{dT}$$

- 通过离子注入技术向沟道区注入杂质，改变氧化层下方半导体衬底表面的掺杂分布（**N**），调整 $V_T$ 。
- 离子注入技术是微电子工艺中的一种重要的**掺杂技术**，也是控制**MOSFET**阈值电压的一个重要手段。
- 离子注入的方法就是在真空中、低温下，把杂质离子加速，获得很大动能的杂质离子即可以直接进入半导体中；同时也会在半导体中产生一些晶格缺陷，因此在离子注入后需用低温进行**退火**来消除这些缺陷。

# 12.3 阈值电压修正

离子注入调整 $V_T$ :原理

- 离子注入的优点是**能精确控制杂质的总剂量、深度分布和面均匀性**，而且是**低温**工艺（可防止原来杂质的再扩散等），同时可实现自对准技术（以减小电容效应）。
- 当具有高能量的离子注入到固体靶面以后，这些高能粒子将与固体靶面的原子与电子进行多次碰撞，这些碰撞将逐步削弱粒子的能量，最后由于能量消失而停止运动，形成一定的杂质分布。（**Delta**函数型分布，**阶跃**函数型分布）



- 杂质被电场加速注入到硅片内后，受到硅原子的阻挡，由于杂质离子具有的能量是不均匀的，所以在一般情况下其分布类似**高斯分布**。

# 12.3 阈值电压修正

## 离子注入调整 $V_T$ :原理

$$V_{TN} = \frac{|Q'_{SDmax}|}{C_{ox}} - \frac{Q'_{ss}}{C_{ox}} + 2\phi_{fp} + \phi_{ms}$$

$$|Q'_{SDmax}| = eN_a x_{dT}$$

- **p**型半导体表面注入受主杂质 $N_a$  (如**B**) → 半导体表面净掺杂浓度 ↑ → 表面更难以反型 →  $V_T$  ↑

注入前的阈值电压

受主注入剂量 (单位面积注入的离子数)

$$V_T = V_{T0} + \frac{eD_I}{C_{ox}}$$

- **p**型半导体表面注入施主杂质 $N_d$  (如**P**) → 半导体表面净掺杂浓度 ↓ → 表面更容易反型 →  $V_T$  ↓

施主注入剂量 (单位面积注入的离子数)

$$V_T = V_{T0} - \frac{eD_I}{C_{ox}}$$

- 公式前提: 所有的注入杂质, 都参与改变 $V_T$

# 12.3 阈值电压修正 离子注入调整 $V_T$ :注入杂质分布

□ 给定剂量 $D_I$ 后, 对 $V_T$ 影响量与杂质注入到 $S$ 后的分布函数相关

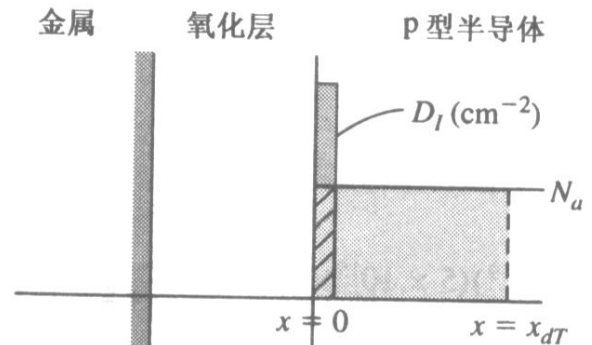
◆ **Delta函数型分布**

单位面积注入的离子数 $D_I$

注入前的掺杂浓度

$$D_I = \delta(x)(N_S - N_a) \quad V_T = V_{T0} + \frac{eD_I}{C_{ox}}$$

注入后的平均掺杂浓度



◆ **阶跃函数型分布**

注入深度

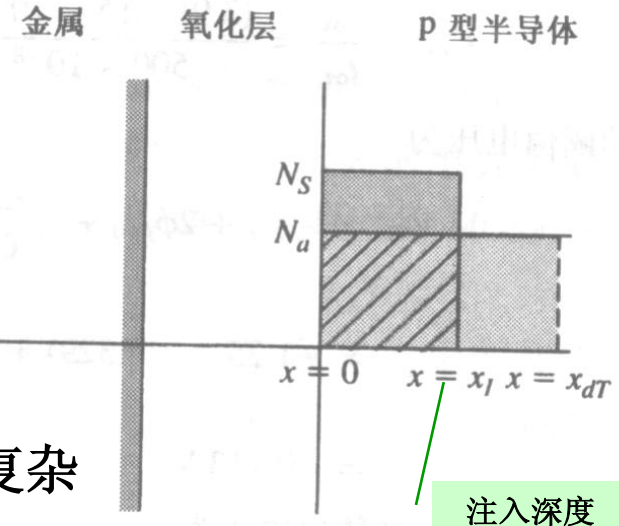
$$D_I = (N_s - N_a)x_I$$

$$x_I < x_{dT}$$

$$V_T = V_{T0} + \frac{eD_I}{C_{ox}}$$

$$x_I > x_{dT}$$

$V_T$ 利用 $N_S$ 求出



注入深度

◆ **高斯函数型分布:更接近实际情况, 分析较复杂**

$x_{dT}$ : 注入后的最大耗尽层厚度



# 12.3 阈值电压修正

需掌握内容

- 沟道长度和宽度变化对阈值电压的影响及相应原因
- 掺杂浓度和漏电压与短沟对阈值电压影响
- 离子注入调整阈值电压的过程
- 阈值电压调整量和注入剂量的关系

# 12.4 击穿特性

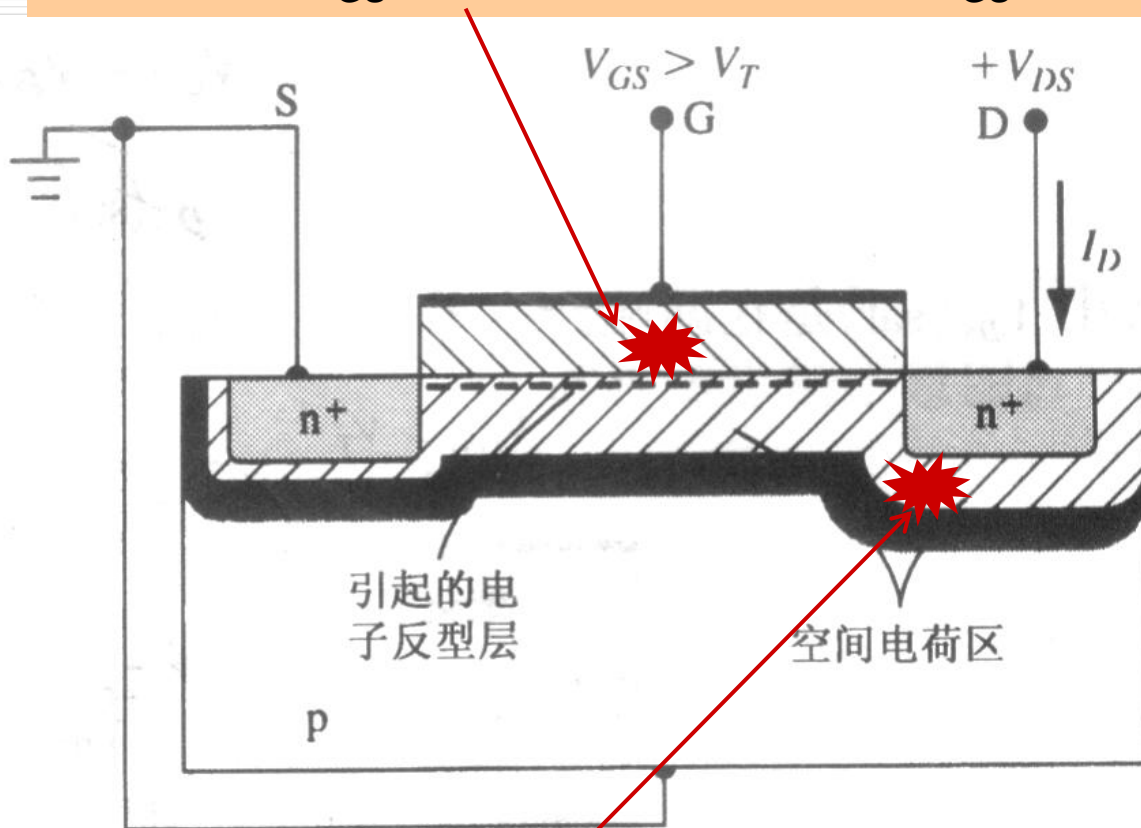
本节内容

- 栅氧化层击穿
- 漏衬pn结雪崩击穿
- 沟道雪崩击穿
- 寄生晶体管击穿
- 源漏穿通效应
- **LDD结构的MOSFET**

# 12.4 击穿特性

## MOSFET主要击穿机构

栅源击穿 $BV_{GS}$ : 栅氧化层击穿, 只与 $V_{GS}$ 有关



漏源击穿 $BV_{DS}$ : 漏pn结击穿, 与 $V_{DS}$ 、 $V_{GS}$ 均有关

# 12.4 击穿特性

## 栅-源介质击穿

### □ 击穿现象

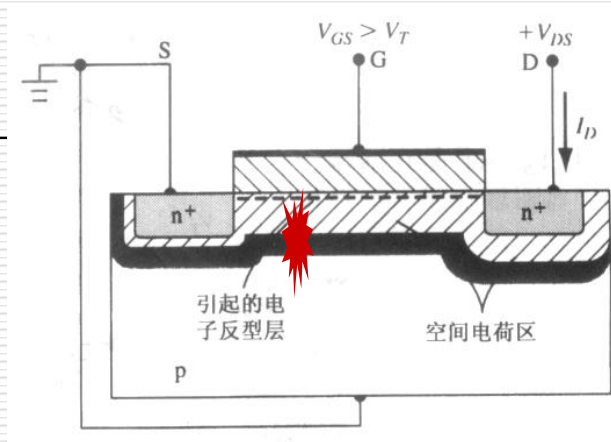
- ◆  $V_{GS} \uparrow = BV_{GS} \rightarrow$  氧化层电场强度  $E_{ox} >$  临界电场强度  $E_B$ ，氧化层发生介电击穿，栅衬短路，栅电流产生
- ◆ 若  $E_B = 6 \times 10^6 \text{V/cm}$ ，当氧化层厚度  $50 \text{nm}$  时， $BV_{GS} = 30 \text{V}$

### □ 击穿过程（破坏性的击穿）

- ◆ 若氧化层存在针孔  $\rightarrow$ （大电场作用）凹坑  $\rightarrow$  空洞
- ◆ 电流  $I \uparrow \rightarrow$  温度  $T \uparrow \rightarrow$  电流  $I \uparrow$ ，形成热电正反馈

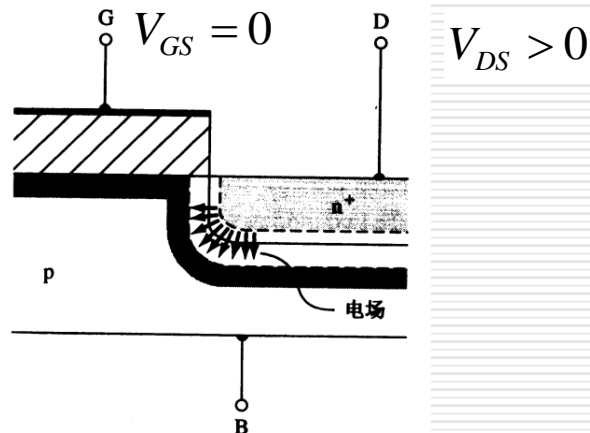
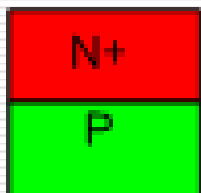
### □ 击穿场强的来源

- ◆ 栅压  $V_{GS}$ :  $E_{ox} \approx V_{GS}/t_{ox}$
- ◆ 栅感应静电荷  $Q_I$ :  $E_{ox} \approx Q_I/t_{ox}C_{ox}$ ，因  $t_{ox}C_{ox}$  较小，很少的电荷即可引起击穿



# 12.4 击穿特性

## 漏pn结击穿(沟道未形成)



❑ MOSFET漏衬PN结反偏压 $V_{DS}$ 大到一临界值，发生雪崩击穿

❑ 理想的平面单边突变结：

◆ 击穿电压是轻掺杂侧掺杂浓度的函数

$$BV_{np} = \frac{\epsilon_s E_C^2}{2eNa}$$

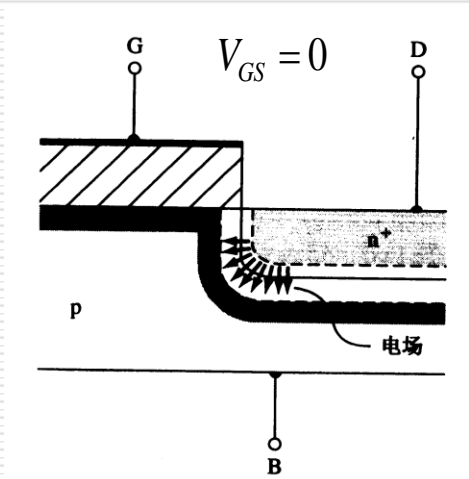
❑ MOSFET漏衬PN结的 $BV_{DS}$ 要小于理想的 $BV_{np}$

◆ 有拐角，耗尽区的电场在拐角处（棱角电场）容易集中，大于平面处电场

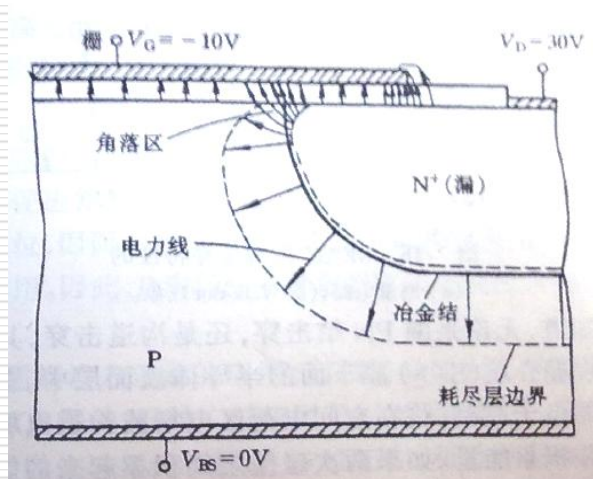
❑  $V_{GS}=0$ 时漏pn结的击穿

# 12.4 击穿特性

## 漏pn结击穿：栅调制击穿



$$V_{DS} > 0$$

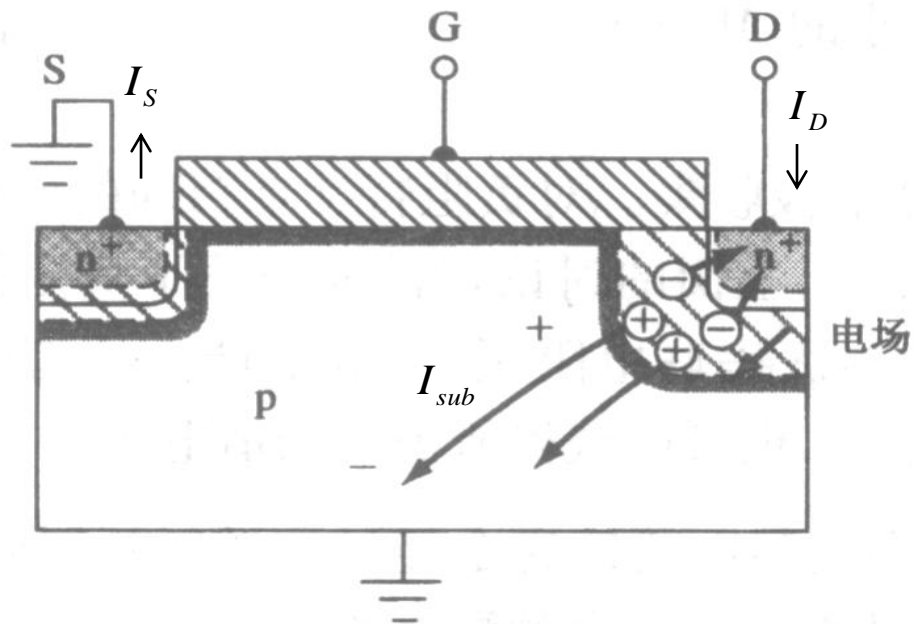


### □ $V_{GS} \ll 0$ :

- ◆ 栅上积聚了负电荷，漏区边缘存在栅漏交叠，会有电力线中止于栅极
- ◆ 增大了漏pn结空间电荷区在表面附近的分布曲率→击穿电压降低

# 12.4 击穿特性

## 沟道雪崩倍增效应



- ❑ 雪崩倍增形成条件：
  - ◆ 短沟道：  
L越短，沟道电场越强
  - ◆ n沟道：  
空穴的碰撞电离率小于电子，产生雪崩倍增的临界电场强度大于电子

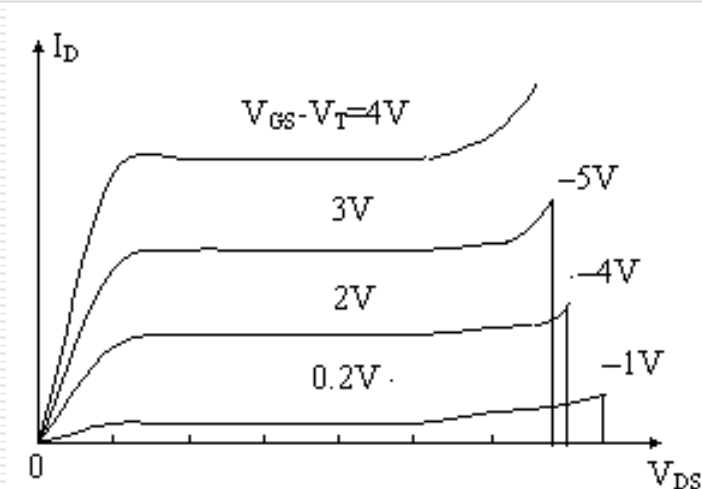
$$I_D = M_1 I_S$$

(雪崩倍增因子  $M_1 \gg 1$ )

- ❑  $V_{GS} > V_T$ ，器件导通，容易发生沟道雪崩倍增效应
- ◆ 发自S端的载流子（形成电流 $I_S$ ），进入沟道区，受沟道电场的加速
- ◆ 在D端附近发生雪崩倍增，
- ◆ 产生的电子被漏极收集（加入 $I_D$ ），产生的空穴注入衬底（产生 $I_{sub}$ ）

# 12.4 击穿特性

## 沟道雪崩倍增效应



□  $V_{GS} - V_T > 0$ 时，器件导通

- ◆ 沟道区载流子在D端诱发雪崩击穿，倍增击穿需要一过程，属于软击穿
- ◆  $V_{GS}$ 越大，沟道载流子数越多，倍增越快， $BV_{DS}$ 越小

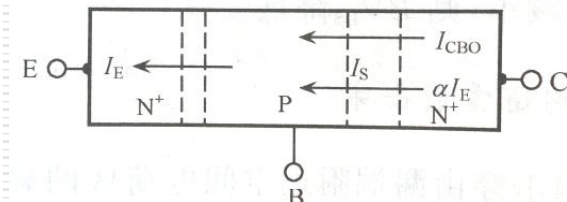
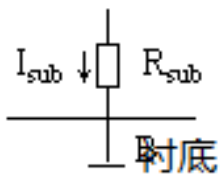
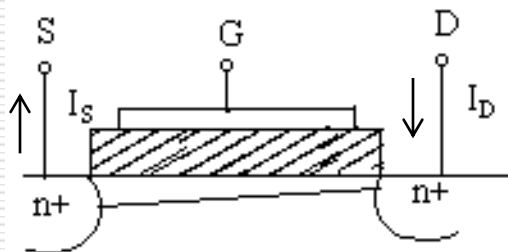
□  $V_{GS} - V_T < 0$ 时，器件截止

- ◆ 漏-衬pn结击穿，电流从无到击穿时大的值，属于硬击穿
- ◆  $V_{GS}$ 越负， $BV_{DS}$ 越小——栅调制击穿， $-V_{GS}/\uparrow \Rightarrow E_{DG}\uparrow \Rightarrow BV_{DS}\downarrow$ 。



# 12.4 击穿特性

## 寄生晶体管效应



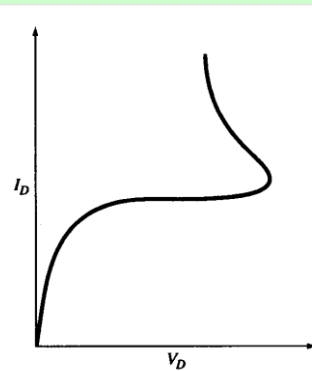
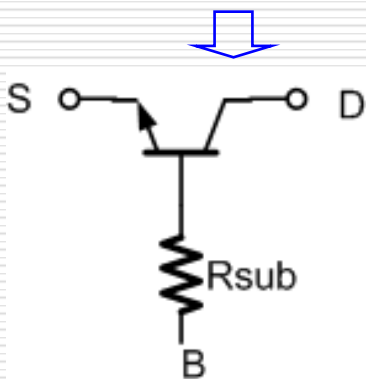
形成条件:

- (1)  $R_{sub} \neq 0$ ;
- (2) 沟道雪崩倍增 (短沟道, n沟道)

雪崩倍增  $\uparrow \Rightarrow I_{sub} \uparrow \Rightarrow V_{sub} = I_{sub} R_{sub} \uparrow$   
 ( $V_{sub}$  加在寄生npn管发射结的正向电压)  
 $\Rightarrow$  从S注入沟道的电子数  $\uparrow \Rightarrow I_D \uparrow \Rightarrow$  雪崩倍增  $\uparrow$



维持大电流  $I_D$  所需的  $V_{DS} \downarrow \Rightarrow$  出现负阻效应  
 (这种  $I_D \uparrow$  不是因  $V_{DS} \uparrow$  所致)



# 12.4 击穿特性

## 寄生晶体管效应

□ 易发生寄生晶体管击穿：

短沟高阻衬底的MOSFET

◆ 短沟：

➤ 基区较窄

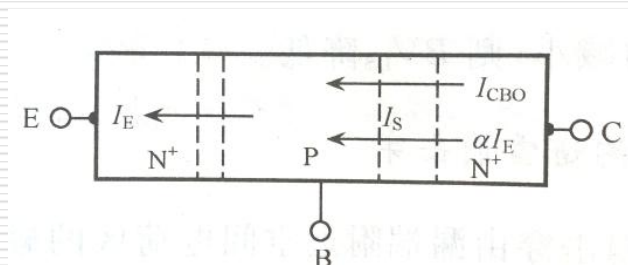
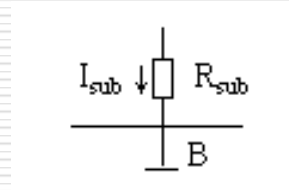
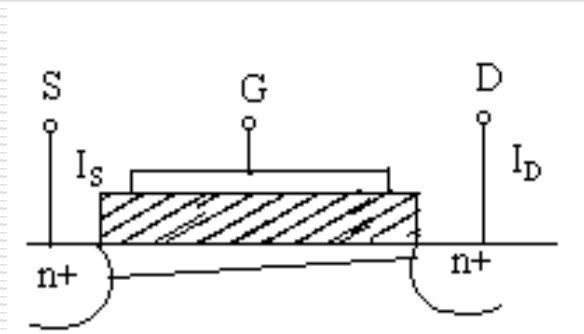
➤ 注入沟道区的电子易被漏极收集

➤ 漏结附近的E较强，倍增效应强

◆ 高阻衬底， $R_{sub}$ 大，易触发NPN导通

□ 减弱方法

◆ 降低衬底 $R_{sub}$ ，降低衬底电阻，重掺杂衬底



# 12.4 击穿特性

## 源漏穿通效应

- 源漏穿通：漏衬和源衬空间电荷区交接，导致沟道近源端附近势垒降低，电子跨越势垒高度由源极注入到漏极，使得漏电流增大。

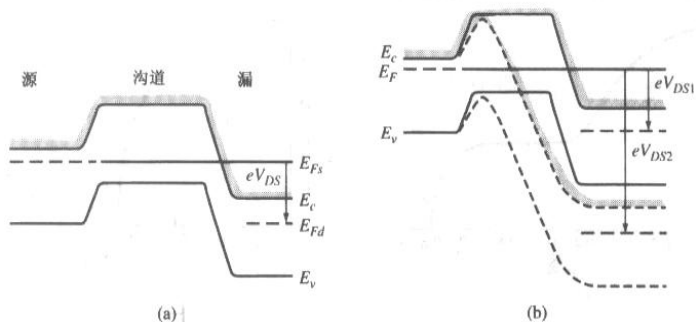
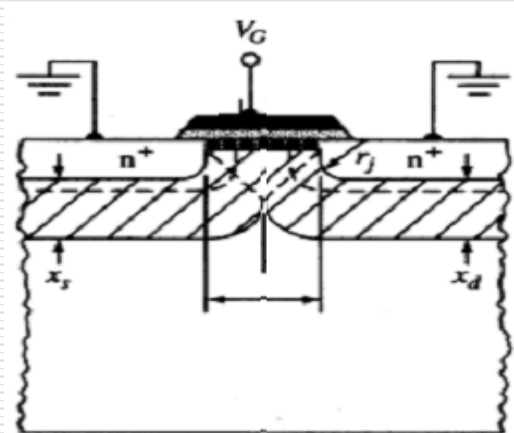


图 12.25 (a)长沟 MOSFET 沿表面的等势图;(b)短沟器件在穿通之前和穿通之后的沿表面的等势图



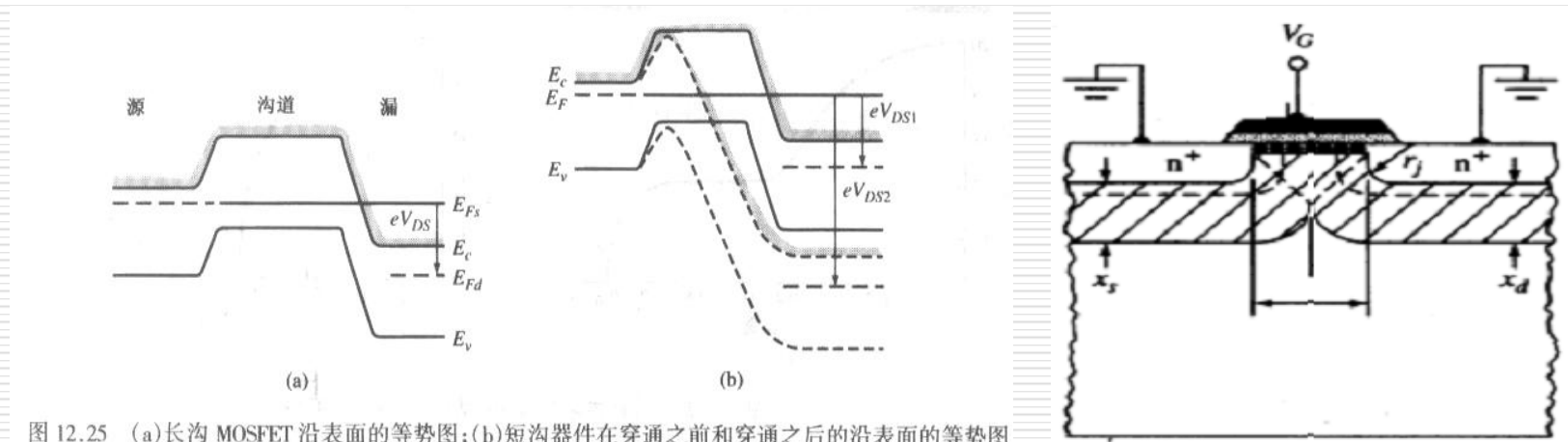
- 物理过程：
  - 反偏压  $V_{DS} \uparrow$ ，势垒高度增加，漏衬耗尽层横向通过沟道向源端扩展
  - 与源衬结空间电荷区相接时，源衬势垒高度降低

# 12.4 击穿特性

## 源漏穿通效应

### □ DIBL:

**Drain Induced Barrier Lowering** 漏致势垒降低



### □ 特点:

- ◆  $V_{DS}$  增, 耗尽层越往源区扩展, 穿通效应增强;
- ◆ 短沟高阻的 **MOSFET** 器件更容易发生
- ◆ 穿通不只发生在衬底表面的沟道区, 沟道下方也会因耗尽层相接穿通

# 12.4 击穿特性

## 源漏穿通效应

### □ 短沟道器件穿通特性曲线

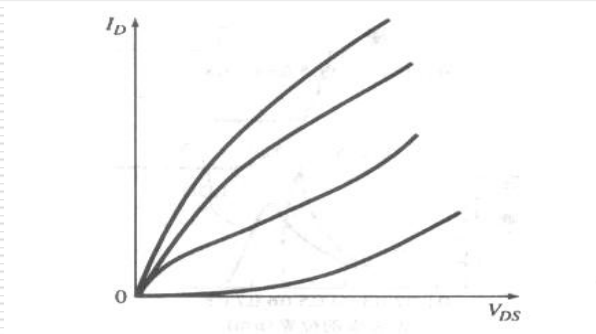
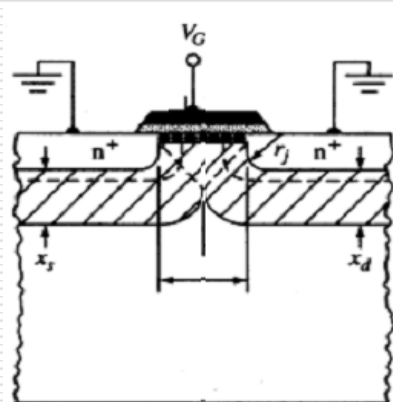


图 12.26 MOSFET 隧穿效应的典型  $I_D - V_{DS}$  特性曲线



- ◆  $V_{GS} < V_T$ ，若发生穿通， $I_D$ 变得和 $V_{DS}$ 相关，无法关断，亚阈特性恶化，器件栅控能力降低；
- ◆  $V_{GS} > V_T$ ，沟道存在，沟道受 $V_{GS}$ 的调控，沟道下方的耗尽层也可发生穿通，形成穿通电流，此电流不受栅压的控制，器件电流的栅控能力降低；
- 穿通电压 $V_{PT}$ ：漏结耗尽层和源衬耗尽层相连时的 $V_{DS}$

$$V_{PT} = \frac{qN_A L^2}{2\epsilon_s} - V_D,$$

$V_D$  : pn结接触电势

# 12.4 击穿特性

需掌握内容

- 各种击穿的物理过程和相关影响因素
- 避免或延缓各种击穿发生的有效措施
- 雪崩倍增效应与漏衬pn结击穿、沟道雪崩击穿和寄生晶体管击穿的关系
- 源漏穿通效应对**I-V**特性和亚阈特性的影响
- **MOSFET**的轻掺杂漏结构

# 12.5 辐射效应

运行在空间的各类人造卫星、航天器会受到地球带电粒子、太阳宇宙射线等各种辐射, 并造成不同程度的损伤。另外, 除天然辐射环境外, 核武器爆炸也会对各种电子系统及元器件构成严重威胁。

### □ 辐射环境:

辐射环境不同, 辐射因素就不同, 对微电子器件影响就不同

### □ 辐射效应:

辐射对材料的作用

### □ **MOSFET**的电离辐射效应:

电离辐射对**MOSFET**的影响

# 12.5 辐射效应

## 辐射环境:空间辐射

空间辐射来自宇宙射线，来自银河系和太阳系的某些星球

□ 地球磁场对外层空间带电粒子的捕获作用，所以地球周围形成了高能粒子组成的环形辐射带

◆ **内辐射带**：距地面**600~6000km**，高能质子（**~100MeV**，影响中低轨道卫星）

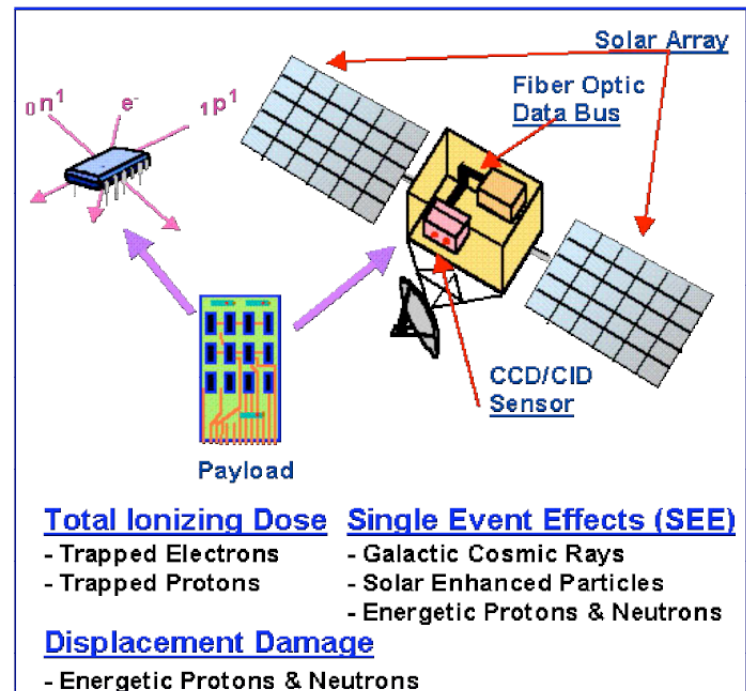
◆ **外辐射带**：距地心**2.万km**，高能电子（**20keV~1.6MeV**），影响高轨道卫星

◆ **累计效应为主**：

➤ 在辐射环境越久，辐射效应越明显

➤ 表示辐射强弱的量：总剂量

➤ 单位：**rad(Si)**，不同材料对辐射的吸收不同，需注明材料





# 12.5 辐射效应

## 辐射环境:核辐射

核辐射：核爆炸环境和核动力环境

□ 核辐射产生的高能粒子：

◆ **快中子流**：能量 $>0.5\text{MeV}$ ，辐射有效半径  
1km~几十km

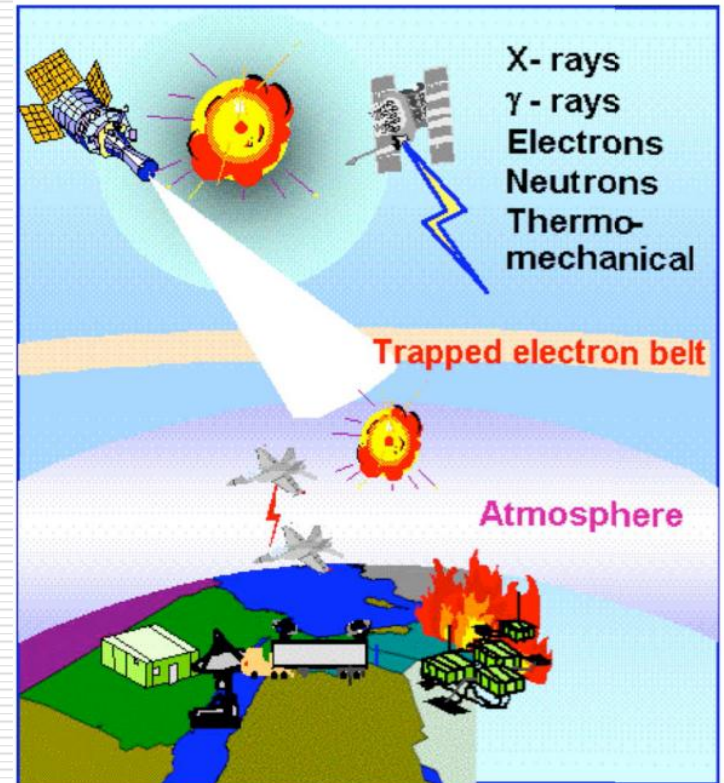
◆  **$\gamma$  射线**：能量 $\sim 1\text{MeV}$ ，辐射有效半径  
3km~几百km

◆ **热电磁脉冲**：电场 $10^5\text{V/m}$ ，磁场 $10^2\text{A/m}$ ，  
 $f=10\text{kHz}\sim 100\text{MHz}$ ，脉冲间隔 $10\sim 30\text{ns}$

◆ **瞬态效应为主**：

➤ 表示辐射强弱的量：剂量率--单位时间内  
材料吸收的能量

➤ 单位： $\text{rad}(\text{Si})/\text{s}$



# 12.5 辐射效应

## 辐射物理效应:位移效应

□ 辐射粒子与晶格原子碰撞→产生空位、间隙原子

□ 中子辐射造成的位移效应显著:

中子不带电, 能量大, 穿透能力强

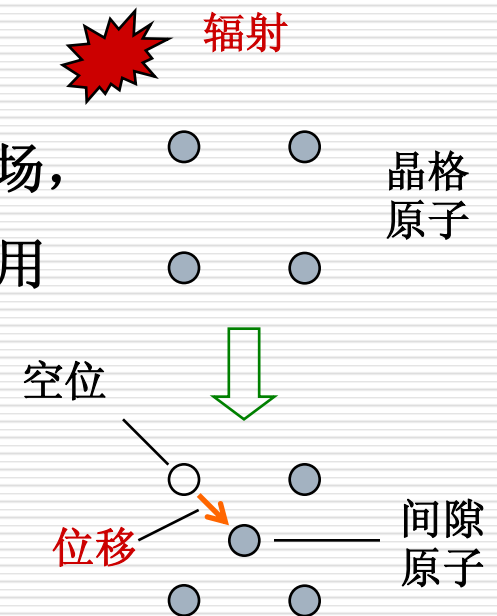
□ 位移效应会破坏晶体材料的晶格结构和周期性的势场, 在禁带中引入新的电子能级, 新能级能起到以下作用

◆ 复合中心→少子寿命↓

◆ 杂质补偿中心→多子浓度↓ →电阻率↑

◆ 散射中心→载流子迁移率↓

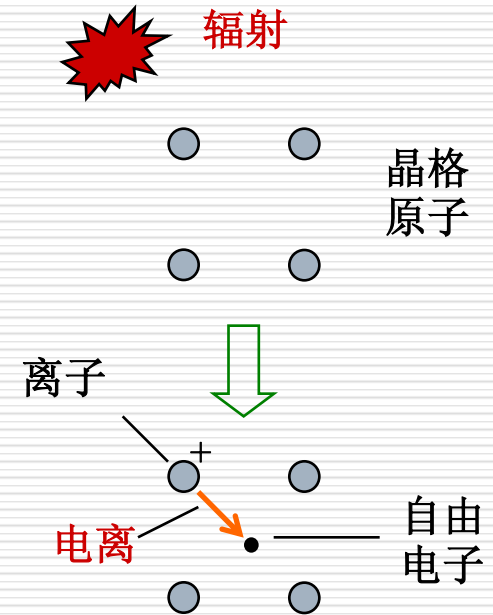
□ 永久性损伤: 去掉辐射源, 材料不可恢复



# 12.5 辐射效应

## 辐射物理效应:电离效应

- 辐射粒子和电子相互作用→产生了自由电子、带电离子
- $\gamma$  射线容易引起电离效应
- 对硅器件影响，引入表面缺陷，产生
  - ◆ 氧化层正电荷
  - ◆ Si-SiO<sub>2</sub>界面陷阱
- 半掉永久性损伤和瞬时损伤:



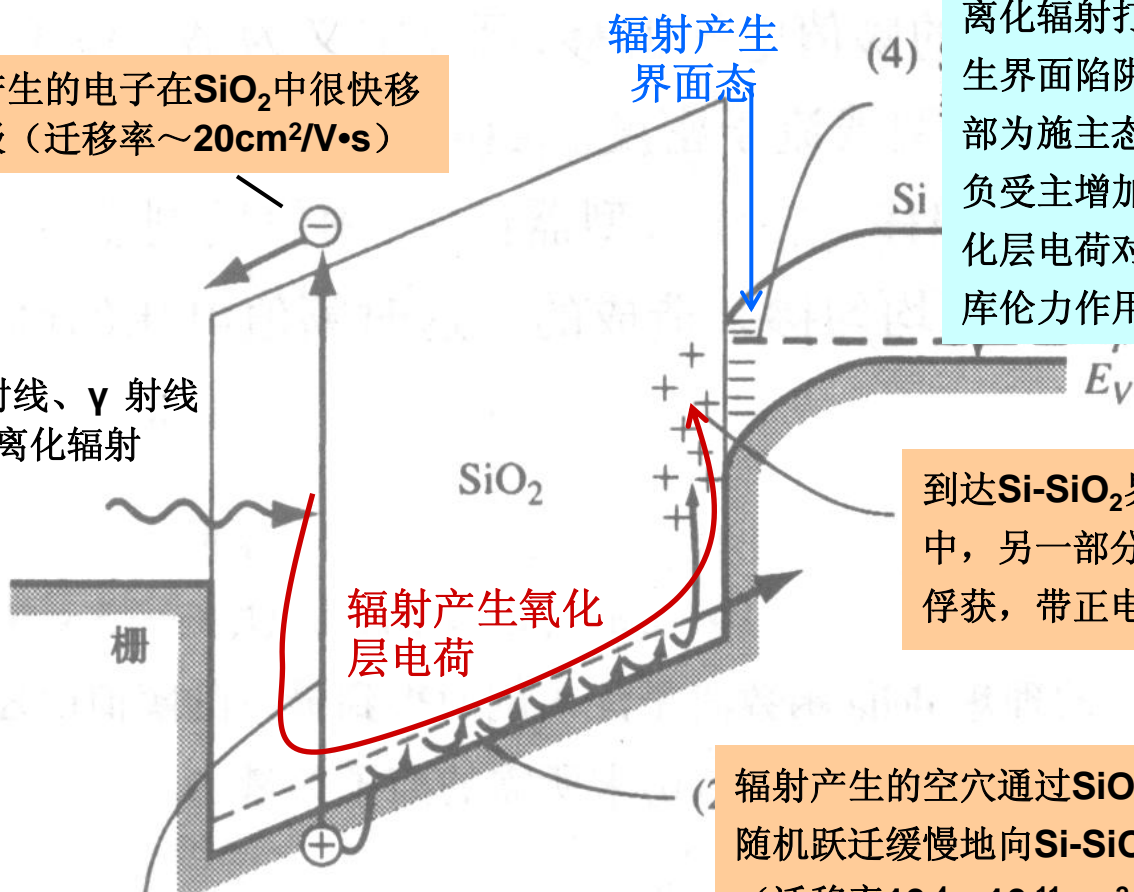
辐射源去掉后，经过一段时间或采取措施，缺陷会消失一部分，或自行恢复

# 12.5 辐射效应

## MOSFET的辐射效应

辐射产生的电子在SiO<sub>2</sub>中很快移出栅极（迁移率~20cm<sup>2</sup>/V·s）

x射线、γ射线等  
电离化辐射



辐射产生氧化层电荷

辐射产生界面态

电离辐射打开Si-SiO<sub>2</sub>界面的饱和键，产生界面陷阱，增加界面态密度。在禁带下部为施主态，上部为受主态。反型状态下，负受主增加，可部分补偿辐射引入的正氧化层电荷对V<sub>T</sub>的影响。与导电载流子有库伦力作用，迁移率下降。

到达Si-SiO<sub>2</sub>界面的空穴一部分注入Si中，另一部分被界面附近的空穴陷阱所俘获，带正电，使V<sub>T</sub>向负方向移动

x射线、γ射线等电离化辐射将SiO<sub>2</sub>中的电子-空穴对打开，同时产生自由电子和自由空穴

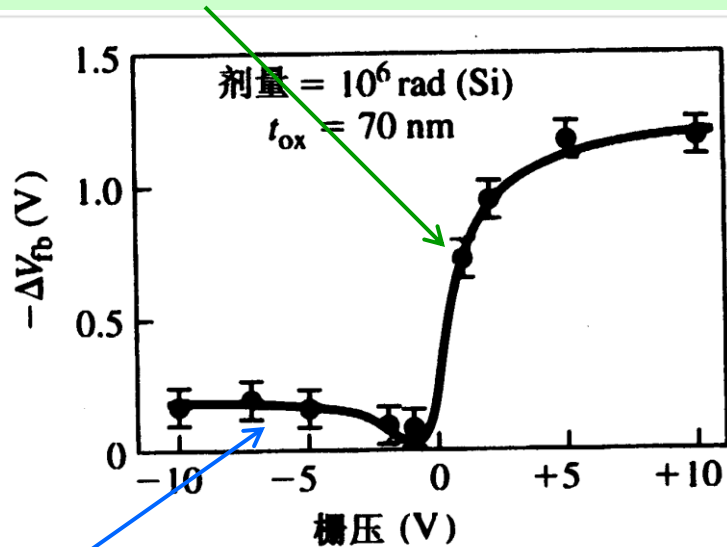
辐射产生的空穴通过SiO<sub>2</sub>定域态的随机跃迁缓慢地向Si-SiO<sub>2</sub>界面移动（迁移率10<sup>-4</sup>~10<sup>-11</sup>cm<sup>2</sup>/V·s）

p型衬底n沟道正栅压MOSFET

# 12.5 辐射效应

## 辐射产生氧化层电荷:特性1

- ◆ 正栅压下，辐射引入的空穴向硅一侧移动，且栅压 $V_G \uparrow \rightarrow$ 中途未被复合而最终到达Si-SiO<sub>2</sub>界面附近且被陷阱俘获的空穴数 $\uparrow \rightarrow$ 引入的附加正电荷量 $\uparrow \rightarrow$ 平带电压漂移量 $|\Delta V_{fb}| \uparrow$ ，负向变化有负号

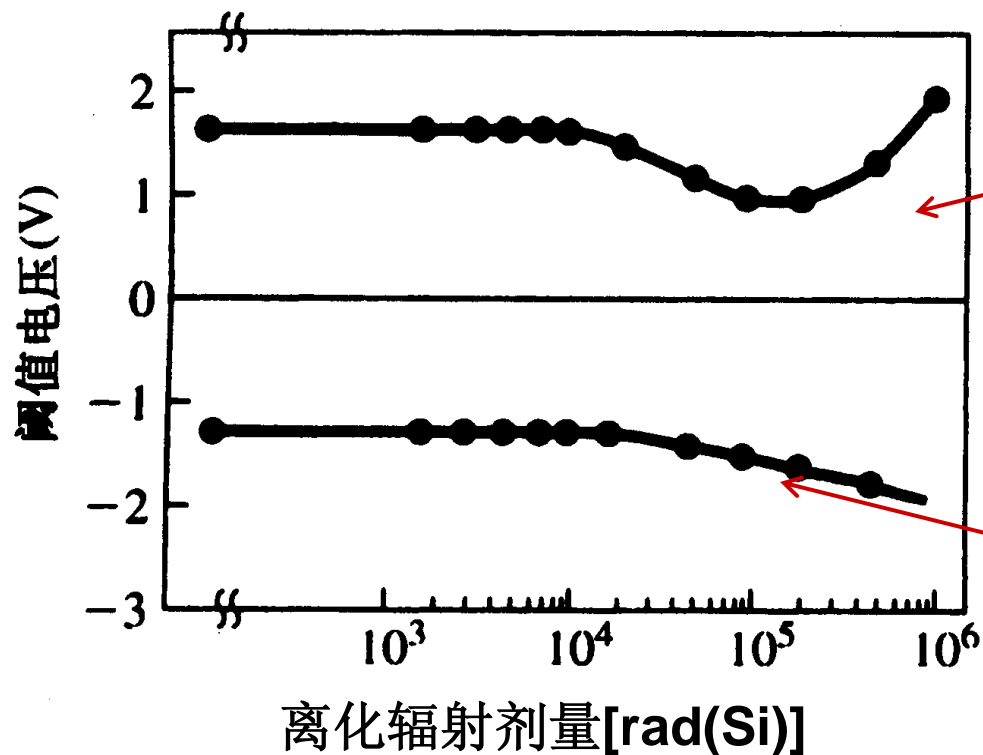


- 当Si-SiO<sub>2</sub>界面附近的空穴陷阱全被占据时，平带电压漂移量趋于饱和：
  - 多余的空穴不再被俘获，流入硅中

- ◆ 负栅压下，辐射引入的空穴向栅极一侧移动 $\rightarrow$ 引入附加正电荷的作用较弱，且基本不随 $V_G$ 的变化而变化。

# 12.5 辐射效应

## 辐射产生氧化层电荷:特性2



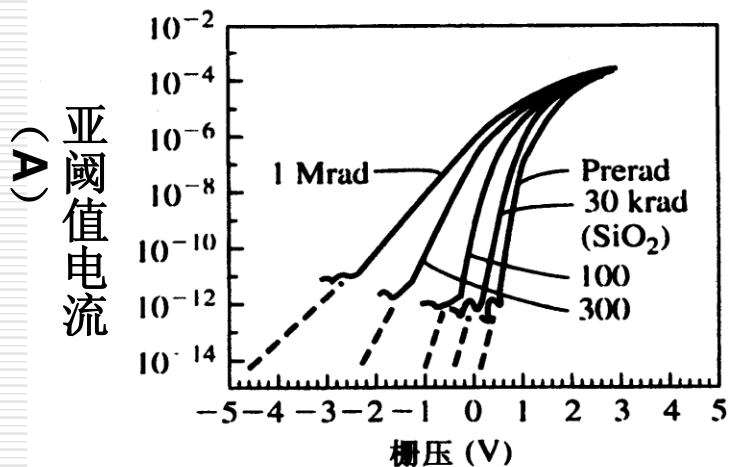
◆ **n沟道MOSFET**: 导通电压为正栅压, 故辐射产生氧化层电荷的效果强,  $V_T$ 左移。

◆ 辐射总剂量越大, 则引入的界面态, 界面态密度增大, 负受主增多,  $V_T$ 右移增加

◆ **p沟道MOSFET**: 导通电压为负栅压, 引入的空穴向栅极一侧移动, 故辐射产生氧化层电荷的效果弱

# 12.5 辐射效应

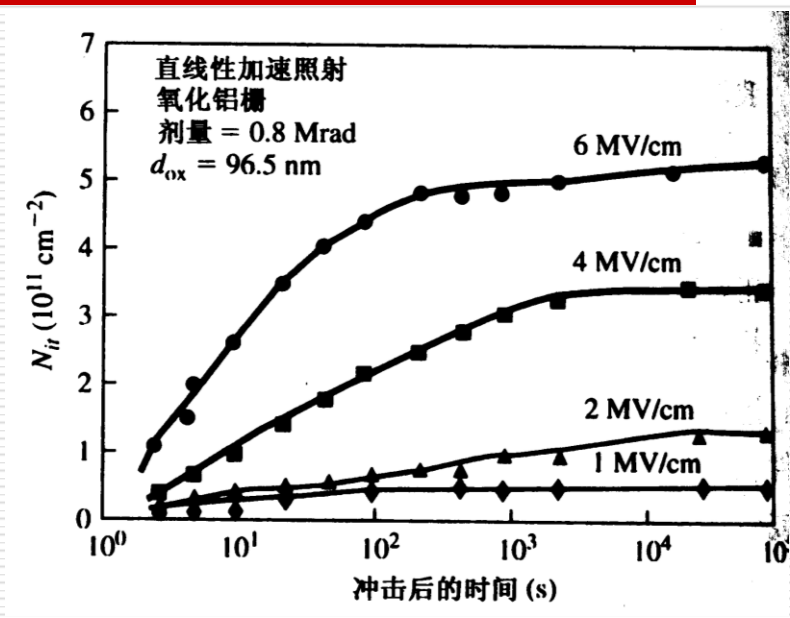
## 辐射产生界面态:特性1



- 不同的辐射计量下亚阈值电流和栅压的关系
- 在亚阈值区， $I_D$ - $V_{GS}$  曲线的斜率是界面态密度的函数
- ◆ 带电的界面态密度改变，会改变同栅压下半导体表面的电荷

# 12.5 辐射效应

## 辐射产生界面态:特性2

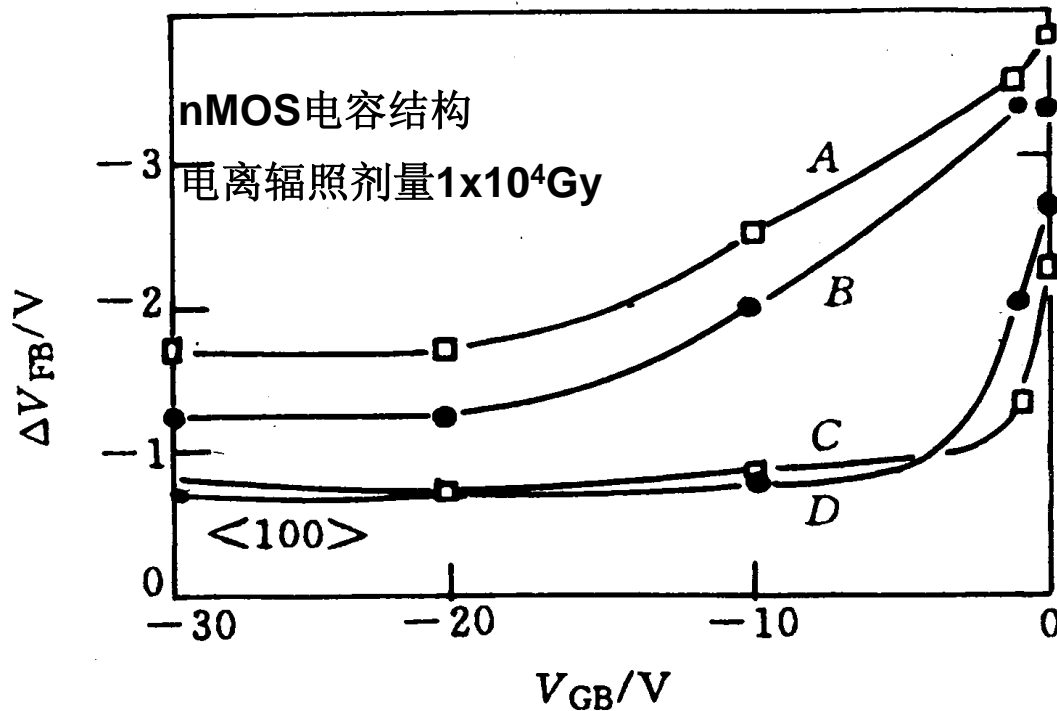


- 在界面态密度 $N_{it}$ 随氧化层 $E_{ox}$ 和时间 $t$ 的变化曲线
- ◆ 离化辐照后，界面态密度逐渐上升，并在100~1000s后达到其稳定值
- ◆  $E_{ox}$ 增，饱和的 $N_{it}$ 增，上升越快：  
电子、空穴迁移快，中途未被复合到达界面的空穴增多，  
界面态很快饱和



# 12.5 辐射效应

## 辐射加固设计1

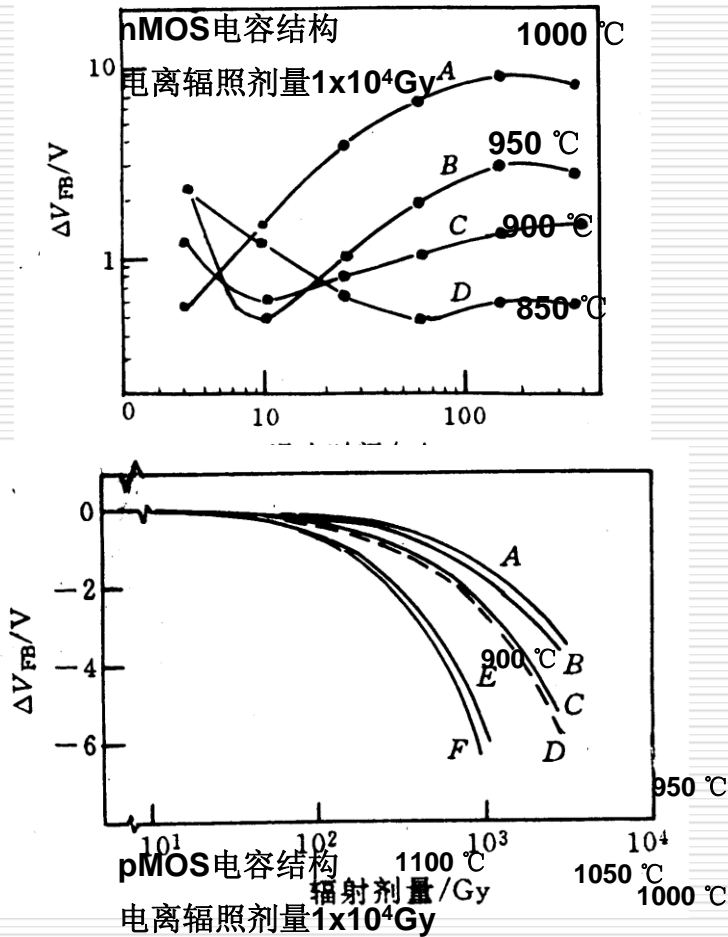


A— $\langle 111 \rangle$ , 900°C退火; B— $\langle 111 \rangle$ 未退火;  
C— $\langle 100 \rangle$ , 900°C退火; D— $\langle 100 \rangle$ 未退火。

- ❑ 晶向：采用 $\langle 100 \rangle$ 而非 $\langle 111 \rangle$ 作为MOS器件的衬底晶向
- ❑ 氧化后退火：900°C  $\text{N}_2$ 气氛下的氧化后退火，在较低栅压下有效
- ❑ 牺牲氧化：即先在硅片上生长一层很厚的氧化层，然后刻蚀掉并进行HCl蒸汽化学处理后，再做标准的栅氧化层工艺

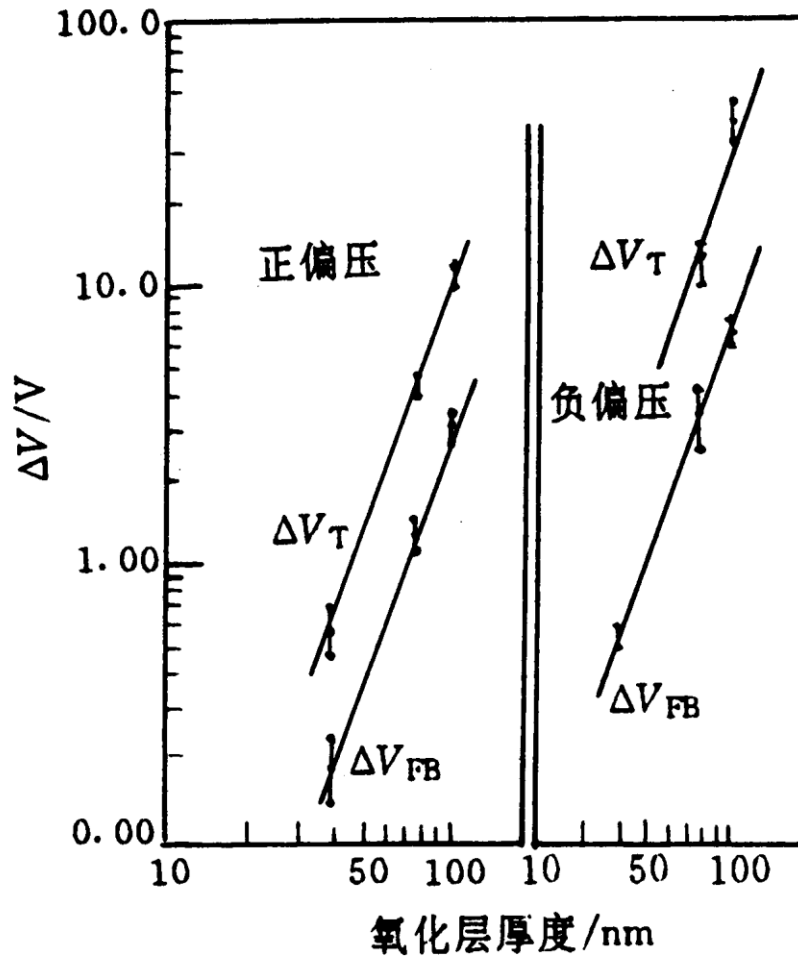
# 12.5 辐射效应

## 辐射加固设计2



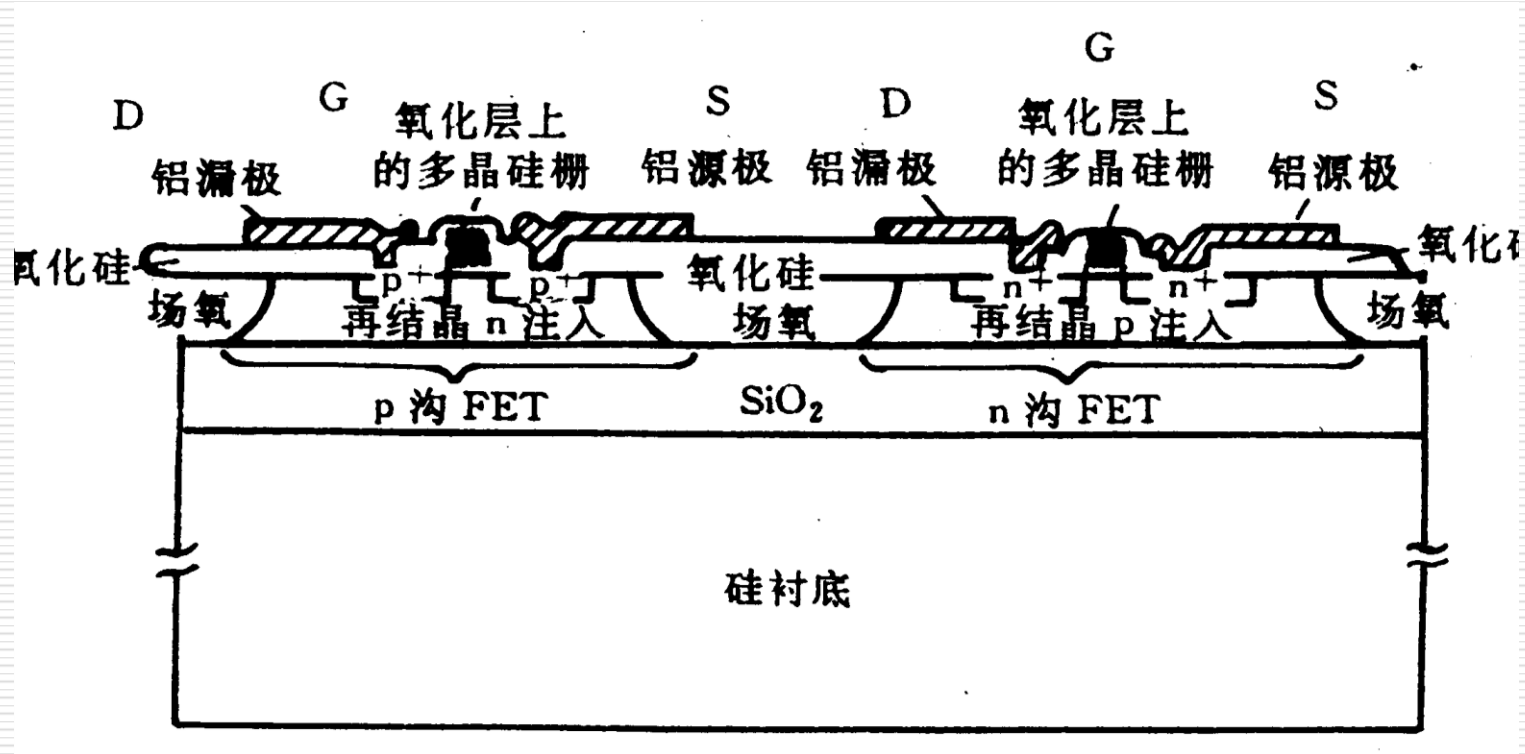
- 氧化方法：在干氧化、湿氧化、水汽氧化中，**1000 °C**的干氧化最佳。干氧化时尽量避免掺氯
- 氧化后退火气氛：**N<sub>2</sub>**、**Ar**退火有利于抗辐照，**H<sub>2</sub>**退火不利于抗辐照
- 最佳退火温度与时间：因氧化层而异，干氧化的最佳条件是不高于**850 °C**，**90min**；水汽氧化的最佳条件是**900 °C**，**30min**

# 12.5 辐射效应



- 减少栅氧化层厚度有利于抗辐照，因为辐射引起的阈值电压漂移与栅氧化层的厚度成正比
- **MOS**器件尺寸的按比例缩小有利于抗辐照

# 12.5 辐射效应



- 采用绝缘材料（如CMOS/SOI、CMOS/SOS）等取代硅材料作为衬底,可实现完全的介质隔离，pn结面积小，不存在任何寄生晶体管，产生的光电流可比硅衬底小三个数量级

# 12.6 热载流子效应

**MOSFET**的缩小是非理想的按比例缩小，内部**E**随**L**、**t<sub>ox</sub>**减小增加，易诱发热载流子效应

- 热载流子定义
- 热载流子类型
- 抗热载流子措施：轻掺杂漏结构

# 12.6 热载流子效应

## 什么是热载流子？

### □ 热载流子

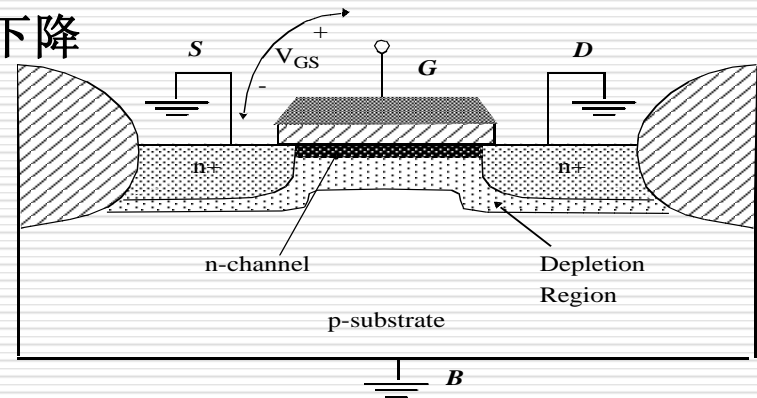
- ◆ 热载流子有效温度 $T_e$ 高，若环境温度为 $T$ ，则
- ◆ 平均能量 ( $kT_e$ ) 大于晶格能量 ( $kT$ ) 的载流子
- ◆ 大的能量主要从电场获得

### □ 热载流子效应：热流子对器件特性的影响

- ◆ 热载流子越过 $\text{Si-SiO}_2$ 界面势垒注入到 $\text{SiO}_2$ 层中，被氧化层陷阱俘获，**氧化层电荷**变化
- ◆ 高能载流子越过界面时，会产生**界面态**，使界面陷阱电荷变化
- 使器件 $V_T$ 漂移，表面散射增强，使**迁移率**下降
- ◆ 或者被栅极收集，形成**栅电流**

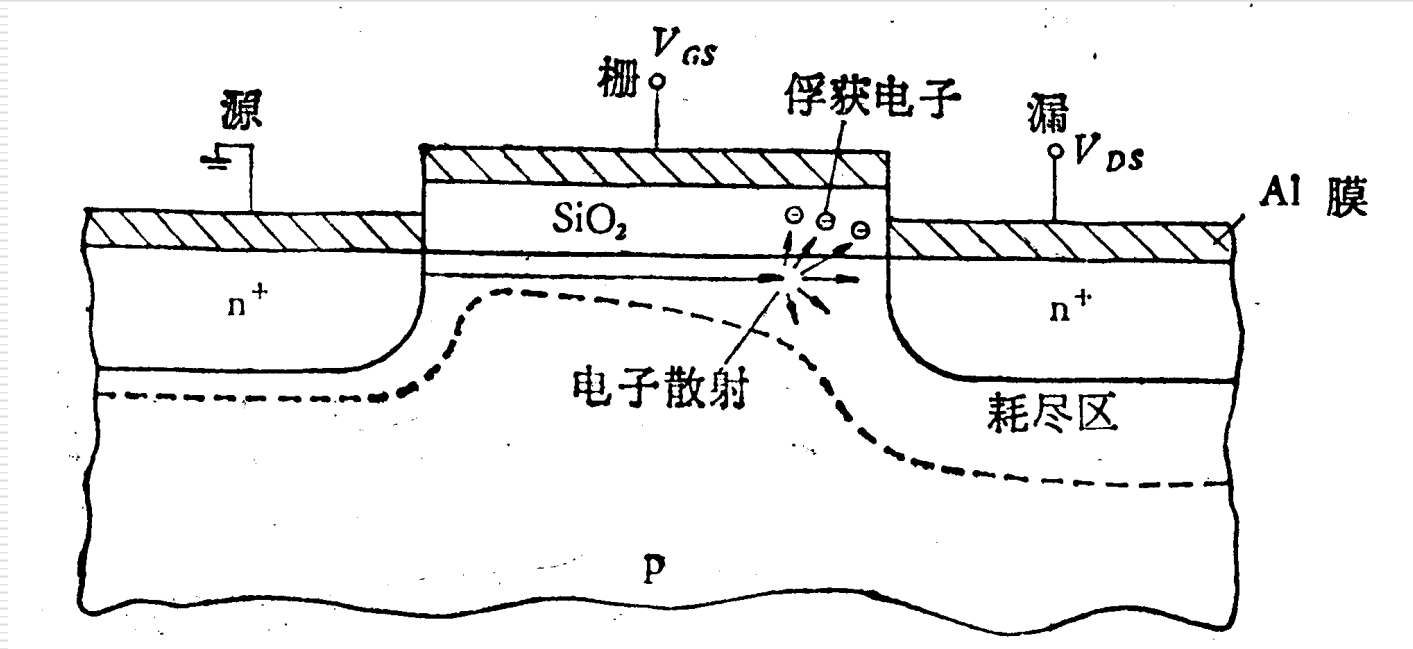
### □ 热载流子效应特点：

- ◆ 是一连续过程，器件经过一段时间会衰退
- ◆ 短沟器件更容易发生此效应



# 12.6 热载流子效应

## 沟道热载流子效应 (CHE)

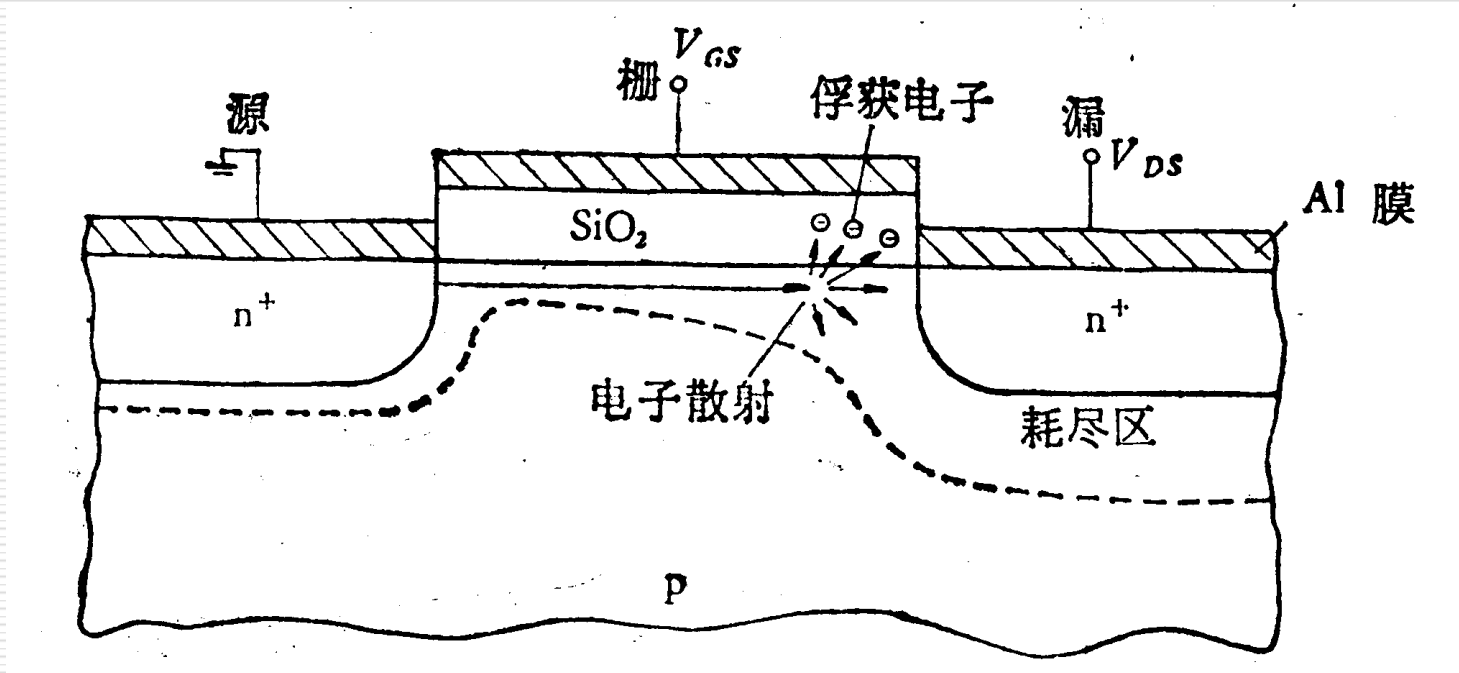


**CHE: Channel Hot Electron**

$V_{DS}$ 产生的横向沟道电场加速沟道电子→在漏结附近达到临界能量成为热电子→→热电子注入 $SiO_2$  (形成栅电流 $I_g$ )

# 12.6 热载流子效应

雪崩热载流子效应 AHC



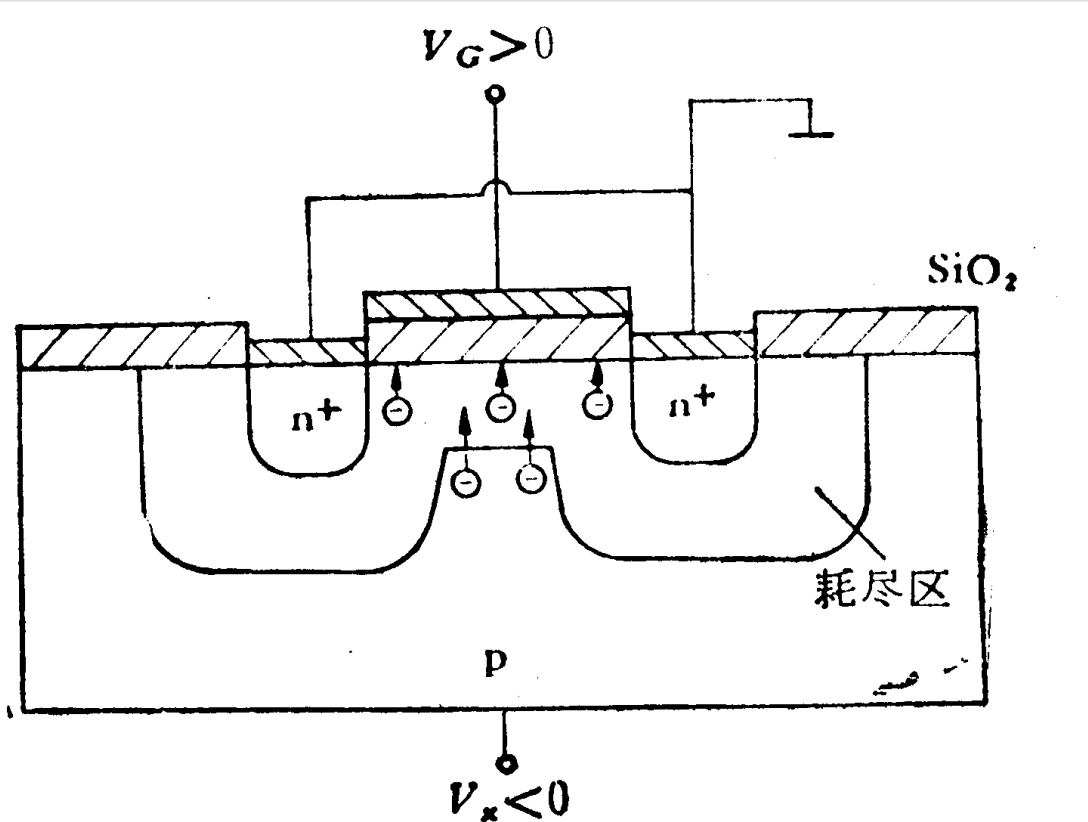
AHC: Avalanche Hot Carrier

横向沟道电场加速沟道电子→在漏结附近达到临界能量成为热电子→碰撞电离（雪崩倍增）→热电子部分被漏收集，一部分注入SiO<sub>2</sub>（形成栅电流I<sub>g</sub>），热空穴注入衬底（形成衬底电流I<sub>sub</sub>）



# 12.6 热载流子效应

## 衬底热载流子效应



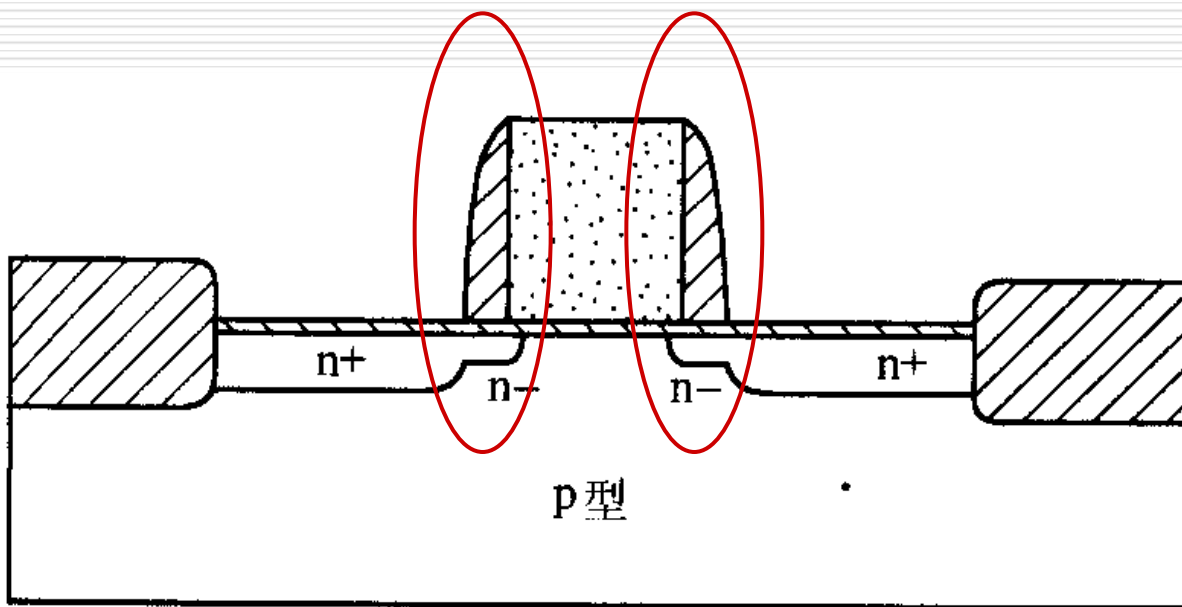
$V_{GS}$ 和 $V_{BS}$ 纵向耗尽层电场  $\uparrow$   $\rightarrow$  耗尽层内产生热电子，并注入SiO<sub>2</sub>

**SHE: Substrate Hot Electron**

# 12.6 热载流子效应

## LDD结构:作用

- 结构：在沟道的漏端及源端增加低掺杂区，降低了沟道端口处的掺杂浓度及掺杂浓度的分布梯度
- 作用：降低沟道中漏附近的电场，提高FET抗热载流子能力

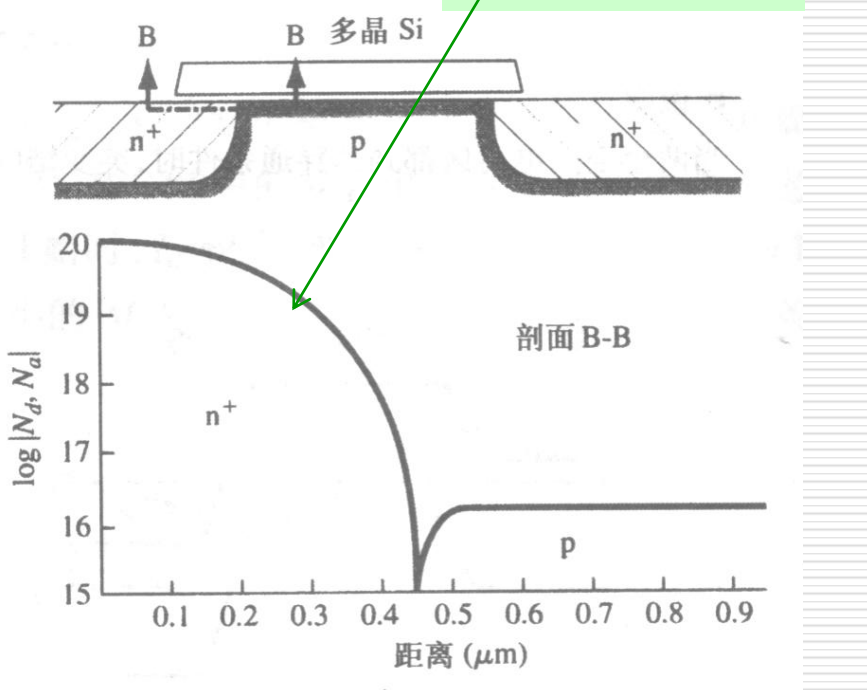


(a) LDD FET结构

# 12.6 热载流子效应

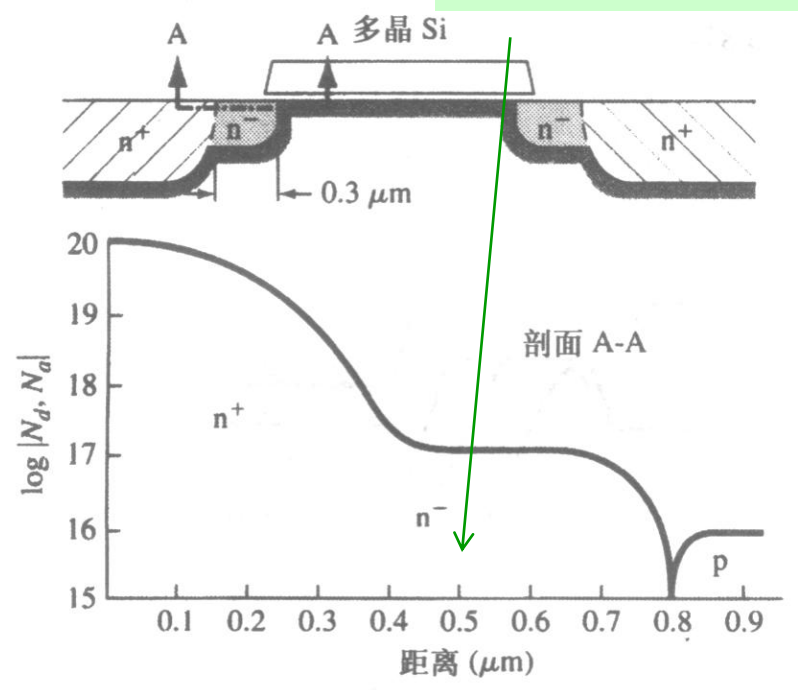
## LDD结构:掺杂分布

漏区掺杂浓度较高  
且分布梯度较陡



传统结构

漏区掺杂浓度较低且  
分布梯度较缓

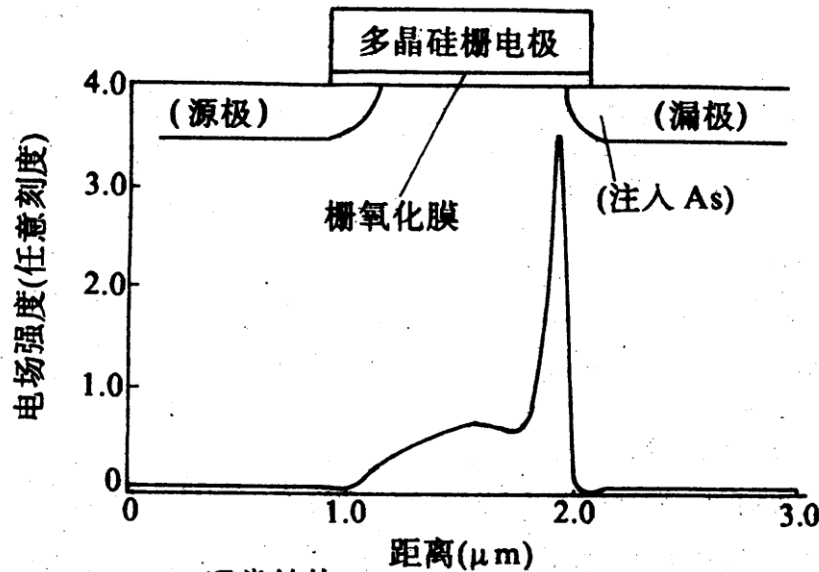


LDD结构

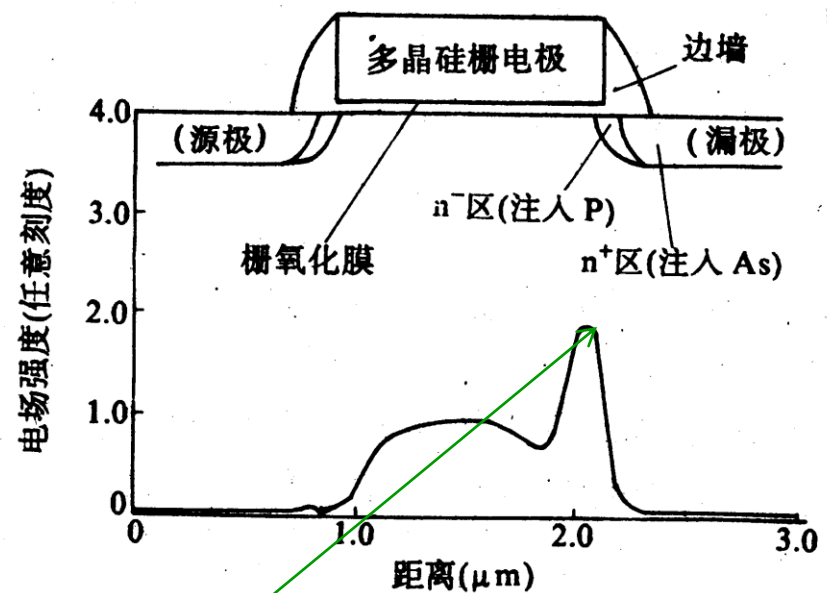
- LDD结构: 漏区掺杂浓度较低且分布梯度较缓, 降低沟道中漏附近的电场
- ◆ 电力线不易集中, 电场减小

# 12.6 热载流子效应

## LDD结构: 电场分布



传统结构



降低了电场峰值及分布梯度

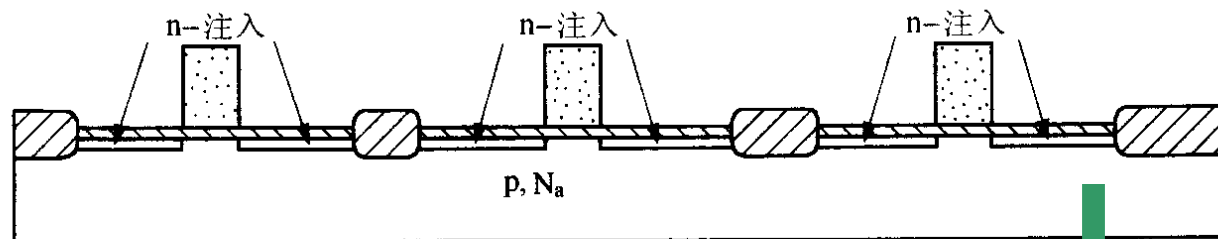
LDD结构

- LDD结构: 降低沟道中漏附近的电场, 好处: 提高了器件的可靠性
- ◆ 提高FET抗热载流子能力,
- ◆ 减缓雪崩击穿效应, 寄生双极晶体管击穿效应

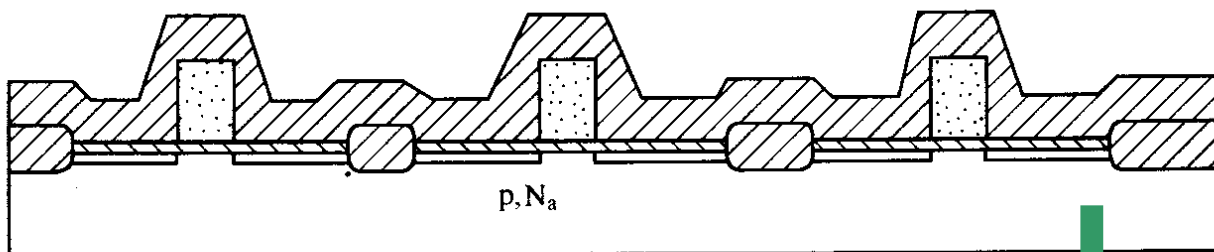
# 12.6 热载流子效应

## LDD结构:工艺1

- LDD缺点:
- 增加了工艺复杂度和源漏串联电阻
- 在源区与漏区一样也做了轻掺杂结构: 降低了工艺成本, 增加了串联电阻



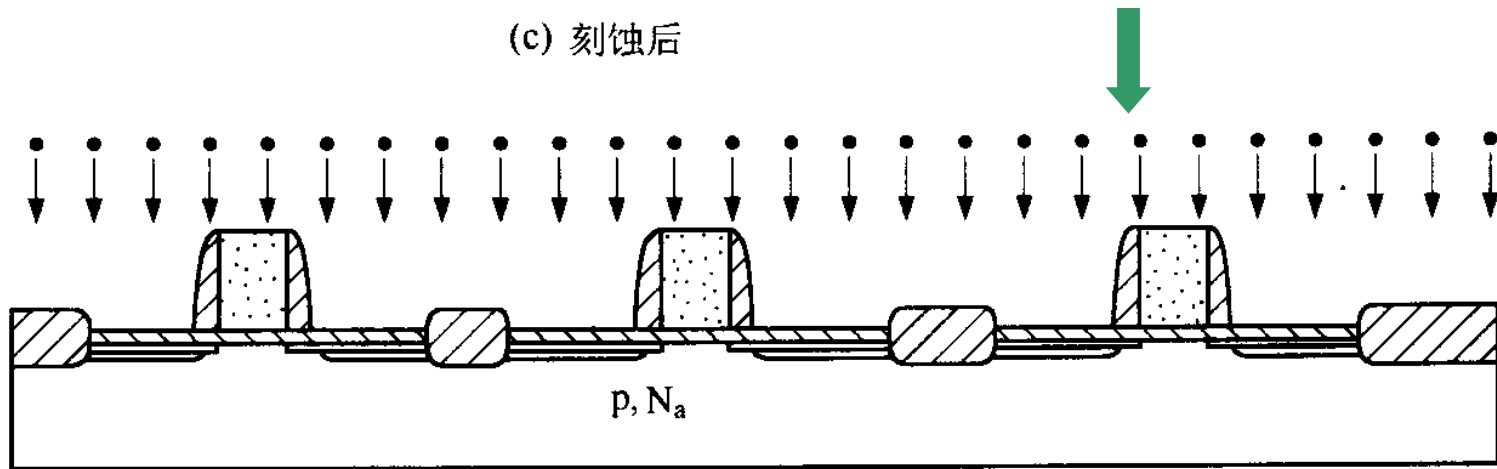
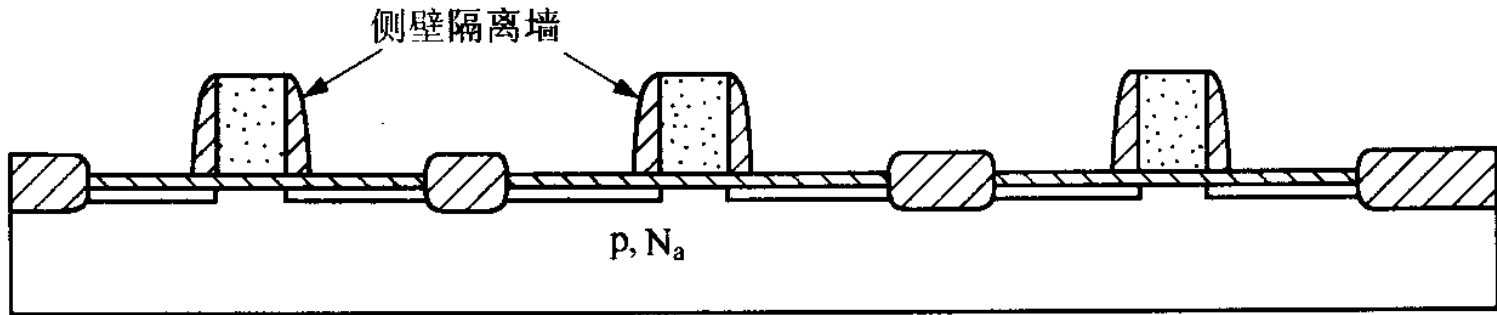
(a) 轻(n-)注入



(b) 覆盖氧化层

# 12.6 热载流子效应

## LDD结构:工艺2



# 12.6 热载流子效应

需掌握内容

- 热载流子定义和类型
- 热载流子效应对**MOSFET**器件特性的影响
- 抗热载流子措施：轻掺杂漏结构的特点及抗热载流子效应的原因
- 轻掺杂漏形成的简单工艺流程

# 12.6 小结

---

- 摩尔定律和利润竞争规则要求器件尺寸不断缩小。
- ◆ 恒定电压按比例缩小
- ◆ 恒定电场按比例缩小
- ◆ 恒定电场按比例缩小后器件结构参数和特性的变化
- ◆ 实际中参数按照不同比例缩小
- 器件尺寸缩小后不得不面对短沟效应。
- ◆ 沟道变短造成长沟时可以忽略（因为所占比重较小）的效应发生
- ◆ 短沟道造成的强电场引发的短沟效应
- ◆ 亚阈特性的变化



# 12.6小结

变短造成长沟时可以忽略的效应发生

---

- 阈值电压的短沟效应

(源漏耗尽区对栅控电荷的影响不可忽略)

- 阈值电压的窄沟效应

(沟道宽度方向的附加空间电荷区不可忽略)

- 沟道长度调制效应

(有效沟道长度的降低不可忽略)

- 源漏穿通造成夹不断，亚阈特性变差

# 12.6小结

## 短沟道造成的强电场引发的短沟效应

- 强场引起速度饱和

(速度饱和后的 **$IV$** 、 **$g_m$** 、 **$f_T$** 表达式)

- 弹道效应

(载流子速度大于饱和速度， **$IV$**  关系)

- 强场造成碰撞电离引发沟道雪崩击穿

(雪崩效应与其他击穿机理的联系)

- 强场引起热载流子效应

(热载流子注入栅氧化层造成氧化层电荷和界面态)

# 12.6小结

- 氧化层变薄，
- ◆ 氧化层击穿电压下降
- ◆ 栅电压造成的表面迁移率的下降更明显
- 亚阈电流的特点：
  - ◆ 长沟时：扩散电流是电流主要组成，与栅电压呈指数关系，在漏压大于 $3kT/q$ 后与漏压无关。
  - ◆ 短沟时：源漏穿通效应的影响，亚阈电流与漏压相关，亚阈电流增大。

# 12.7小结

□ **MOSFET**的几个简单公式:

$$I_D = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} [2(V_{GS} - V_T)V_{DS} - V_{DS}^2]$$

$$I_{D(sat)} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$I_{D(sat)} = \frac{W\mu_n C_{ox}}{2L} (V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$I_D(sat) = WC_{ox}(V_{GS} - V_T)v_{sat}$$

# 12.7 小结

- **MOSFET功能：**开关放大。
- **性能指标：**评价器件功能的好坏  
跨导，截止频率，击穿电压，饱和漏电流。
- **可靠性：**器件的寿命。  
器件的环境适应性，（辐射、高温、高湿、振动、温变）
- **MOSFET在弱反型区存在所谓“亚阈值电流”。**该电流与栅源电压呈指数关系。
- **MOSFET在饱和区的有效沟道长度随漏源电压的增加而增加，**导致漏源电流略微增加，形成所谓“沟道长度调制效应”。此效应在短沟道和低掺杂衬底中才显著。
- **沟道迁移率随沟道横向电场和纵向电场的增加而下降。**在强的横向电场下，载流子在沟道中的漂移速度将会达到饱和，此时漏源电流与栅源电压呈线性关系

- 缩小**MOSFET**尺寸可以提高集成度和工作速度。器件尺寸与工作电压按同样比例缩小较为理想，但难以实现。
- 在短沟道和窄沟道条件下，阈值电压会随沟道长度和沟道宽度的变化而变化。在实际工艺中常采用离子注入来调整阈值电压。
- 栅源介质击穿和漏体pn结击穿是**MOSFET**主要击穿机构。短沟道器件可能会出现沟道雪崩倍增，引发寄生晶体管效应或热电子效应。
- 离化辐照会引入氧化层电荷和界面态，导致阈值电压漂移和迁移率退化。

END

---

# 第12章 MOSFET进阶