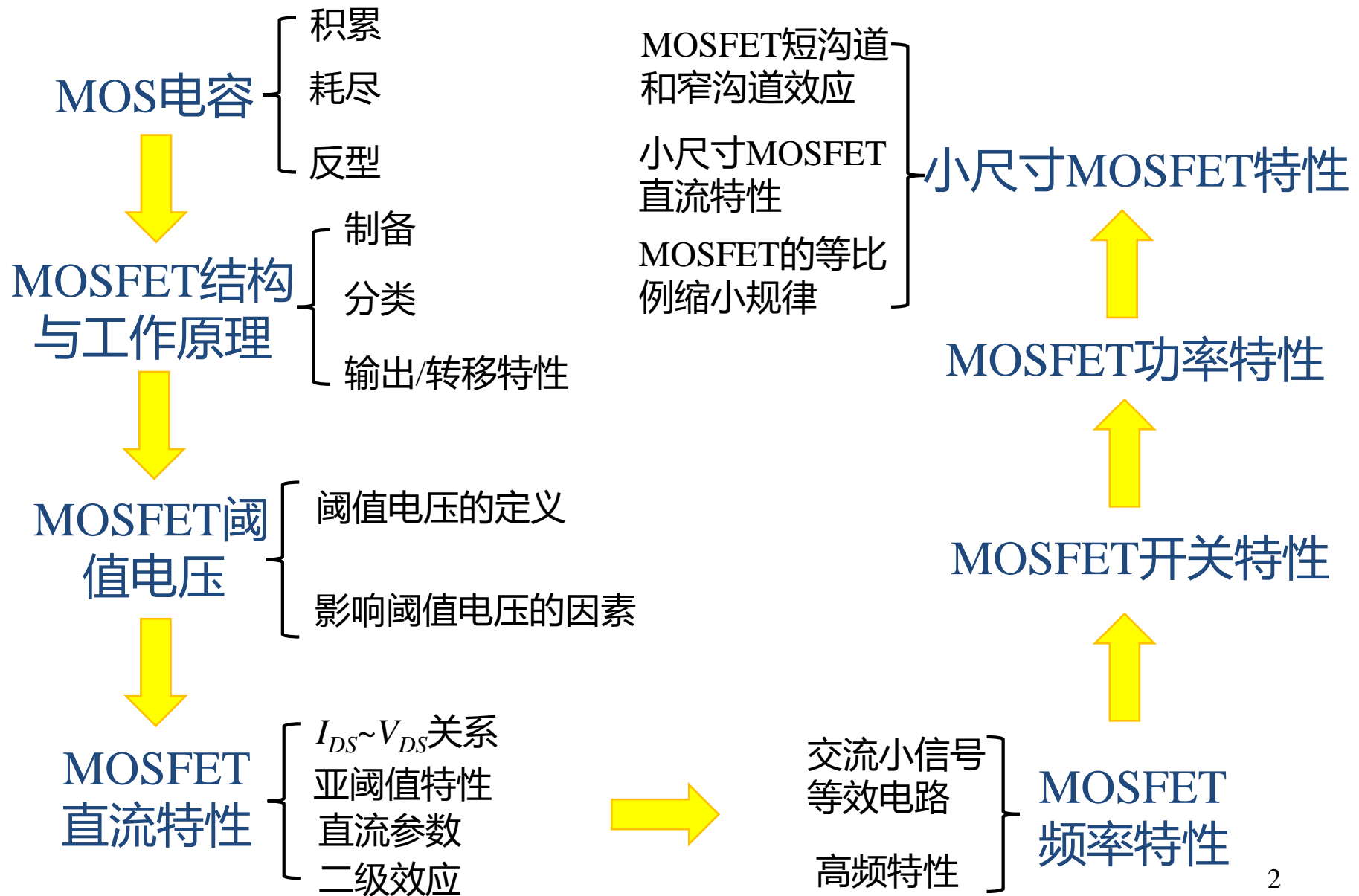


# 第五章 金属-氧化物-半导体场效应晶体管 (MOSFET)

- §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

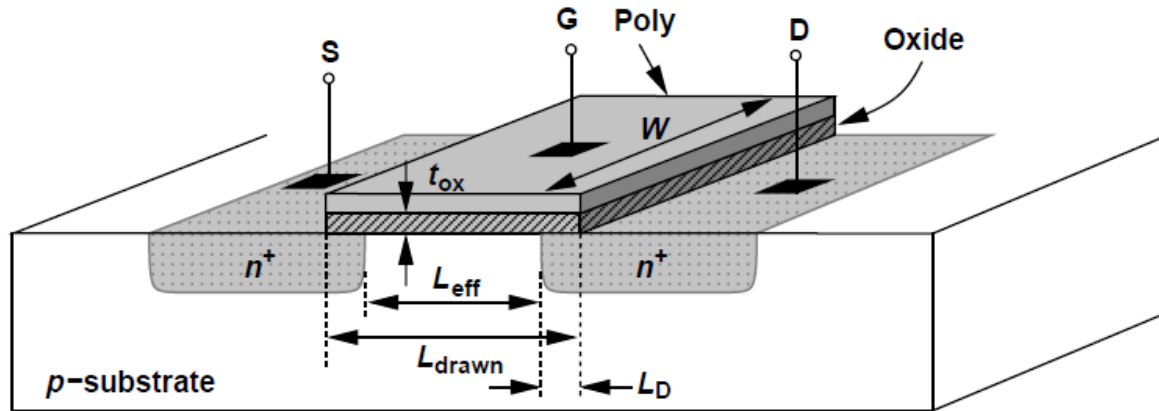
# MOSFET基本知识体系框架



# MOSFET结构

Metal-Oxide-Semiconductor Filed-Effect-Transistor

一种载流子导电  
电压控制器件



- n型MOS是在p型衬底上制备n掺的源极 (S) 和漏极 (D)
  - 栅极：高掺多晶硅 (poly) → 金属 (Metal)
  - 源极：提供载流子
  - 漏极：收集载流子

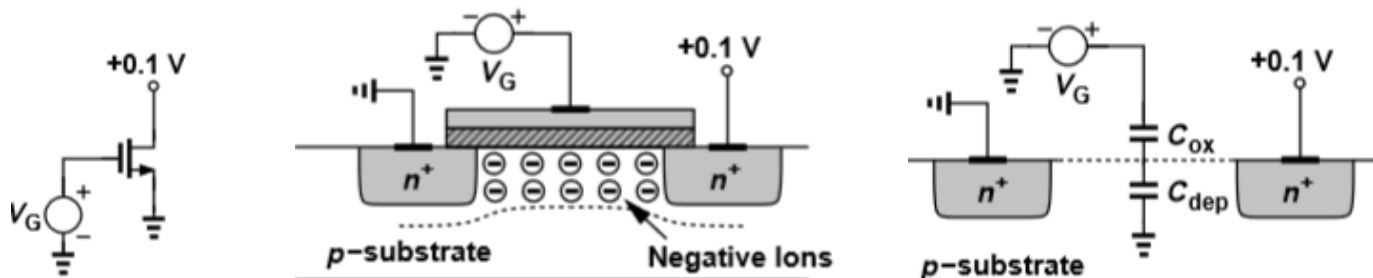
**对称性  $\leftrightarrow$  S/D 可互换**
- $L$ ：沟道长度 

**Feature Size 特征尺寸**

  - S/D结制备存在“横向扩散”： $L_{\text{eff}} = L_{\text{drawn}} - 2L_D$
- $W$ ：沟道宽度

# 基本原理

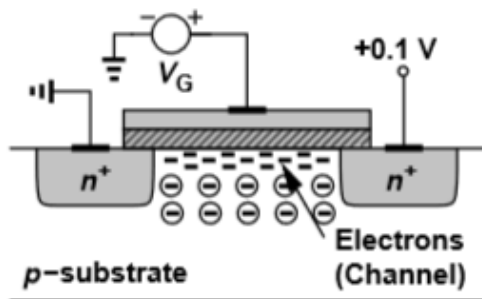
耗尽:



## ● 耗尽层

- $V_G$  增大  $\rightarrow$  耗尽层的宽度增大, 介质氧化物-硅界面的电势增大
- 没有可移动载流子, 无电流流动
- 电压驱动:  $C_{ox}$  和  $C_{dep}$  串联

反型:



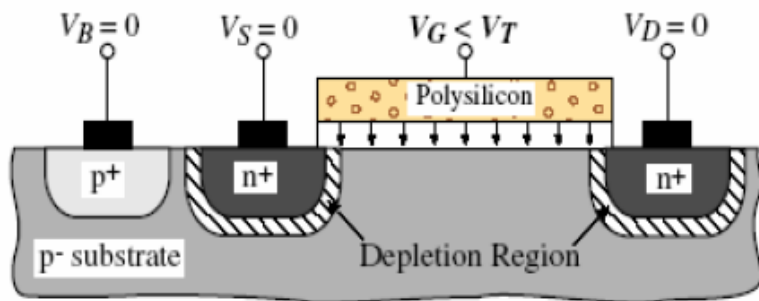
## ● 反型层

- ✓ 电子从源极流向界面最终到漏极
- ✓ 栅极下方, S和D之间形成载流子沟道
- ✓ 耗尽区电荷保持相对恒定, 而沟道电荷密度持续增加

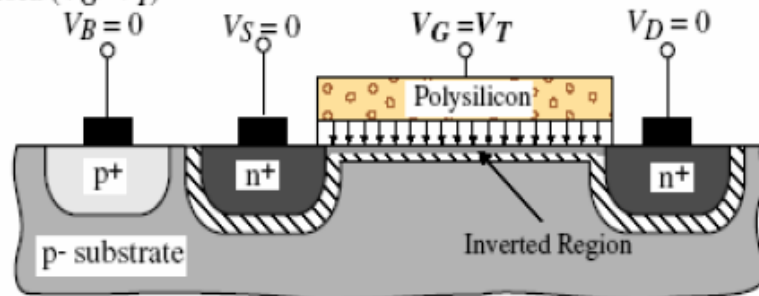
发生反型的 $V_G$ 就是阈值电压 $V_{TH}$

# 工作状态

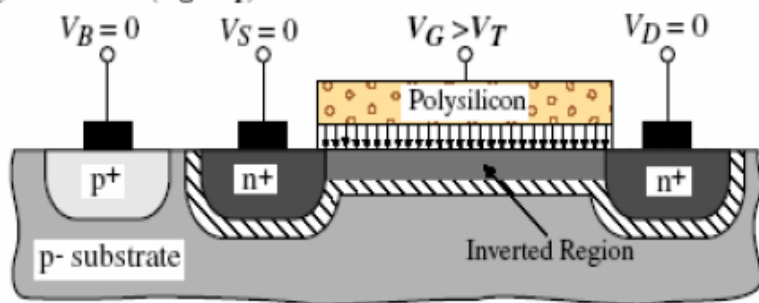
Subthreshold ( $V_G < V_T$ )



Threshold ( $V_G = V_T$ )



Strong Threshold ( $V_G > V_T$ )



■ 以NMOS为例：D和S接地

①  $V_G < 0$ ,  
空穴在硅表面积累

②  $0 < V_G < V_{TH}$   
硅表面耗尽：表面只有固定的负电荷

③  $V_G > V_{TH}$   
硅表面反型：自由电子吸引到硅表面

■ 强反型条件：  
栅极下硅表面反型层的载流子浓度  
= 衬底掺杂浓度

# MOSFET vs. BJT

	MOSFET	BJT
调节方式	电场调节作用	少子注入→扩散→收集
主要用途	开关作用(增强/耗尽)	放大作用
控制方式	电压控制器件	电流控制器件
载流子种类	一种载流子(单极)	两种载流子(双极)
阻抗	输入阻抗高 MOS→绝缘体 $>10^9\Omega$	输入阻抗低 (pn结正偏, 共射~k $\Omega$ )
稳定性	噪声低, 稳定性好 (抗辐照能力强)	噪声高, 稳定性差(辐照产生缺陷为复合中心, 降低少子寿命)
工艺	工艺要求高	工艺要求较低
频率	频率范围小, 功耗低	高频大功率
集成度	集成度高	集成度低

# MOSFET主要发展历程

## MOSFET的诞生:

二战后,  
贝尔实验室W.  
Schokley进行  
FET实验研究

1953年,  
W. Schokley在实  
验室研制成功原  
理型JFET

1930年,  
J. E. Lilienfeld  
提出FET的概念

1947年,  
贝尔实验室  
Schokley, J.  
Bardeen和W. H.  
Brattain发明Point-  
contact transistor

1960年,  
美国仙童半导体  
公司和无线电公  
司发明MOSFET

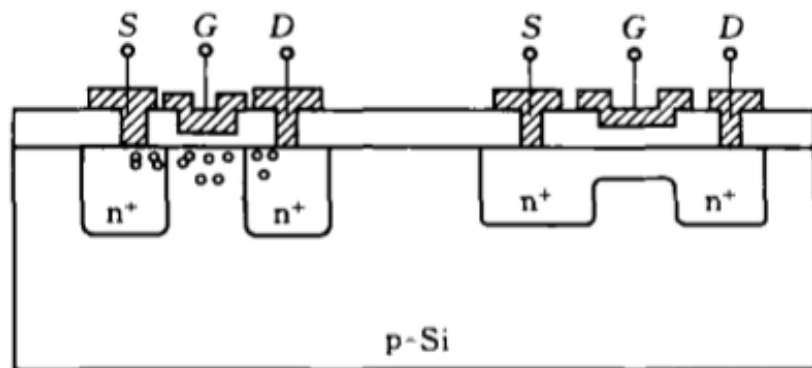
# MOSFET分类

根据MOSFET沟道的特征，可以将其分为四种。

NMOS：这种管子衬底为P型，源漏为 $n^+$ 区，导电沟道为N型，故称为NMOS。

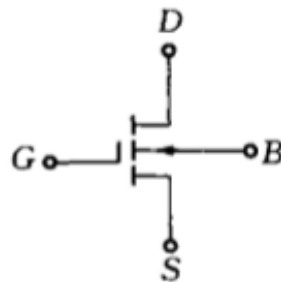
(1) N沟增强型：在栅压为零时，P型半导体表面不存在导电沟道，只有在栅极加了一定的正压且达到 $V_T$ 时，N型沟道才形成，这种器件称为N沟增强型MOSFET。

(2) N沟耗尽型：若栅极未加任何电压时，N型导电沟道就已经存在，这种管子称为N沟耗尽型MOSFET。

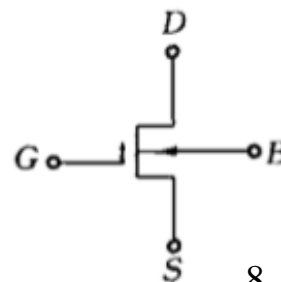


n沟增强型

n沟耗尽型



增强型



耗尽型

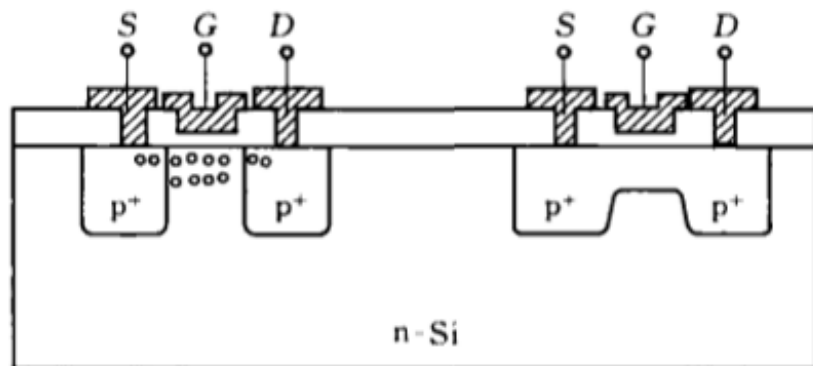


# MOSFET分类

PMOS:这种管子源漏为 $p^+$ 区，衬底为N型半导体，导电沟道为P型，故称为PMOS。

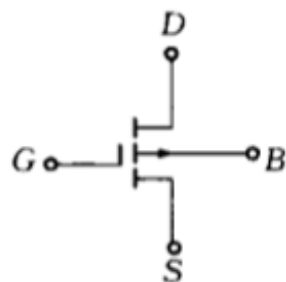
(3) P沟增强型：在栅压为零时，N型半导体表面不存在导电沟道，只有在栅极加了一定的负偏压且达到 $V_T$ 时，P型沟道才形成，这种MOS管称为P沟增强型管。

(4) P沟耗尽型：若栅极未加任何电压时，P型导电沟道就已经存在，这种管子称为P沟耗尽型MOSFET。

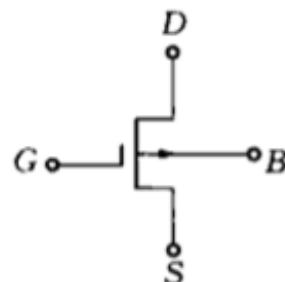


p沟增强型

p沟耗尽型

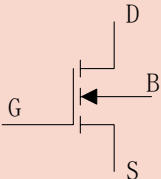
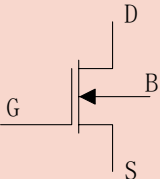
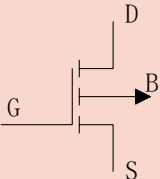
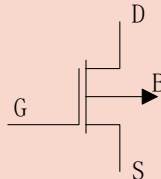


增强型



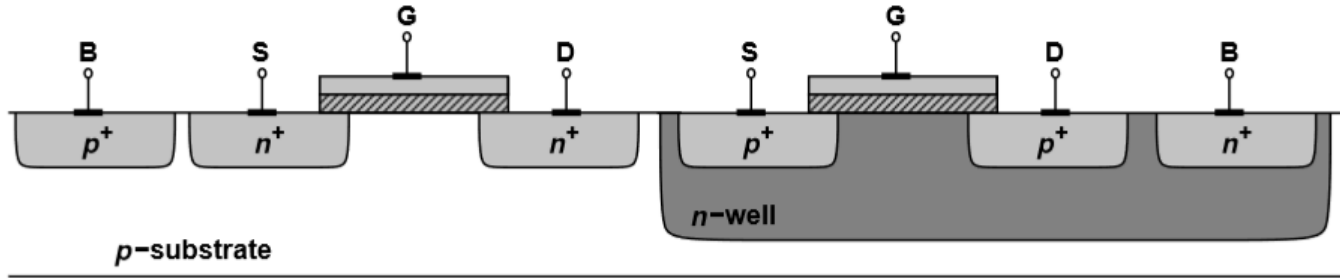
耗尽型

# MOSFET分类

	nMOSFET		pMOSFET	
	增强型	耗尽型	增强型	耗尽型
衬底掺杂类型	p		n	
源漏掺杂类型	n <sup>+</sup>		p <sup>+</sup>	
导电载流子	电子		空穴	
导通时V <sub>ds</sub> 极性	+		-	
导通时I <sub>ds</sub> 方向	D->S		S->D	
载流子运动方向	S->D		S->D	
V <sub>t</sub> 极性	+	-	-	+
表示符号				

# CMOS

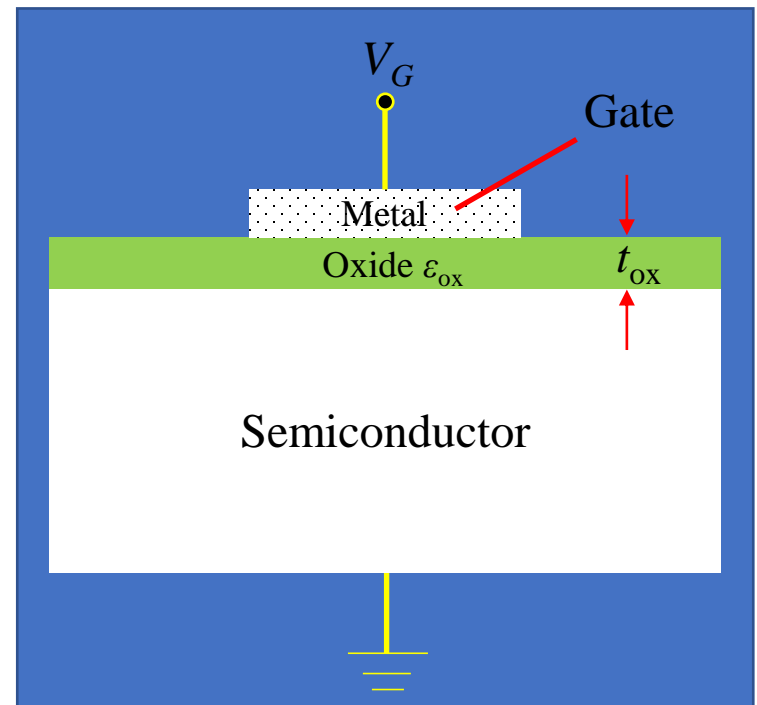
Complementary Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor



- 四个终端：Body (Bulk)
  - 衬底电势极大地影响器件特性。
- 通常，S/D 结二极管是反向偏置的，并且 NMOS 衬底连接到系统中最负电源。
- 在 CMOS 技术中，需要同时有 NMOS 和 PMOS 并且在同一晶圆上制造。
  - PMOS 是在 n 阱 (n-well) 上制备的且 n 阱连接到最正的电压源。
  - NMOS 共享一个衬底端，PMOS 有各自的衬底端。

# MOS结构与MOS电容

- ◆ 所谓MOS结构，如图所示，就是由金属-氧化物-半导体 (Metal-Oxide-Semiconductor)构成的一种类似于**平板电容器**的电容结构，其中金属通常称为**栅电极 (Gate)**，半导体作为衬底材料，氧化物称为**绝缘栅介质**。
- ◆ MOS结构作为**电容**的应用并不十分广泛，但它是**MOS晶体管**的核心。MOS晶体管已成为集成电路中的主流半导体器件，深入研究MOS结构对于理解MOS晶体管原理具有重要意义。
- ◆ MOS电容参数：氧化层厚度 $t_{ox}$ ，介电常数 $\epsilon_{ox}$

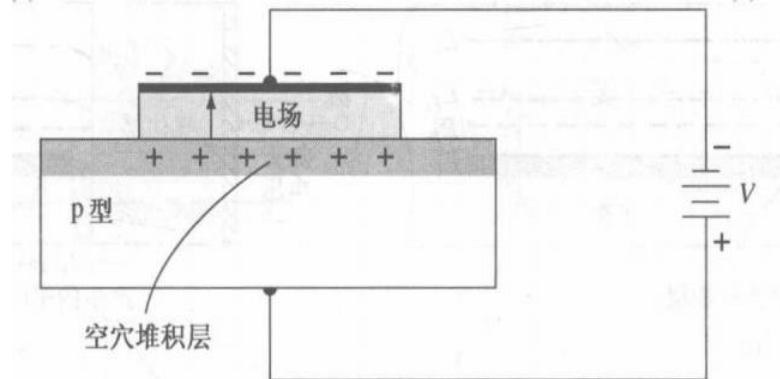
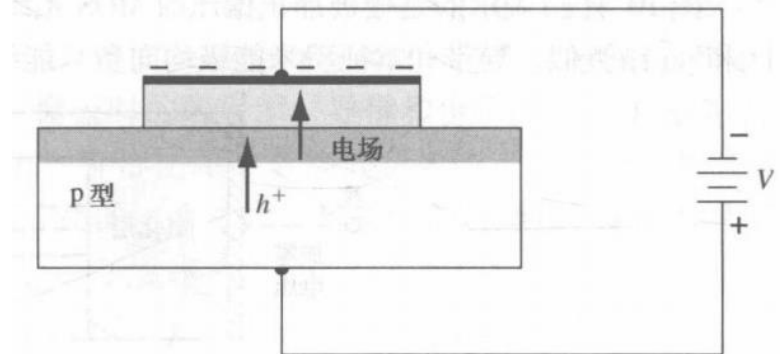
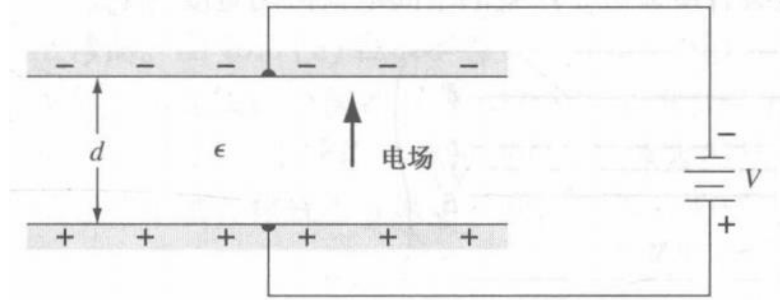


# MOS结构与MOS电容

## MOS电容与平板电容类比：

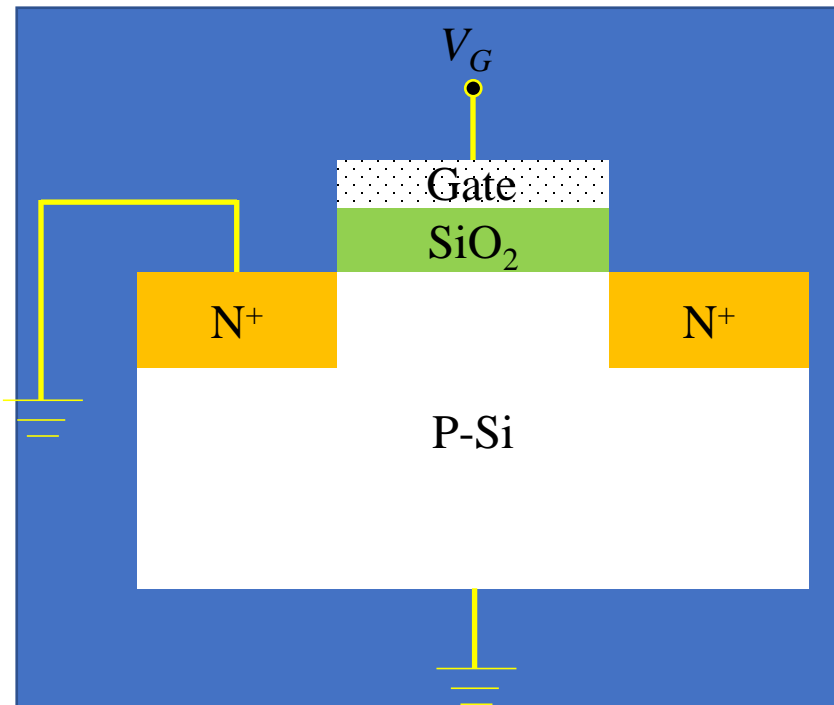
与平板电容类似，金属一侧类似于平板电容上极板，半导体一侧类似于平板电容下极板。

当在金属一端加负偏压，会在半导体一侧感应出正电荷；  
相反，当在金属一端加正偏压，半导体一侧会感应出负电荷。



# MOS结构与MOS电容

- ◆ 以NMOS为例（之后除非有特别说明，我们都是以NMOS为例），如图所示为一个MOS晶体管的简化结构示意图，它实际上就是一个MOS电容外加两个PN结构成的，MOS电容两侧的两个N<sup>+</sup>掺杂区称作MOS晶体管的源、漏区，它们提供器件中载流子的来源和泄放通路。本小节主要学习MOS电容在不同偏压下的三种状态。



## MOS晶体管:

- ◆ 纵向：M-O-S电容结构
- ◆ 横向：源-沟道-漏结构 (Source-Channel-Drain)

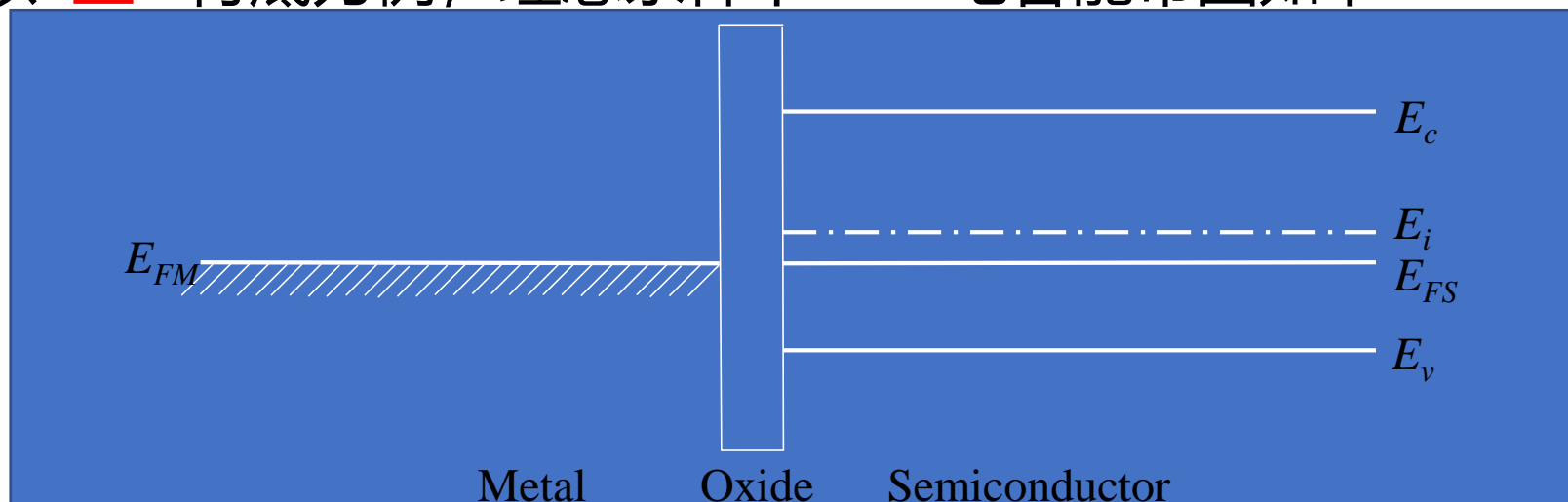
# MOS结构与MOS电容

## MOS电容在不同偏压下的三种状态:

理想条件假设:

- (1) 金属与半导体间功函数差为零 ( $q\phi_{ms}=0$ )
- (2) 在绝缘层内没有任何电荷 ( $Q_{ox}=0$ ) 且绝缘层完全不导电
- (3) 绝缘体与半导体界面处不存在任何界面态 ( $Q_{ss}=0$ )

以P型Si衬底为例, 理想条件下MOS电容能带图如下:

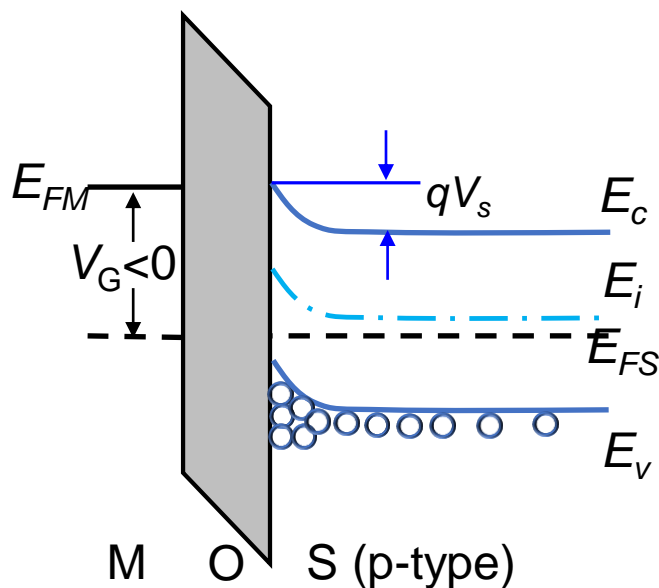


热平衡态MOS结构能带图,  $W_{FM} = W_{FS}$ ,  $E_{FM} = E_{FS}$

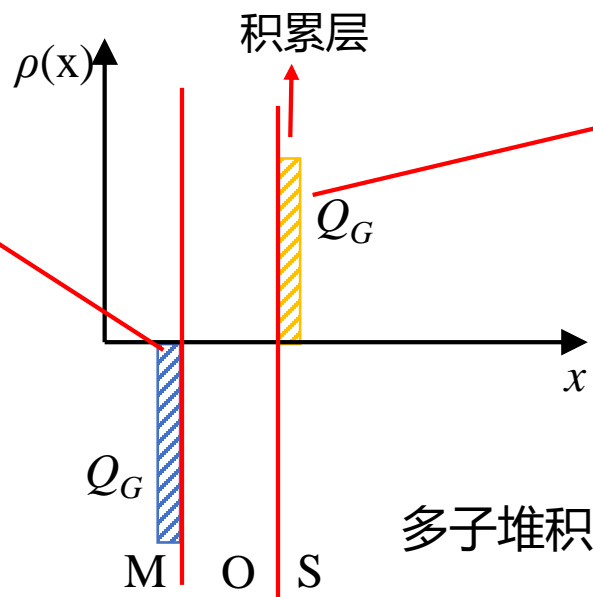
# MOS结构与MOS电容

在外加偏压下MOS电容能带和p型半导体表面电荷状态:

① 当MOS电容加**反向偏压**（金属加负压）时，半导体能带相对金属向下移，表面处能带向上弯曲，表面势 $V_s < 0$ （ $qV_s$ 为半导体表面相对于体内的电势能差），达到稳定后，半导体内费米能级 $E_F$ 保持定值，故随着向表面接近，价带顶 $E_v$ 将逐渐移近甚至高过 $E_F$ ，价带中空穴浓度也将随之增加，这样表面就会出现**空穴堆积**，同时越接近表面，空穴浓度越高。



② 由于半导体-绝缘体界面处正电荷的存在，在金属-绝缘体界面感应成一层负电荷



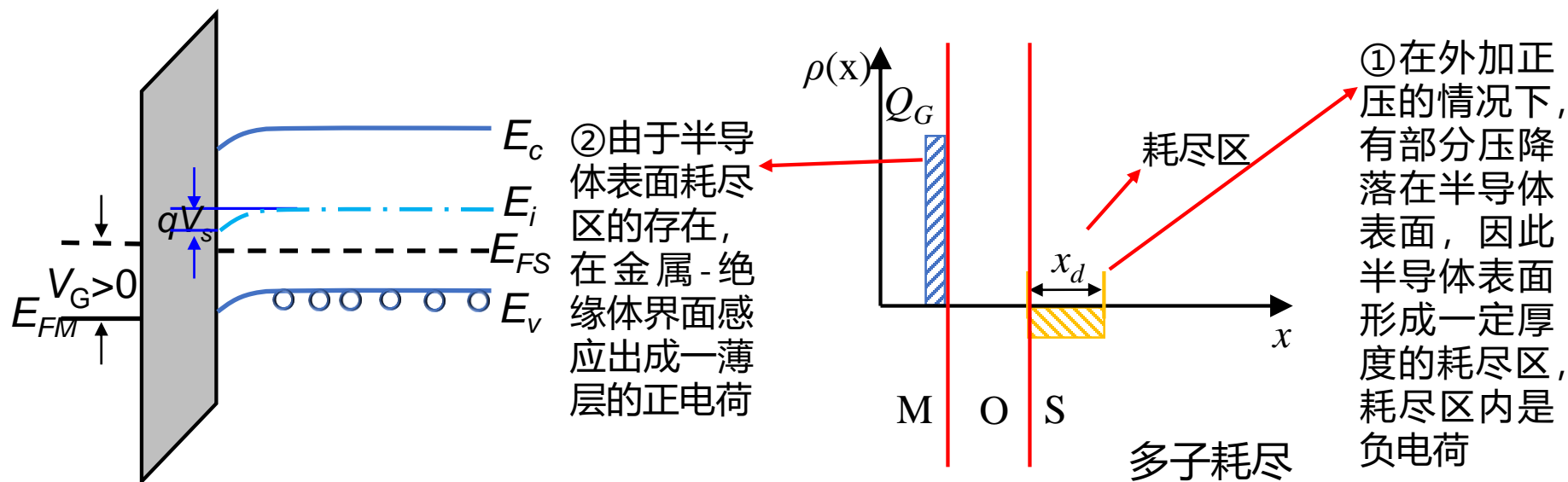
① 在外加负偏压的情况下，有部分压降落在半导体表面，因此半导体-绝缘体界面处形成一薄层的正电荷



# MOS结构与MOS电容

在外加偏压下MOS电容能带和p型半导体表面电荷状态:

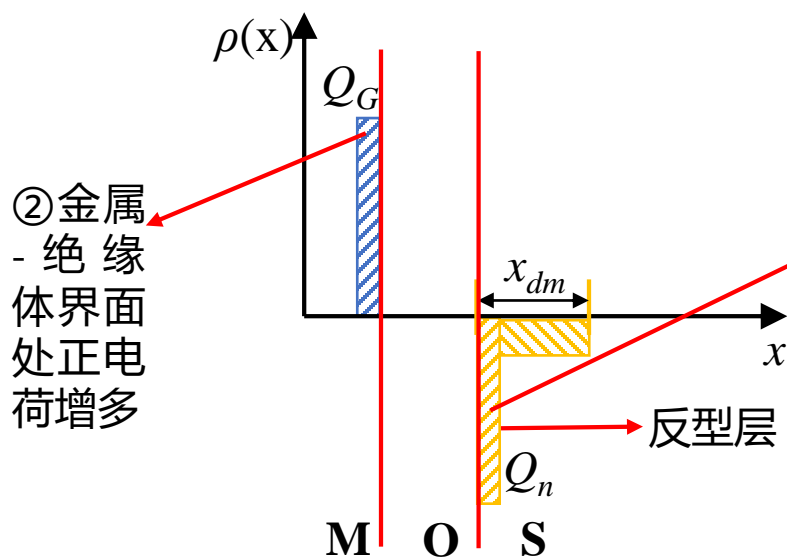
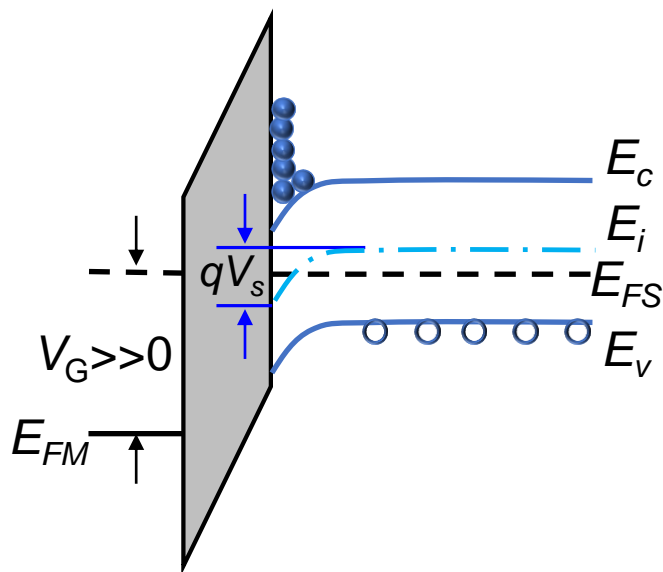
② MOS电容加一定正偏电压（金属加正压），半导体能带相对金属上移，但 $E_F$ 仍在 $E_i$ 之下，表面处能带向下弯曲， $0 < V_S < V_B$ ， $V_B$ 是以带隙中线为参考的**费米势**， $V_B = (E_i - E_F)/q$ 。越靠近表面，价带顶 $E_v$ 离 $E_F$ 越远，价带中空穴浓度越低，在靠近表面的一定区域内，空穴浓度较半导体体内要低得多，表面层出现负电荷，来源于电离受主杂质，表面层这种状态称为**耗尽**。



# MOS结构与MOS电容

在外加偏压下MOS电容能带和p型半导体表面电荷状态：

③ MOS电容正偏压进一步增大时，表面处能带相较于体内进一步向下弯曲，表面处 $E_F$ 位置可能高于禁带中央能量 $E_i$ ，即 $V_S > V_B$ ，也就是说 $E_F$ 离导带底的距离比离价带顶的距离要小，意味着在表面处电子浓度将超过空穴浓度，即形成了与原来半导体导电类型相反的一层电荷层，叫做反型层。此时半导体空间电荷区中的负电荷由两部分组成：耗尽层中电离的受主负电荷、反型层中的电子。



①随着外加正电压的继续增大，半导体表面出现一薄层负电荷层，即反型层。

②金属-绝缘体界面处正电荷增多

# MOS结构与MOS电容

## MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

通过解泊松方程可以求出**半导体**表面空间电荷层中电场和电势分布。取 $x$ 轴垂直于半导体表面指向半导体内部，并规定表面处为 $x$ 轴原点，半导体内部电势为零（以p型硅为例）。

泊松方程： $\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{rs}\epsilon_0}$   $\epsilon_{rs}$ 是半导体相对介电常数

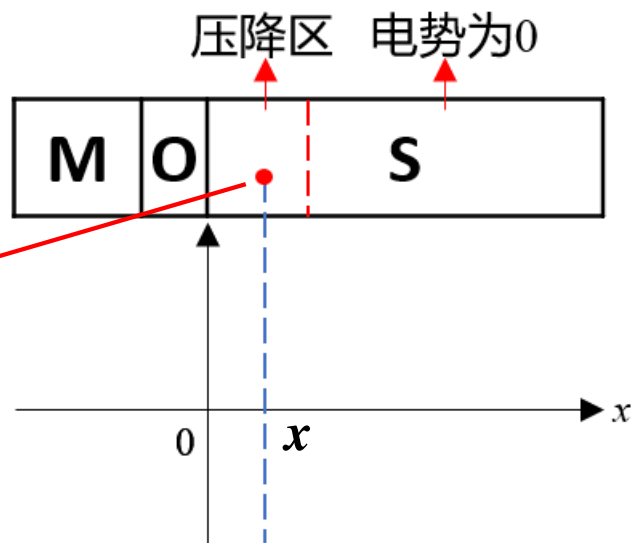
空间电荷总密度： $\rho(x) = q(n_D^+ - p_A^- + p_p - n_p)$

$n_D^+$ ：电离施主浓度

$p_A^-$ ：电离受主浓度

$p_p$ ：坐标 $x$ 点处的空穴浓度

$n_p$ ：坐标 $x$ 点处的电子浓度



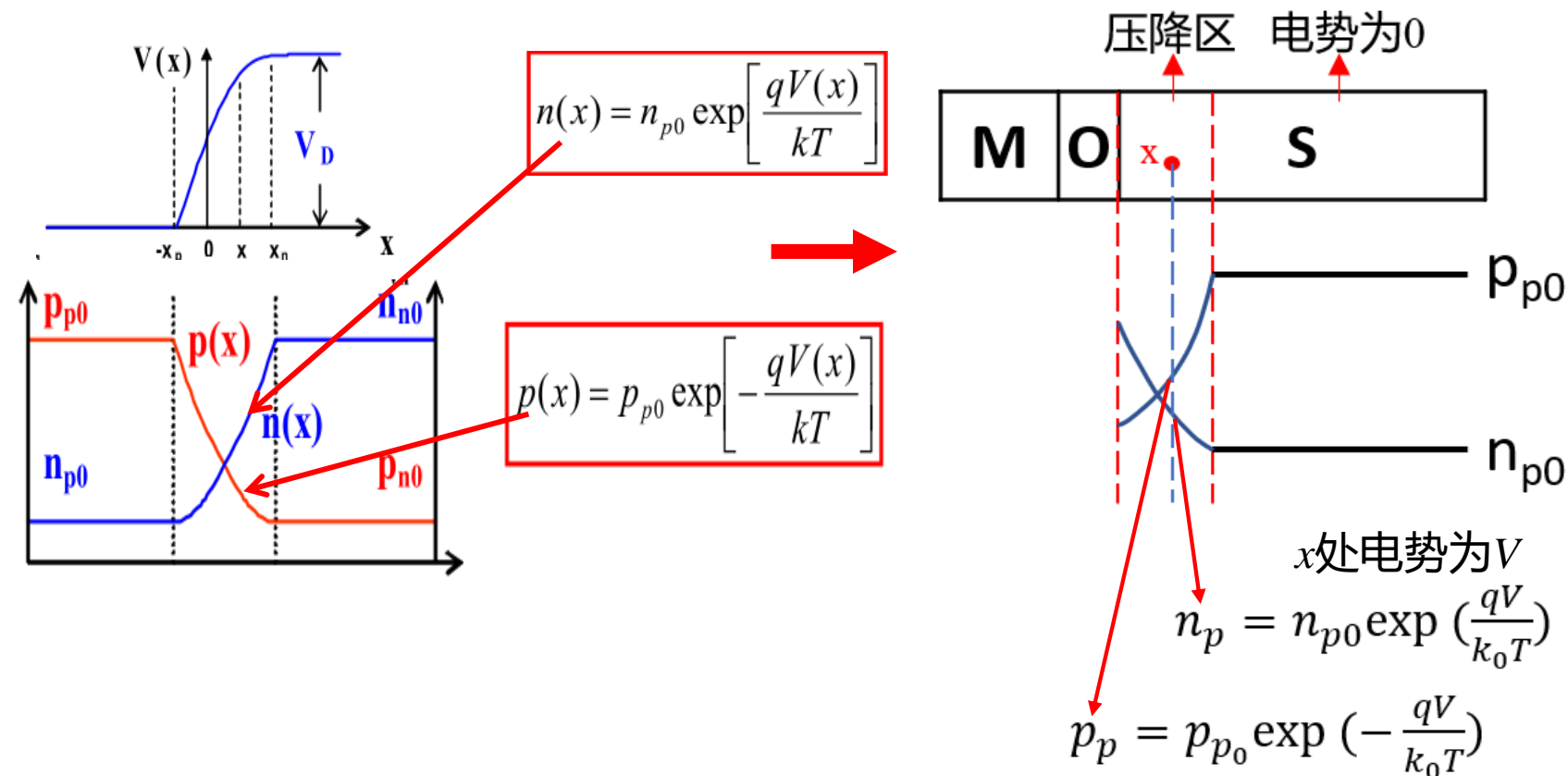
# MOS结构与MOS电容

## MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

若考虑在表面层中经典统计仍能适用，取半导体内部电势为零，则**电势为 $V$ 的 $x$ 处**电子和空穴浓度分别为：

$$n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) \quad p_p = p_{p0} \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right)$$

$n_{p0}$ 和 $p_{p0}$ 是半导体体内平衡电子和空穴的浓度。



# MOS结构与MOS电容

## MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

假定表面空间电荷区中电离杂质浓度为常数，且与半导体内杂质浓度相等，因此

$$n_D^+ = n_{p0} \quad p_A^- = p_{p0}$$

$n_D^+$ ：电离施主浓度

$p_A^-$ ：电离受主浓度

$p_p$ ：空穴浓度

$n_p$ ：电子浓度

$$p_p = p_{p0} \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) \quad n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)$$

$$\rho(x) = q(n_D^+ - p_A^- + p_p - n_p)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_{rs}\epsilon_0}$$



$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_{rs}\epsilon_0} \left\{ p_{p0} \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] - n_{p0} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] \right\}$$

# MOS结构与MOS电容

MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

$$\boxed{\frac{d^2V}{dx^2}} = -\frac{q}{\epsilon_{rs}\epsilon_0} \left\{ p_{p0} \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] - n_{p0} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] \right\}$$

将上式两边乘以  $dV$  并积分，等式左边变为：

$$\int_0^V \frac{d^2V}{dx^2} dV = \int_0^V \frac{d\left(\frac{dV}{dx}\right)}{dx} dV \quad \text{亦可写为} \quad \int_0^{\frac{dV}{dx}} \frac{dV}{dx} d\left(\frac{dV}{dx}\right)$$

所以上述泊松方程可写为如下式子

$$\int_0^{\frac{dV}{dx}} \frac{dV}{dx} d\left(\frac{dV}{dx}\right) = -\frac{q}{\epsilon_{rs}\epsilon_0} \int_0^V \left\{ p_{p0} \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] - n_{p0} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - 1 \right] \right\} dV$$

考虑到电场强度  $E = -\frac{dV}{dx}$  对上式积分可得

$$E^2 = \left(\frac{2k_0T}{q}\right)^2 \left(\frac{q^2 p_{p0}}{2\epsilon_{rs}\epsilon_0 k_0T}\right) \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}$$

# MOS结构与MOS电容

## MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

$$E^2 = \left(\frac{2k_0T}{q}\right)^2 \left(\frac{q^2 p_{p0}}{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}\right) \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}$$

为了便于对公式的分析，我们引入以下缩略形式

$$L_D = \left(\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}{q^2 p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{称作德拜长度，在特定条件下为常数}$$

$$F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

其中  $\frac{n_{p0}}{p_{p0}}$  只与半导体体内的掺杂情况有关

$F$  函数为表面电场 $E$ 和表面电势 $V$ 关系的主要影响因素，在电势 $V$ 由负到正变化时， $F$ 函数在不同的电势 $V$ 范围内具有不同的函数关系。

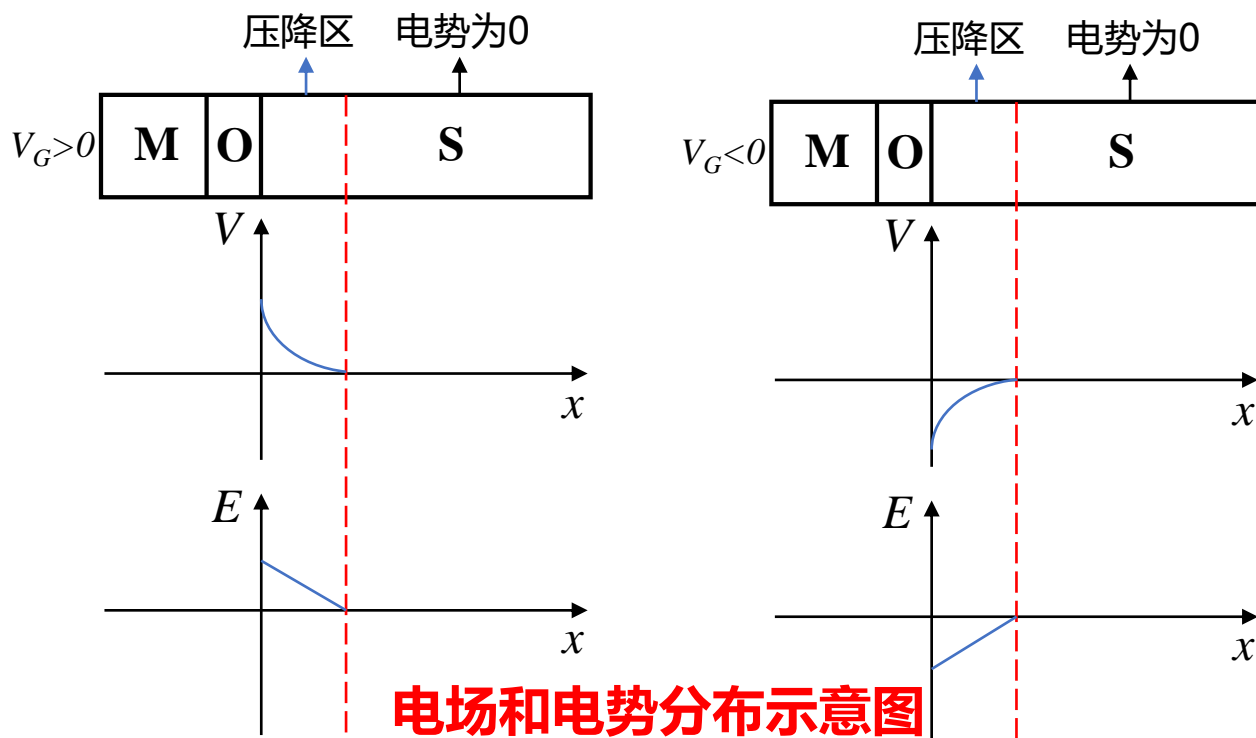
# MOS结构与MOS电容

## MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

$$E^2 = \left(\frac{2k_0T}{q}\right)^2 \left(\frac{q^2 p_{p0}}{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}\right) \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}$$

$$L_D = \left(\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}{q^2 p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

则有  $E = \pm \frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D} F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$ ，规定电场方向从金属指向半导体为正，式中 $V > 0$ 时， $E$ 取正号(+)， $V < 0$ 时， $E$ 取负号(-)





# MOS结构与MOS电容

## MOS电容半导体表面的电场、电荷、电容的推导：

在表面处 $V=V_s$ 时，半导体表面处的电场强度为：

$E_s = \pm \frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D} F\left(\frac{qV_s}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$ ，根据高斯定理，表面的电荷面密度

$Q_s$ 与表面处电场强度有以下关系  $Q_s = -\epsilon_{rs}\epsilon_0 E_s$ ，式中“-”

是因为规定电场方向从金属指向半导体为正。从而有以下表

达式  $Q_s = \mp \frac{\sqrt{2}\epsilon_{rs}\epsilon_0 k_0T}{qL_D} F\left(\frac{qV_s}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)$ ，表面空间电荷区的电荷密度

随表面势的变化而变化，相当于电容效应，因此单位面积的

电容可由微分  $C_s = \left| \frac{\partial Q_s}{\partial V_s} \right|$  得出：

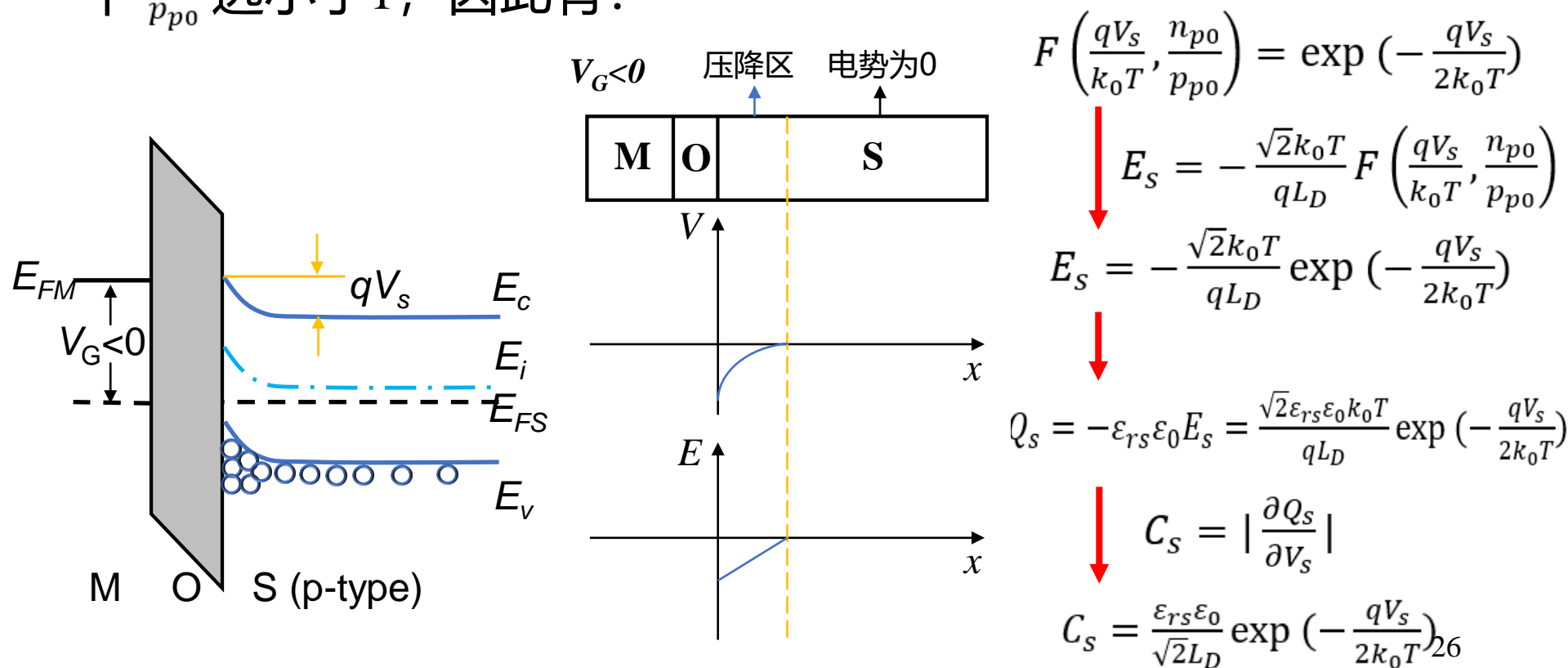
$$C_s = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{\sqrt{2}L_D} \frac{\left\{ \left[ -\exp\left(-\frac{qV_s}{k_0T}\right) + 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right) - 1 \right] \right\}}{F\left(\frac{qV_s}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)}$$

# MOS结构与MOS电容

## ① 多子堆积状态的表面电场、电荷、电容：

$$F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right\} + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right]^{1/2}$$

当外加栅压  $V_G < 0$  时，表面势  $V_s < 0$ ，表面层电势  $V < 0$ ，当  $|V_s|$  和  $|V|$  足够大时， $\exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right)$  远比  $\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)$  大得多，且P型半导体中  $\frac{n_{p0}}{p_{p0}}$  远小于1，因此有：



# MOS结构与MOS电容

## ② 平带状态的表面电场、电荷、电容：

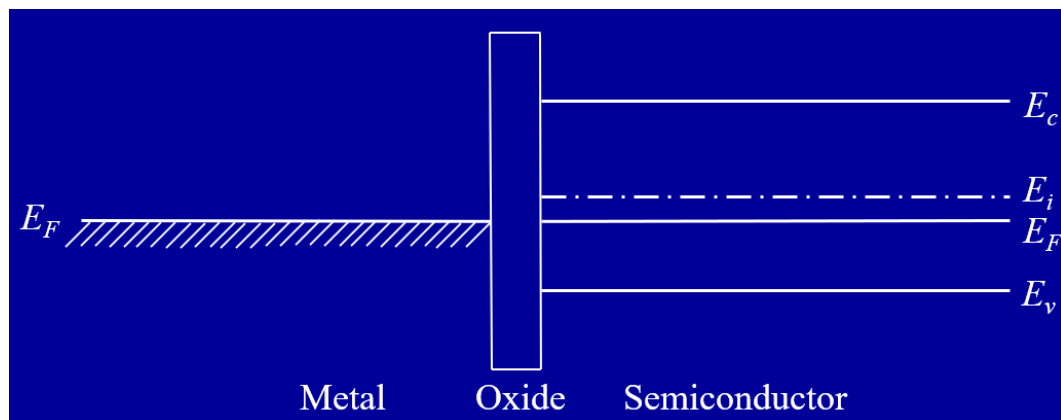
$$F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

外加栅压  $V_G=0$  时，表面势  $V_S=0$ ，表面处能带不弯曲，称为

平带状态，此时容易得到  $F\left(\frac{qV_S}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = 0$ ， $E_s = 0$ ， $Q_s = 0$

而表面空间电荷层电容  $C_s$  则不能直接将  $V_s$  代入，由于此时  $V_s$  给出的是不定值，所以应该使  $V_s$  趋近于零求极限来得到  $C_s$ ，

此时有  $\exp\left(\pm \frac{qV_s}{k_0T}\right) = 1 \pm \frac{qV_s}{k_0T} + \frac{\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)^2}{2}$ ，则  $C_s = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{\sqrt{2}L_D} \frac{\left\{ \left[ -\exp\left(-\frac{qV_s}{k_0T}\right) + 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right) - 1 \right] \right\}}{F\left(\frac{qV_s}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)}$



$$C_s = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{L_D} \frac{\left[ 1 - \frac{qV_s}{2k_0T} + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left( 1 + \frac{qV_s}{2k_0T} \right) \right]}{\left( 1 + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \right)^{\frac{1}{2}}}$$

$V_s = 0$  ↓

$$C_{FBS} = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{L_D} \left( 1 + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

P型衬底 ↓  $n_{p0} \ll p_{p0}$

$$C_{FBS} = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{L_D}$$

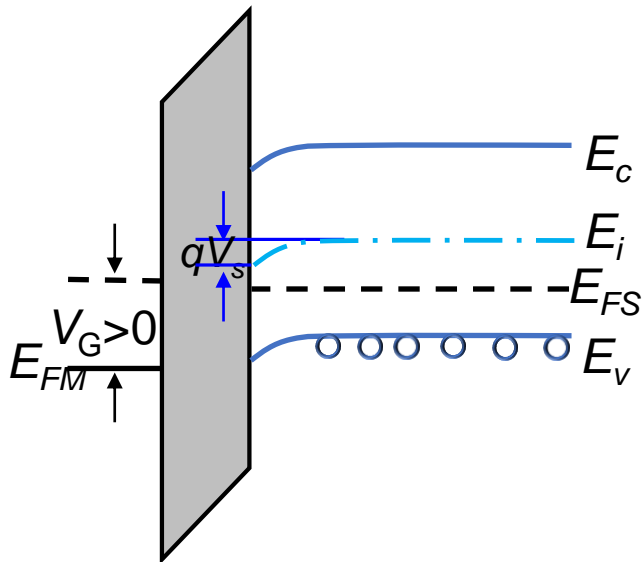
# MOS结构与MOS电容

## ③ 耗尽状态的表面电场、电荷、电容：

$$F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

当  $V_G > 0$  但不足以使  $E_i$  弯曲到  $E_F$  以下时,  $0 < V_S \leq V_B$ , 表面不会出现反型, 空间电荷区处于空穴耗尽状态, 因  $V > 0$ ,  $V_s > 0$ ,

$n_{p0} \ll p_{p0}$ ,  $\exp\left(-\frac{qV_s}{k_0T}\right) \sim 1$ ,  $\frac{n_{p0}}{p_{p0}}$  可以忽略, 所以  $F\left(\frac{qV_s}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}$



$$E_s = \pm \frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D} F\left(\frac{qV_s}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) \quad Q_s = -\epsilon_{rs}\epsilon_0 E_s$$

$$E_s = \frac{\sqrt{2}}{L_D} \left(\frac{k_0T}{q}\right)^{\frac{1}{2}} (V_s)^{\frac{1}{2}} \quad Q_s = -\frac{\sqrt{2}\epsilon_{rs}\epsilon_0}{L_D} \left(\frac{k_0T}{q}\right)^{\frac{1}{2}} (V_s)^{\frac{1}{2}}$$

$$C_s = \left| \frac{\partial Q_s}{\partial V_s} \right| \rightarrow C_s = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{\sqrt{2}L_D} \frac{1}{\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

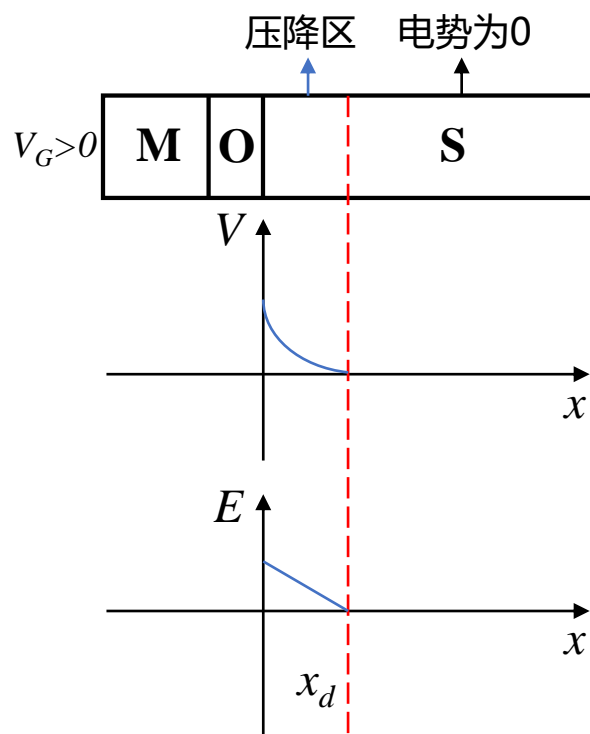
$$L_D = \left(\frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0 k_0T}{q^2 p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{考虑到电离饱和时 } p_{p0} = N_A$$

$$C_s = \left(\frac{N_A q \epsilon_{rs} \epsilon_0}{2V_s}\right)^{\frac{1}{2}}$$

# MOS结构与MOS电容

## ③ 耗尽状态的表面电场、电荷、电容：

对于耗尽状态也可用**耗尽层近似**来处理，即假设空间电荷层的空穴都已经全部耗尽，电荷全由电离受主杂质构成，半导体均匀掺杂，则空间电荷密度  $\rho(x) = -qN_A$ ，泊松方程化为  $\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_{rs}\epsilon_0}$ ，设  $x_d$  为耗尽层宽度，半导体内部电场强度为零。

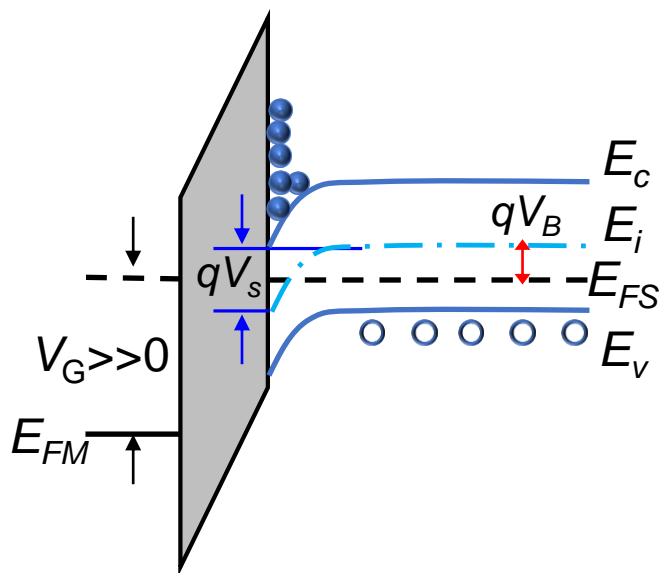


$$\begin{aligned}
 & \frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_{rs}\epsilon_0} \\
 & \text{对 } x \text{ 积分} \quad x = x_d \quad \frac{dV}{dx} = 0 \\
 & \frac{dV}{dx} = -\frac{qN_A}{\epsilon_{rs}\epsilon_0} (x_d - x) \\
 & \text{对 } x \text{ 积分} \quad x = x_d \quad V = 0 \\
 & V = \frac{qN_A(x_d - x)^2}{2\epsilon_{rs}\epsilon_0} \quad \xleftarrow{x=0} \quad V_s = \frac{qN_A x_d^2}{2\epsilon_{rs}\epsilon_0} \\
 & \text{代入} \quad C_s = \left( \frac{N_A q \epsilon_{rs} \epsilon_0}{2V_s} \right)^{\frac{1}{2}} \\
 & C_s = \frac{\epsilon_{rs} \epsilon_0}{x_d}
 \end{aligned}$$

# MOS结构与MOS电容

## ④ 反型状态:

随着外加电压继续增大，半导体表面 $E_i$ 下降到 $E_F$ 以下，此时 $V_S > V_B$ ，即出现反型层。反型状态可分为弱反型和强反型两种情况，以表面处少子浓度 $n_s$ 是否超过体内多子浓度 $p_{p0}$ 为临界。



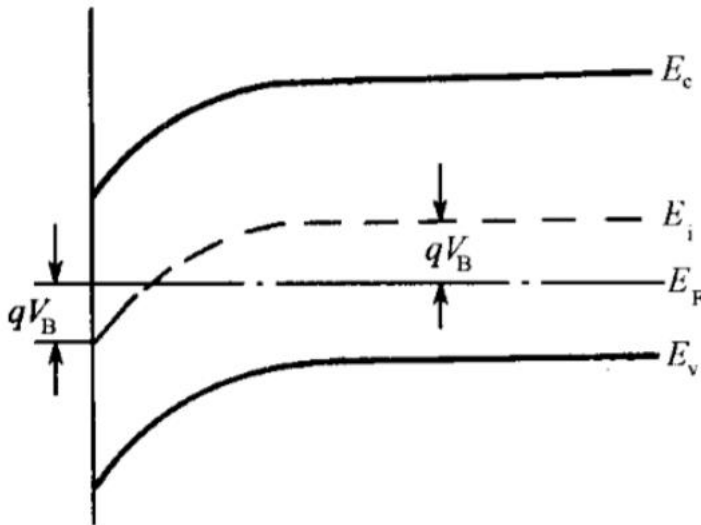
- ◆ 反型状态：半导体表面处电子浓度 $\geq$ 空穴浓度（相等为耗尽状态与反型状态的临界点），即表面处 $E_i$ 下降到 $E_F$ 以下；
- ◆ 弱反型状态：半导体表面电子浓度 $>$ 表面空穴浓度，但 $<$ 体内空穴浓度；
- ◆ 强反型状态：半导体表面电子浓度 $\geq$ 体内空穴浓度（相等为临界点）。

# MOS结构与MOS电容

## ④ 反型状态的表面电场、电荷、电容：

半导体表面少子浓度： $n_s = n_{p0} \exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right) = \frac{n_i^2}{p_{p0}} \exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)$  当表面处少子浓度  $n_s = p_{p0}$  时，上式化为  $p_{p0}^2 = n_i^2 \exp\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)$  或  $p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{qV_s}{2k_0T}\right)$

另外根据玻尔兹曼统计得  $p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{qV_B}{k_0T}\right)$ ，其中  $qV_B = E_i - E_F$



比较  $p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{qV_s}{2k_0T}\right)$  和  $p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{qV_B}{k_0T}\right)$  就可以得出**强反型条件**是  $V_s \geq 2V_B$ ，相应地，**弱反型条件**为  $V_B < V_s < 2V_B$  易知  $V_B = \frac{k_0T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$ ，因此强反型条件也可以写成  $V_s \geq \frac{2k_0T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$

# MOS结构与MOS电容

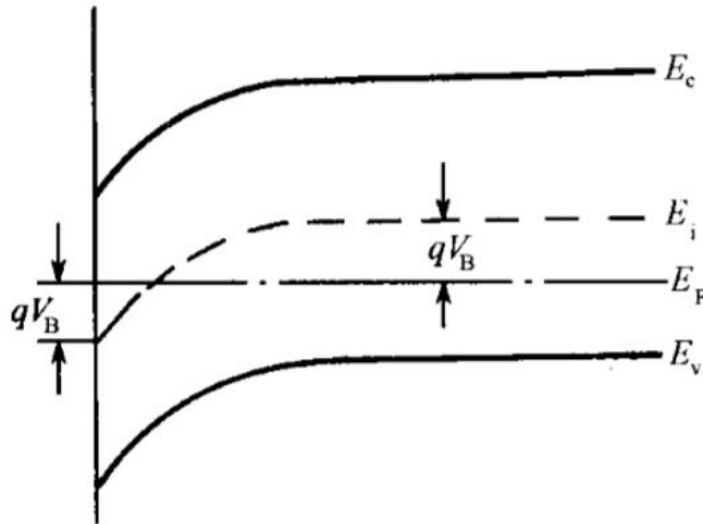
## ④ 反型状态的表面电场、电荷、电容：

$$F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \left[ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

当  $V_S = 2V_B$  时,  $p_{p0} = n_i \exp\left(\frac{qV_B}{k_0T}\right)$   $n_{p0} = n_i \exp\left(-\frac{qV_B}{k_0T}\right)$   $\frac{n_{p0}}{p_{p0}} = \exp\left(-\frac{qV_S}{k_0T}\right)$

$$F\left(\frac{qV_S}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \frac{qV_S}{k_0T} [1 - \exp\left(-\frac{qV_S}{k_0T}\right)] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

$qV_S \gg k_0T$  ( $=26\text{meV}$ ),  $\exp\left(-\frac{qV_S}{k_0T}\right) \ll 1$ , 则有:  $F\left(\frac{qV_S}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left(\frac{qV_S}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}$



$$E_s = \frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D} \left(\frac{qV_S}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_s = -\frac{\sqrt{2}\epsilon_{rs}\epsilon_0k_0T}{qL_D} \left(\frac{qV_S}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= -(2\epsilon_{rs}\epsilon_0N_AV_S)^{\frac{1}{2}}$$

$$= -(4\epsilon_{rs}\epsilon_0N_AV_B)^{\frac{1}{2}}$$

$$L_D = \left(\frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0k_0T}{q^2p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}}$$

电离饱和时  $p_{p0} = N_A$



# MOS结构与MOS电容

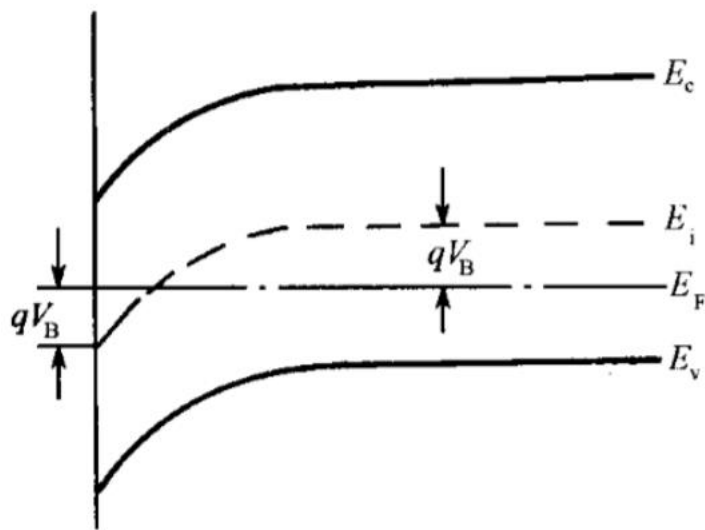
## ④ 反型状态的表面电场、电荷、电容：

$$F\left(\frac{qV}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left\{ \exp\left(-\frac{qV}{k_0T}\right) + \frac{qV}{k_0T} - 1 \right\} + \frac{n_{p0}}{p_{p0}} \left[ \exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right) - \frac{qV}{k_0T} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

当  $V_S \gg 2V_B$ ,  $qV_S \gg k_0T$  时,  $F$  函数中  $\left(\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{qV_S}{2k_0T}\right)$  项比其它项大得多, 因此  $F\left(\frac{qV_S}{k_0T}, \frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right) = \left(\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{qV_S}{2k_0T}\right)$

$$E_s = \frac{\sqrt{2}k_0T}{qL_D} \left(\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{qV_S}{2k_0T}\right) = \left(n_s \frac{2k_0T}{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}\right)^{\frac{1}{2}} L_D = \left(\frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}{q^2 p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} n_s = n_{p0} \exp\left(\frac{qV_S}{k_0T}\right)$$

$$Q_s = -\frac{\sqrt{2}\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}{qL_D} \left(\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{qV_S}{2k_0T}\right) = -(2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T n_s)^{\frac{1}{2}} \quad C_s = \frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D} \left(\frac{n_{p0}}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}} \exp\left(\frac{qV_S}{2k_0T}\right) = \frac{\varepsilon_{rs}\varepsilon_0}{\sqrt{2}L_D} \left(\frac{n_s}{p_{p0}}\right)^{\frac{1}{2}}$$



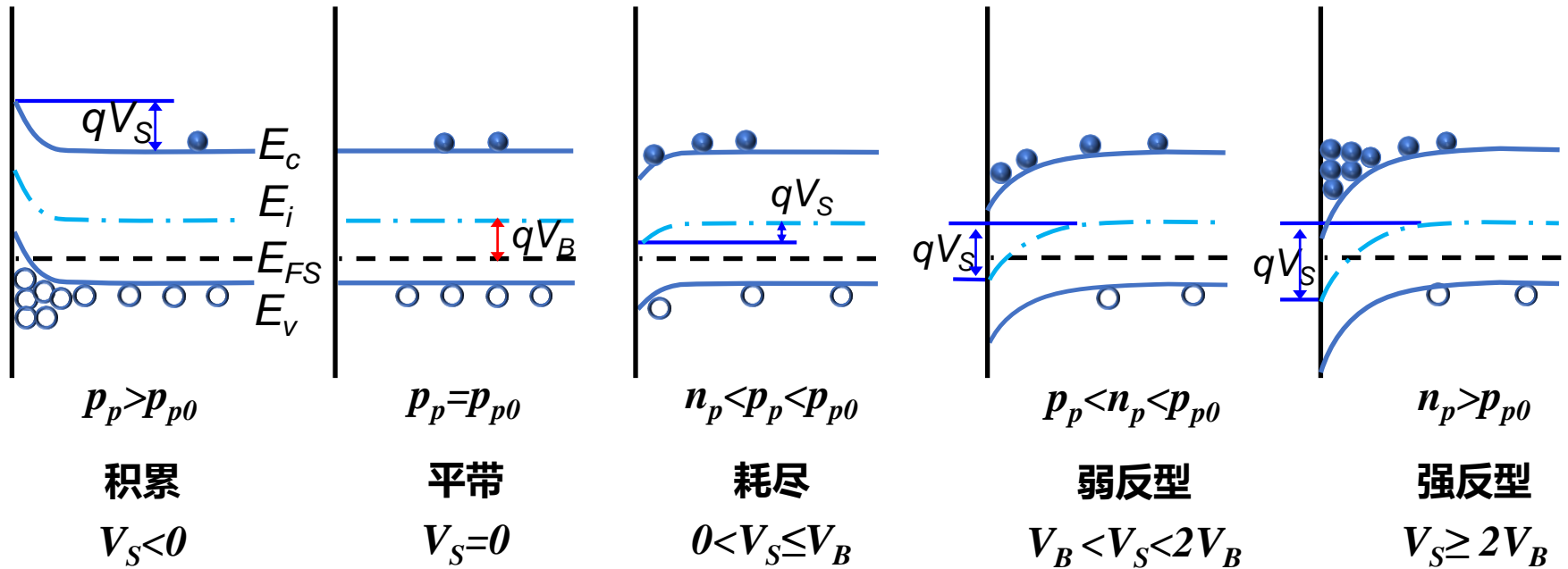
需要指出的是, 一旦出现强反型, 表面耗尽层宽度就达到一个极大值  $x_{dm}$ , 不再随外加电压的增加而增加, 这是因为反型层中积累电子屏蔽了外电场的作用。

$$V_S = \frac{qN_A x_d^2}{2\varepsilon_{rs}\varepsilon_0} \quad V_B = \frac{k_0T}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

$$x_{dm} = \left(\frac{4\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 V_B}{qN_A}\right)^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{4\varepsilon_{rs}\varepsilon_0 k_0T}{q^2 N_A} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$

# MOS结构与MOS电容

## MOS电容不同状态（平衡状态）及其条件：



# MOS结构与MOS电容

## ⑤ 深耗尽状态（定性分析）：

- ◆ 以上讨论的都是空间电荷层的**稳态**(steady state)，即假设金属相对于半导体所加电压 $V_G$ 不变，或者变化速率很慢以致表面空间电荷层中载流子浓度变化能跟上偏压 $V_G$ 的变化。
- ◆ 以下将讨论一种称为**深耗尽的非稳态**，以P型半导体为例，如果在金属与半导体之间加一脉冲阶跃或高频正弦波正电压时（这里默认峰值电压使 $V_S > V_B$ ），由于空间电荷层内少子的产生速率赶不上电压的变化，反型层来不及形成，只能靠耗尽层向半导体内部延伸产生大量受主负电荷来满足电中性条件，此时耗尽区宽度远大于强反型的最大耗尽层宽度，且其宽度随电压 $V_G$ 幅度的增大而增大，这种状态称为深耗尽状态。

# MOS结构与MOS电容

## ⑤ 深耗尽状态（定性分析）：

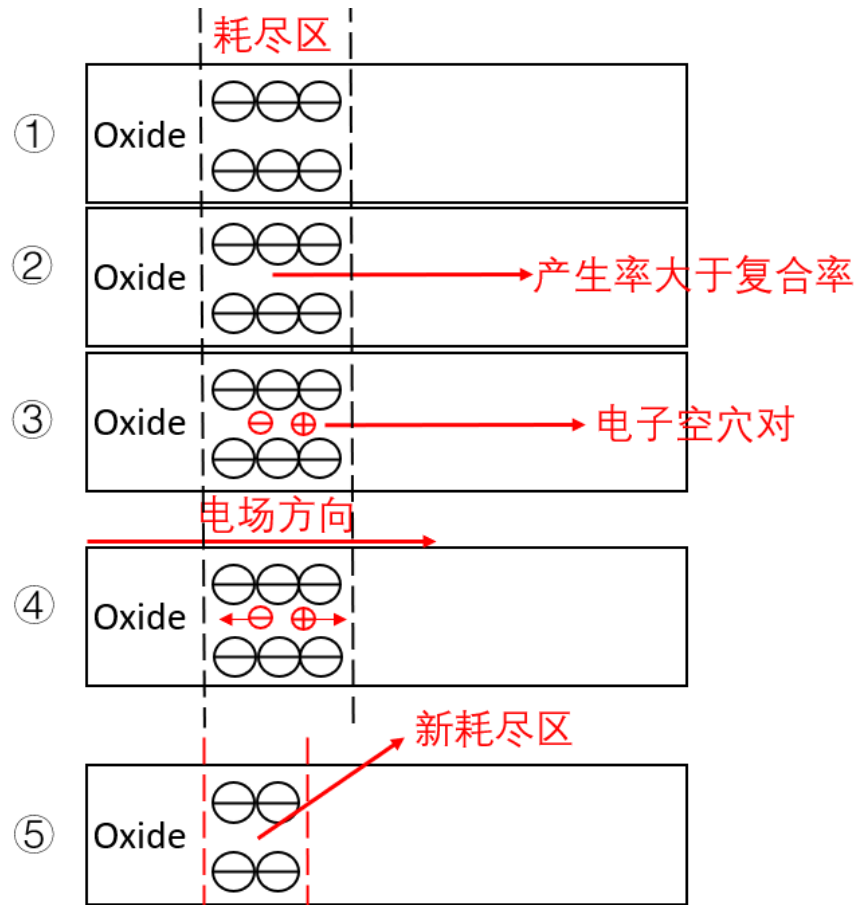
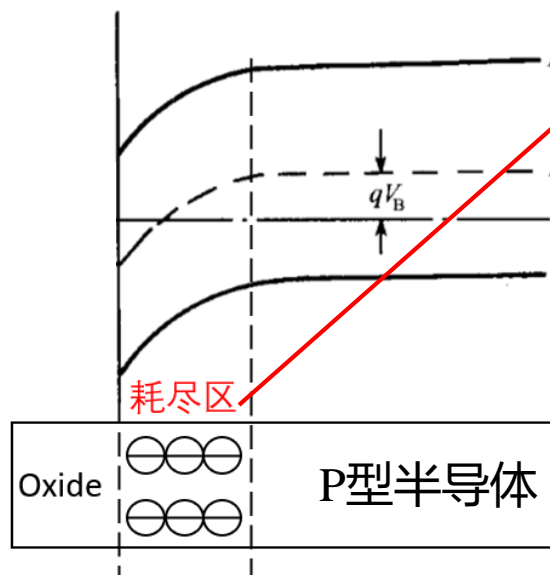
- ◆ 由于深耗尽状态是在加了快速增大的偏压 $V_G$ 使表面层达到耗尽而其中少子还来不及产生而形成的，空间电荷只存在电离杂质，故“耗尽层近似”仍适用于这种状态，因而在③中推导的几个表达式对深耗尽状态仍适用。（注意这时 $x_d > x_{dm}$ ）

$$C_s = \frac{\epsilon_{rs}\epsilon_0}{\sqrt{2}L_D} \frac{1}{\left(\frac{qV_s}{k_0T}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$V = \frac{qN_A(x_d - x)^2}{2\epsilon_{rs}\epsilon_0} \quad V_s = \frac{qN_Ax_d^2}{2\epsilon_{rs}\epsilon_0}$$

# MOS结构与MOS电容

## ⑤深耗尽状态向稳态反型状态的过渡:



一开始，表面层处于深耗尽状态，耗尽层中少子浓度近似为0，远低于其平衡浓度，故产生率大于复合率，产生的电子空穴对在电场作用下，电子向表面运动形成反型层，空穴向体内运动，在耗尽层边缘与带负电的电离受主中和而使耗尽层减薄，随着时间的推移，反型层中少子浓度越来越高，耗尽层宽度越来越小，最后过渡到稳态反型状态。

# MOS结构与MOS电容

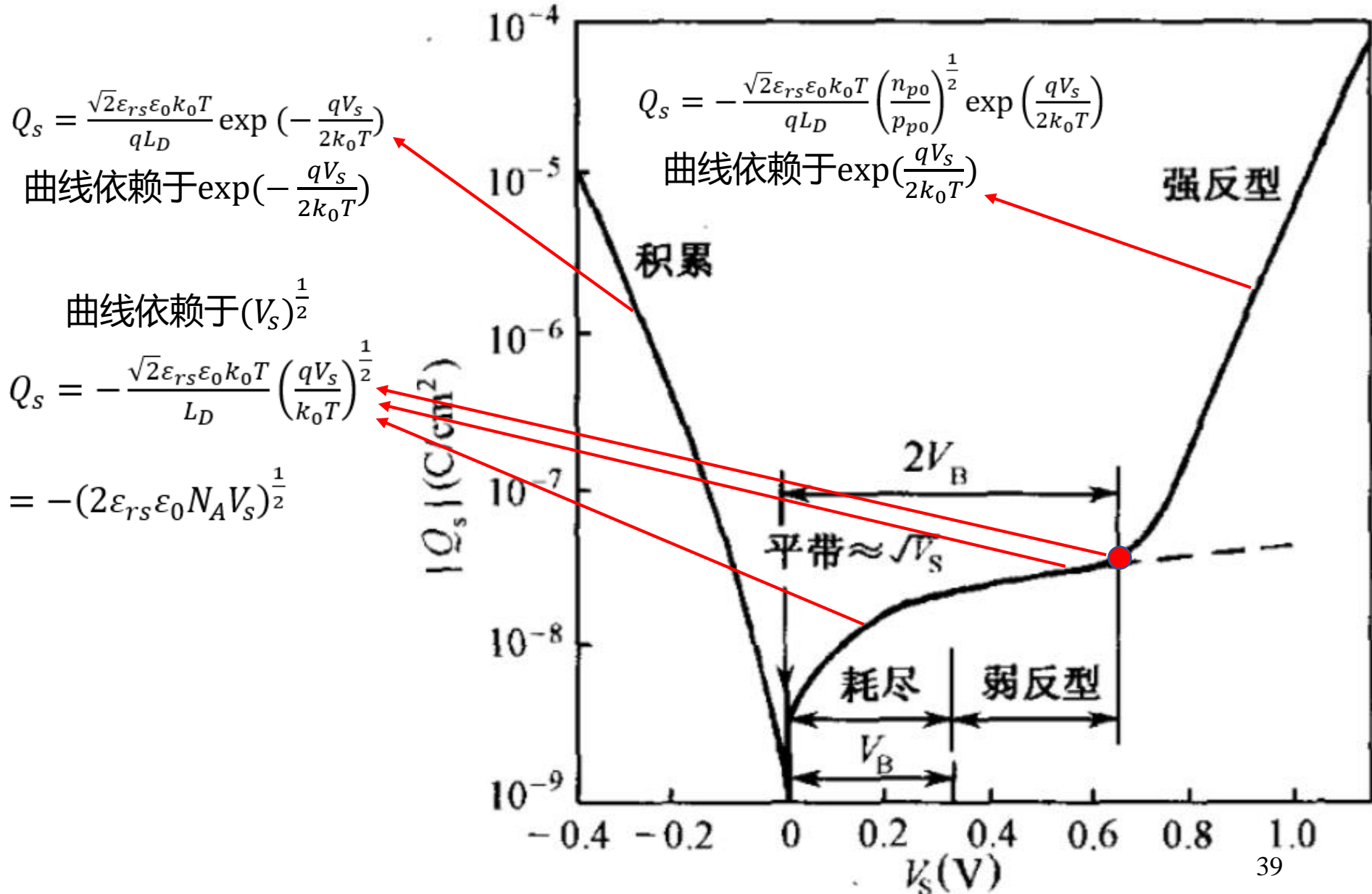
## ⑤ 深耗尽状态（定性分析）：

◆ 在这一过程中，耗尽层宽度从深耗尽状态开始时的最大值逐渐减小到强反型的最大耗尽层宽度 $x_{dm}$ ，从初始的深耗尽状态过渡到热稳态反型层状态所经历的时间用热弛豫时间 $\tau_{th}$ 表示。

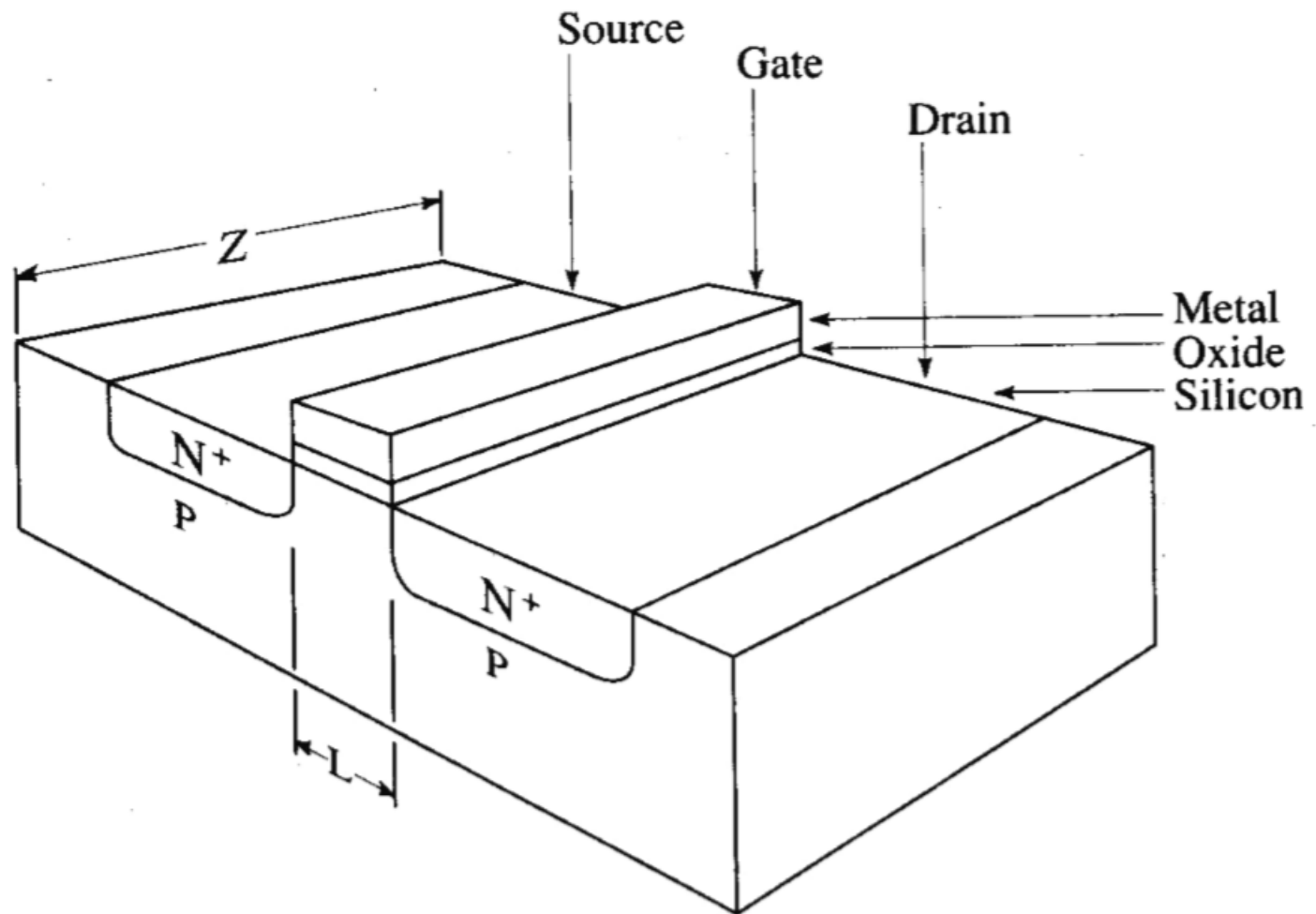
◆ 设初始耗尽层宽度为 $x_{d0}$ ，并设 $x_{d0} \gg x_{dm}$ ，耗尽层内少子净产生率为 $G$ ，则 $\tau_{th}$ 时间内产生的电子空穴对数目为 $G\tau_{th}x_{d0}$ ，稳态之后减少的耗尽区宽度和减少的电离受主数量分别为 $x_{d0}-x_{dm}$ 和 $N_A(x_{d0}-x_{dm})$ ，其中 $N_A$ 为受主杂质浓度，因此 $G\tau_{th}x_{d0} = N_A(x_{d0}-x_{dm}) \approx N_A x_{d0}$ ，又  $G = \frac{n_i}{2\tau}$ ， $\tau$ 为少子寿命，故

$$\tau_{th} = \frac{2\tau N_A}{n_i}$$

# MOS结构与MOS电容



# MOSFET制备与简介

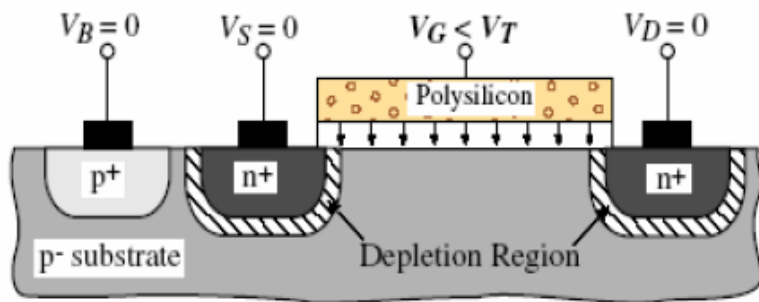


NMOS结构示意图

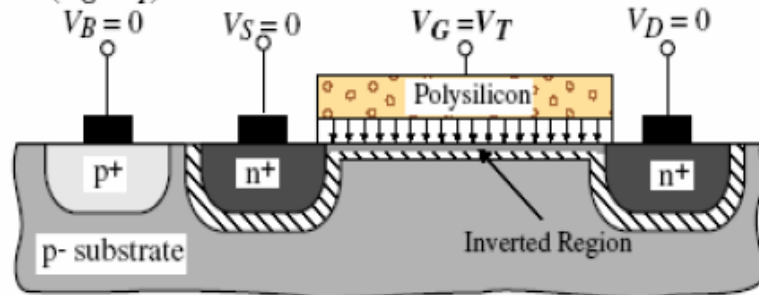


# 基本工作原理

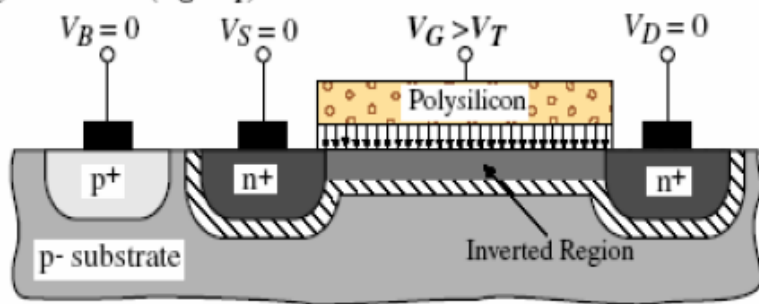
Subthreshold ( $V_G < V_T$ )



Threshold ( $V_G = V_T$ )



Strong Threshold ( $V_G > V_T$ )



■ 以NMOS为例：D和S接地

①  $V_G < 0$ ,  
空穴在硅表面积累

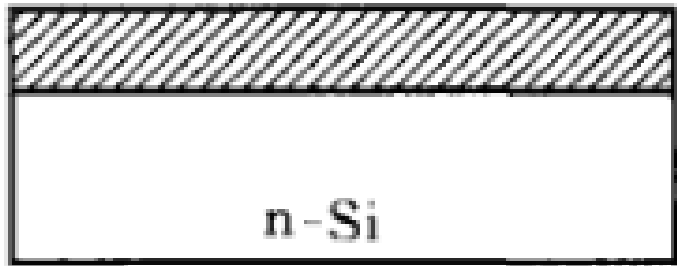
②  $0 < V_G < V_{TH}$   
硅表面耗尽：表面只有固定的负电荷

③  $V_G > V_{TH}$   
硅表面反型：自由电子吸引到硅表面

■ 强反型条件：  
栅极下硅表面反型层的载流子浓度  
= 衬底掺杂浓度

# MOSFET制备与简介

以PMOS的制备为例：



(a)

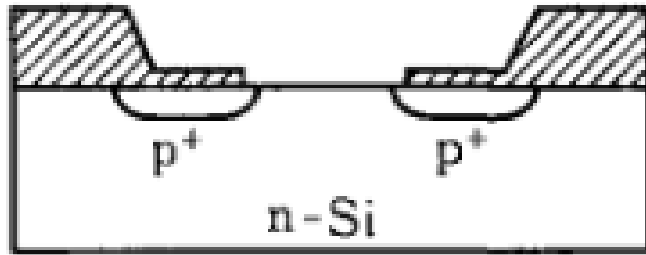


(b)

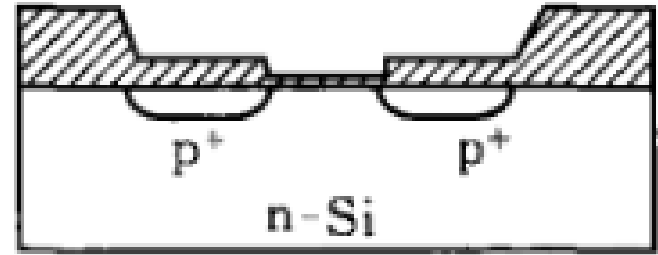
(a) 一次氧化：在洁净的硅衬底表面用热氧化法生长一层500nm以上的一次氧化层；

(b) 源漏掺杂：将一次氧化后的衬底进行光刻，然后刻蚀出源漏区域，最后离子注入掺杂，形成所需的两个P<sup>+</sup>区域；

# MOSFET制备与简介



(c)

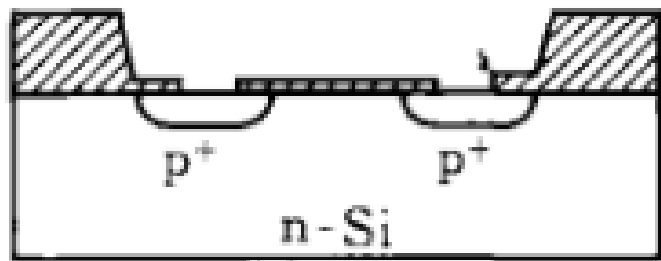


(d)

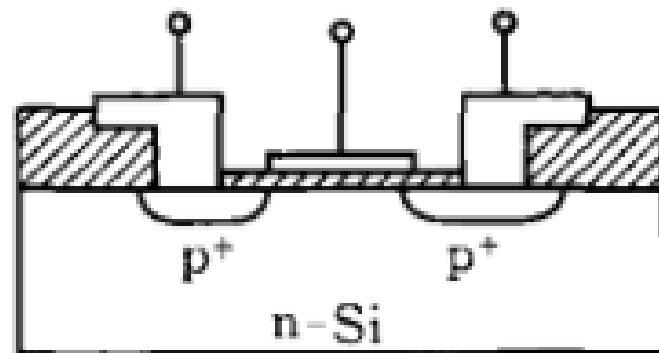
(c) 光刻栅区：将硅片上源漏区域之间的氧化层刻蚀掉，即刻蚀出栅区；

(d) 栅氧化：在干氧氛围中生长厚度为150~200nm的优质氧化层，这是制作MOS管过程中最关键的一项工艺；

# MOSFET制备与简介



(e)



(f)

(e) 光刻引线孔：光刻、刻蚀出生长源漏电极区域；

(f) 蒸镀电极：利用Sputter或者E-beam生长金属电极；

上述步骤总共用了四次光刻、一次注入、一次蒸发。

NMOS的制备与PMOS基本一样。