

固体物理

固体的电特性-3

异质结和肖特基结

冯 雪

x-feng@tsinghua.edu.cn

罗姆楼2-101B

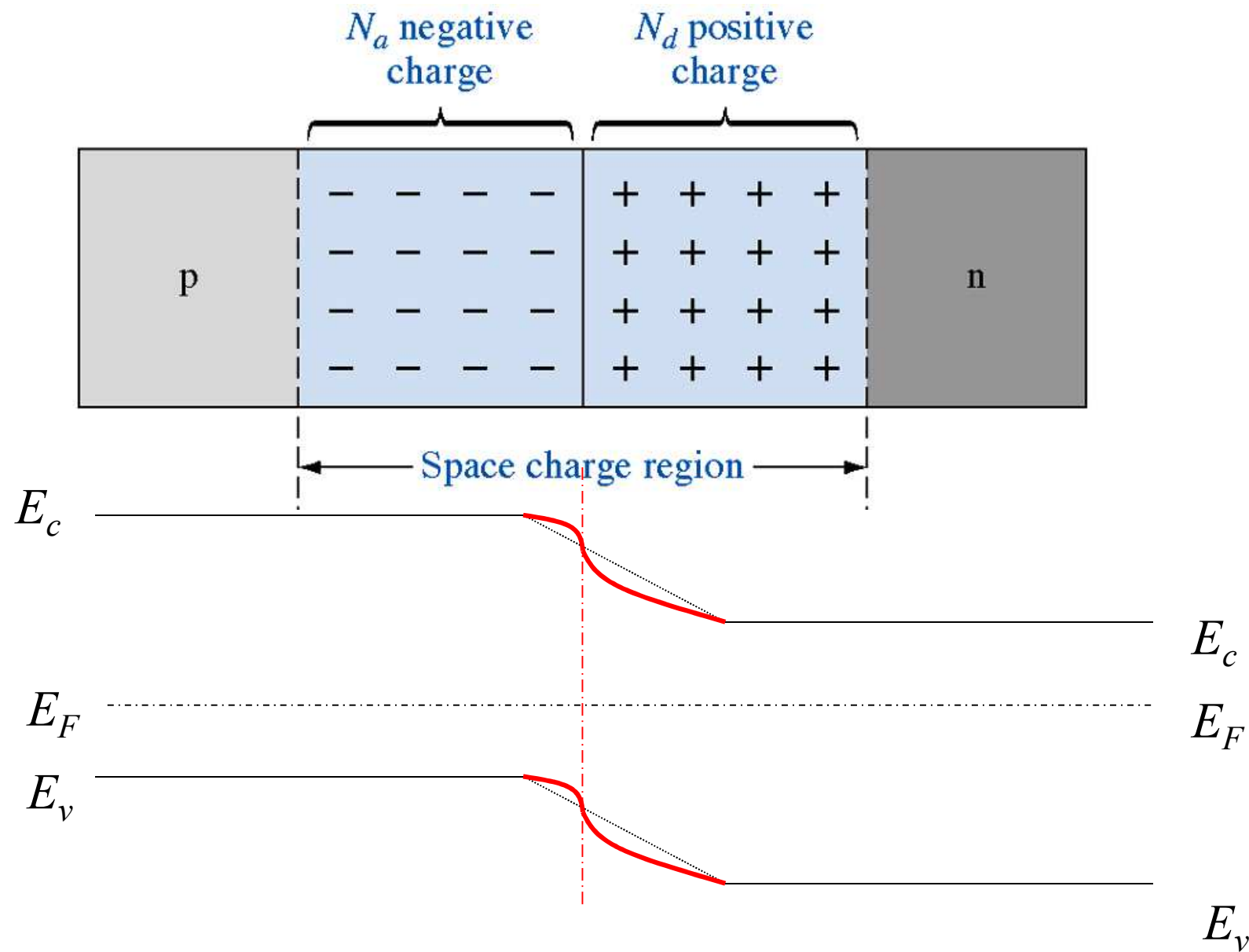
固体间接接触的电特性

- 功函数与接触电势

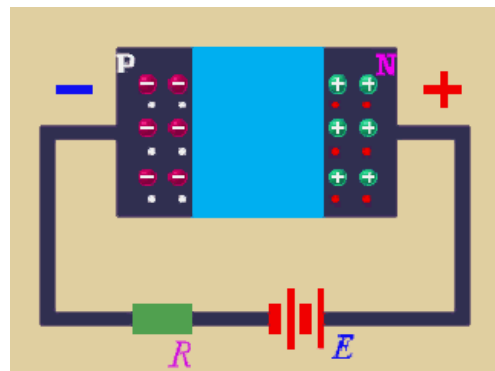
- PN 结

- 金属-半导体(肖特基)结
- 金属-绝缘体-半导体系统

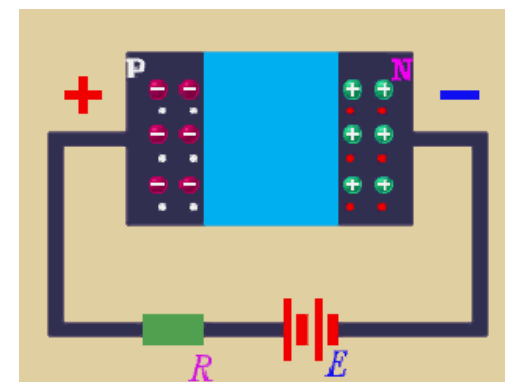
同质PN结



PN结的电特性



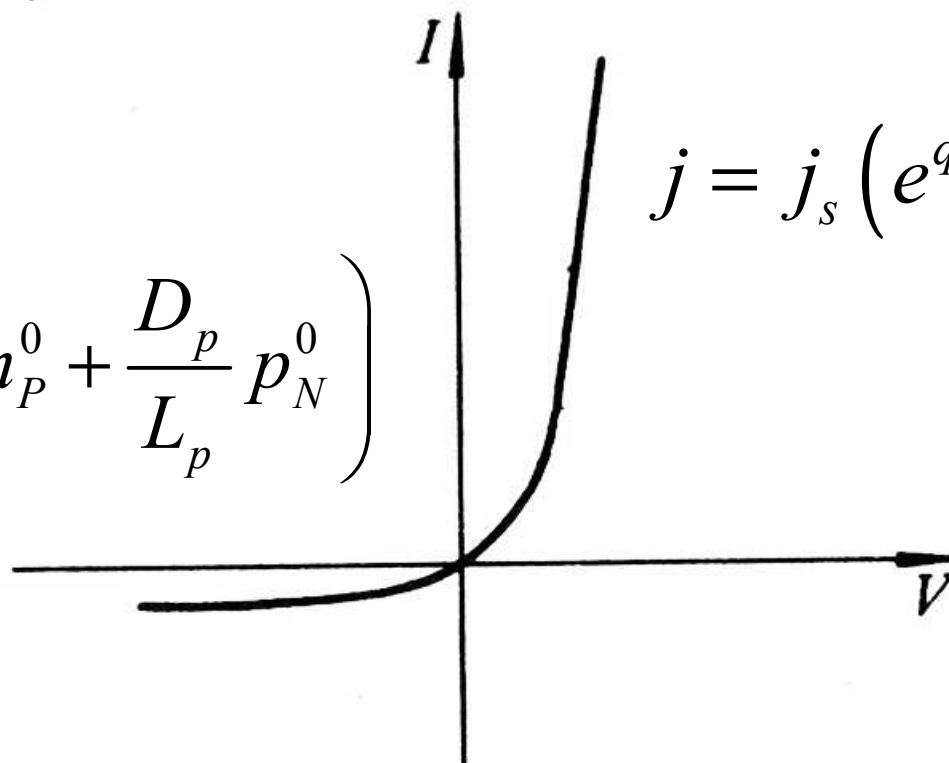
反向



正向

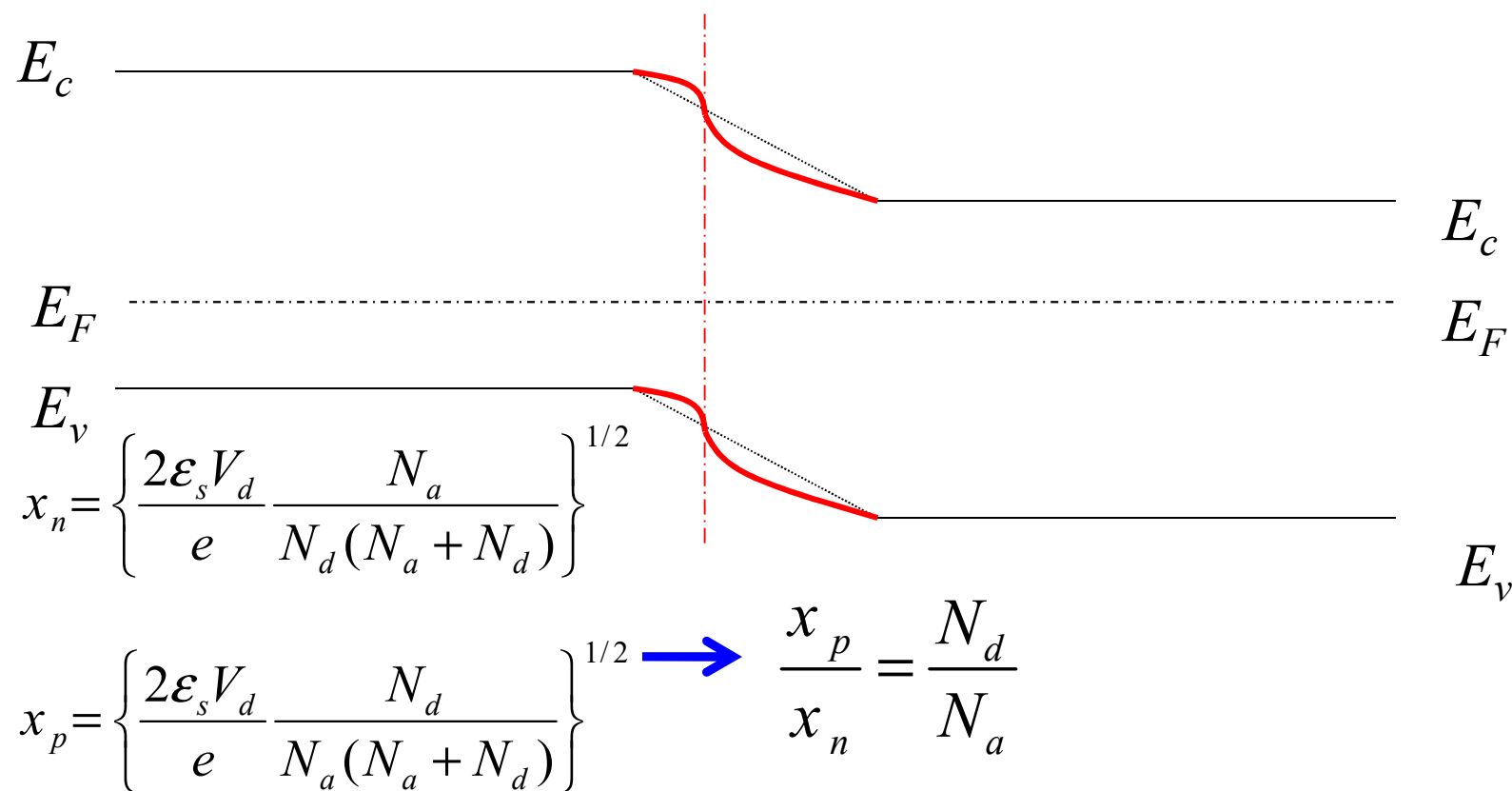
$$j \approx -q \left(\frac{D_n}{L_n} n_P^0 + \frac{D_p}{L_p} p_N^0 \right)$$

$$j = j_s \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right)$$



同质PN结能带的画法

- 1、接触电势差确定
- 2、空间电荷区比例确定；
- 3、分别用抛物线型画出电位变化线

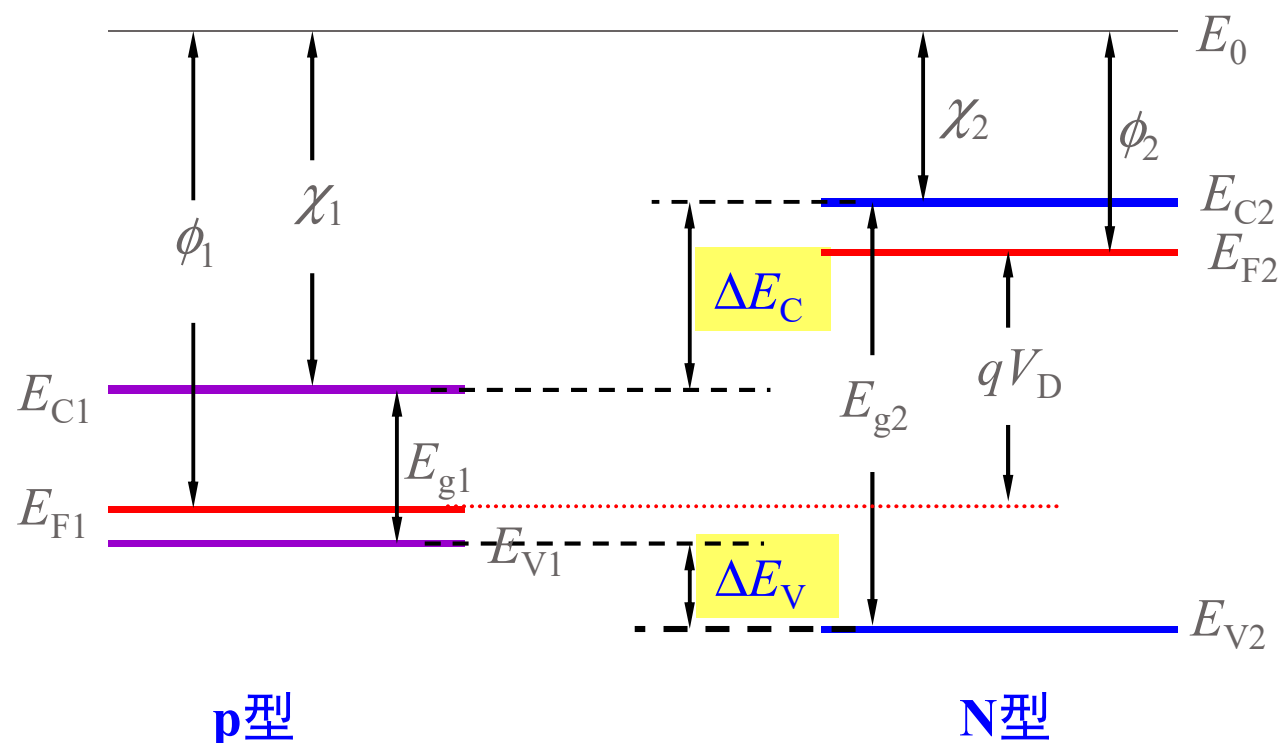


半导体异质结

将两种不同的半导体材料所组成的界面区称为异质结，如：在 $GaAs$ 衬底上外延生长合金半导体 $Al_xGa_{1-x}As$ ，在其界面上就构成异质结。异质结具有许多普通PN结所没有的特性，常被用来改良半导体器件的性能。

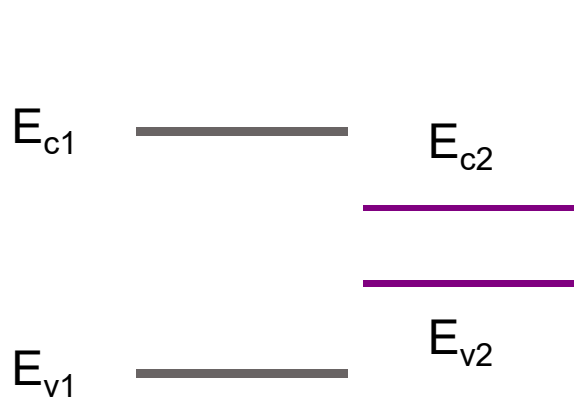
- 与半导体同质结的区别
 - 同质结由同种半导体材料构成
 - 异质结由两种带隙宽度不同的材料组成
- 异质结的分类
 - 同型异质结：nN型，pP型
大写字母表示材料带隙更宽的材料
 - 异型异质结：Pn型，pN型

两种半导体材料的能带图



- 电子亲和能: χ 代表电子真空能级到半导体导带底的能量差
- 功函数 ϕ : 电子真空能级到费米能级之差

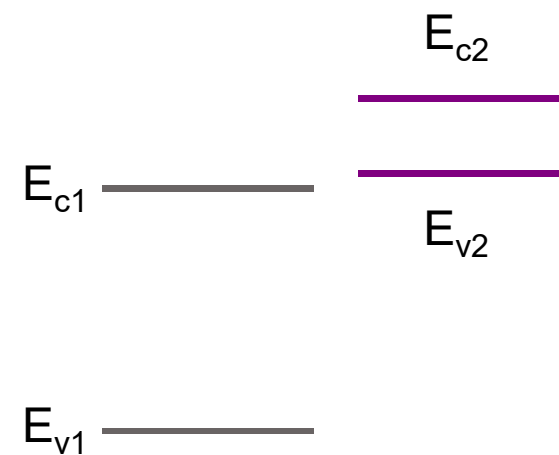
三种能带配合方式



最常用：跨骑-I型

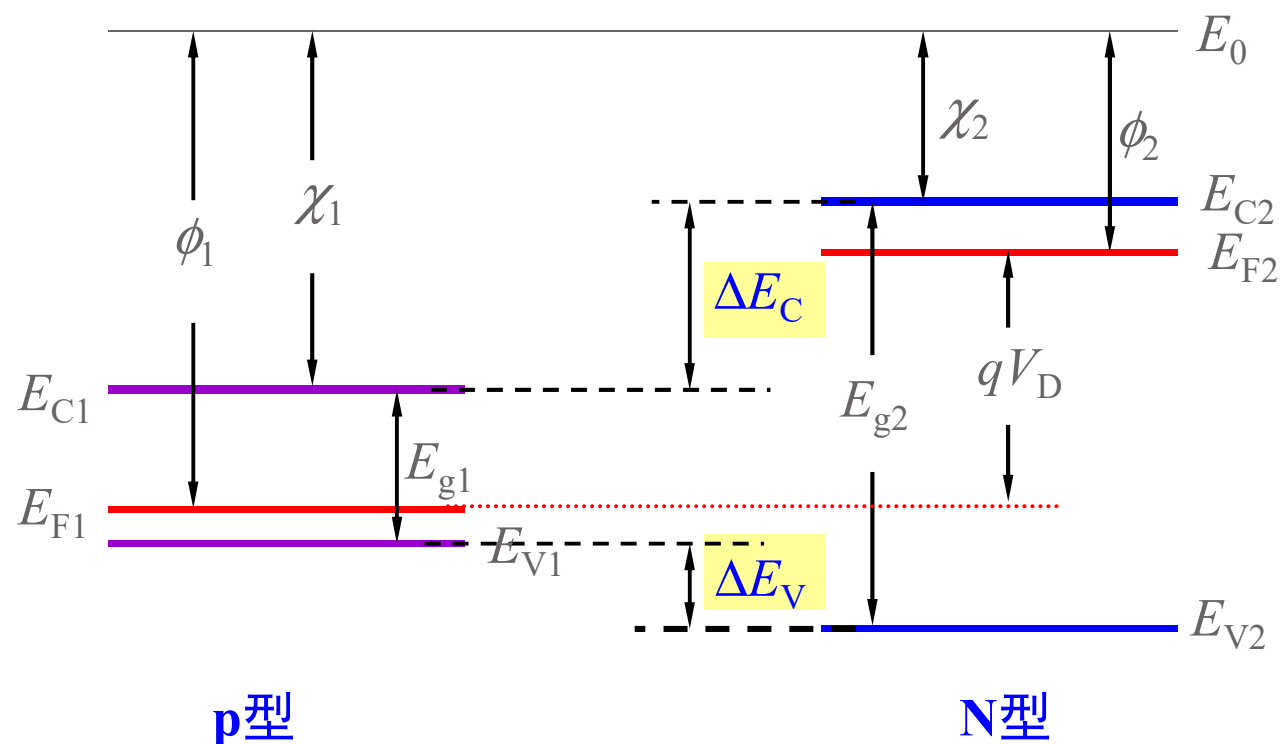


交错-II型



错层-III型

两种半导体材料的能带图

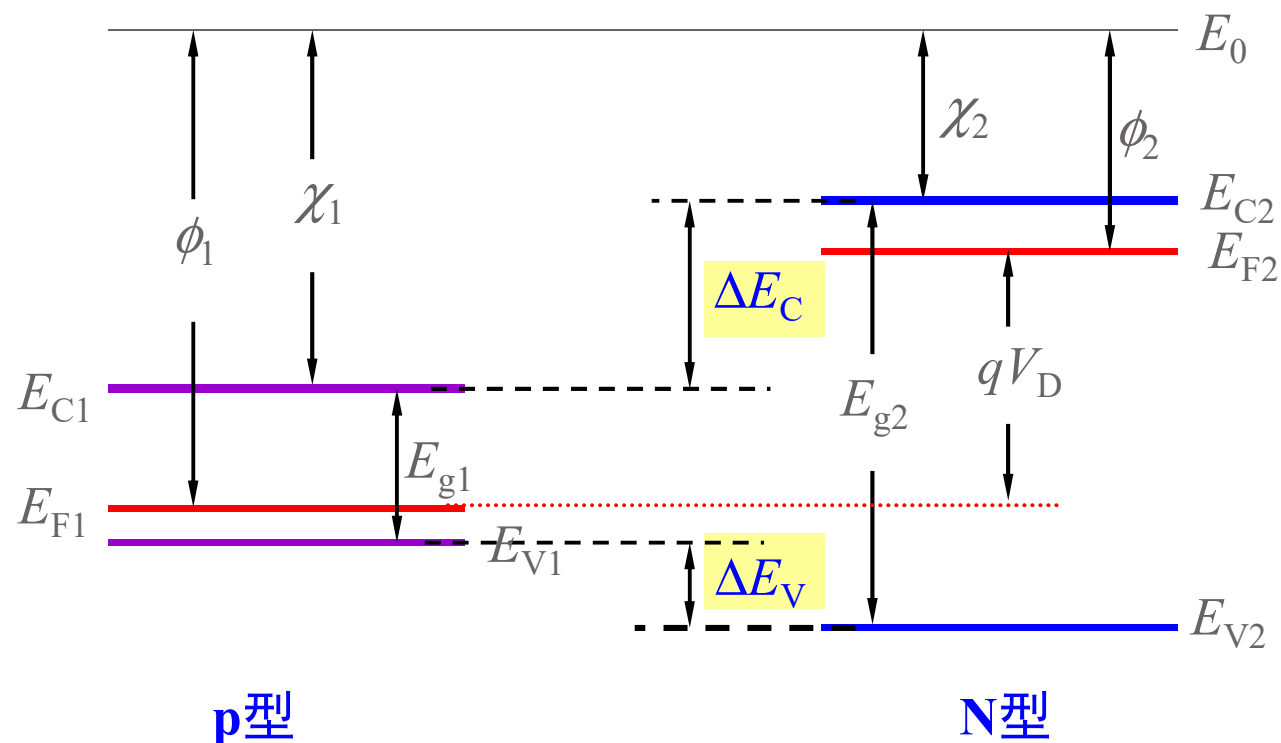


- 导带能级差: 等于材料亲和能之差 $\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2$
- 价带能级差: 带隙宽度差+导带能级差

$$\Delta E_V = (\chi_1 + E_{g1}) - (\chi_2 + E_{g2}) = E_{g1} - E_{g2} + \Delta E_C$$

- 注: 此为黄昆先生书中的结果

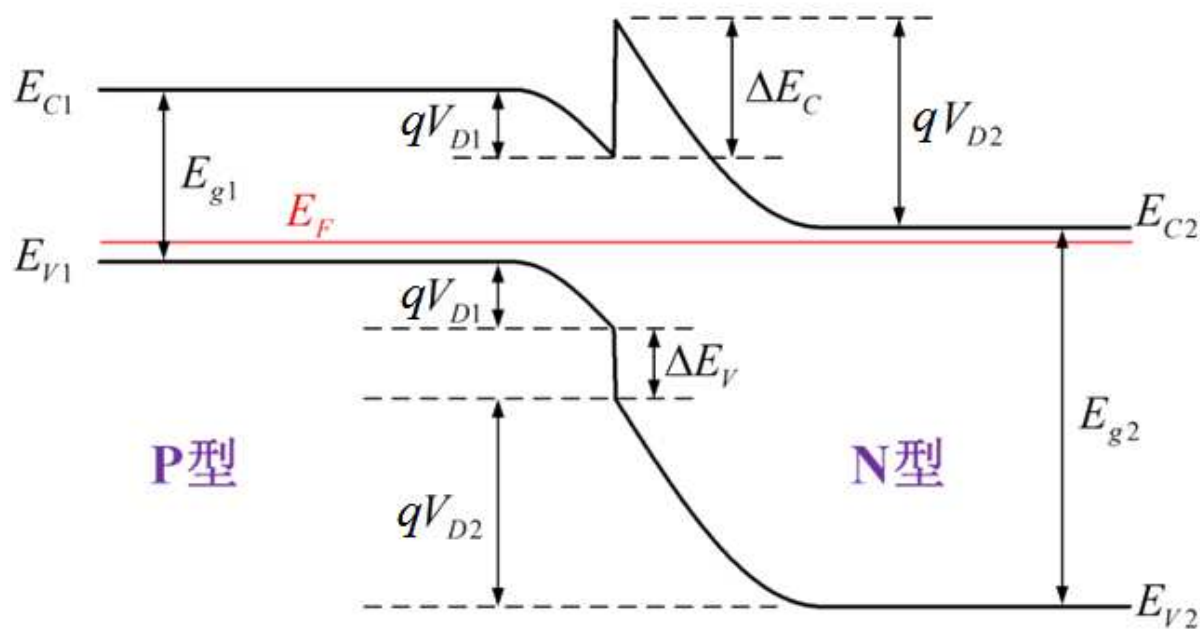
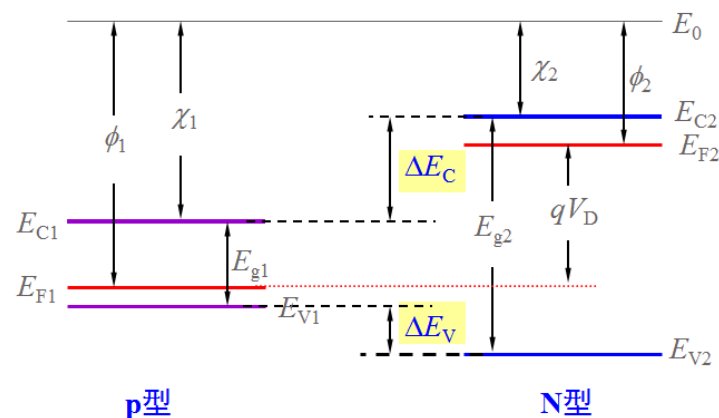
两种半导体材料的能带图



- 导带能级差: $\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2$
- 价带能级差: $\Delta E_V = (\chi_2 + E_{g2}) - (\chi_1 + E_{g1}) = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_C$
- 导带能级差+价带能级差=带隙宽度差
- 注: 此为一般半导体物理书中的结果

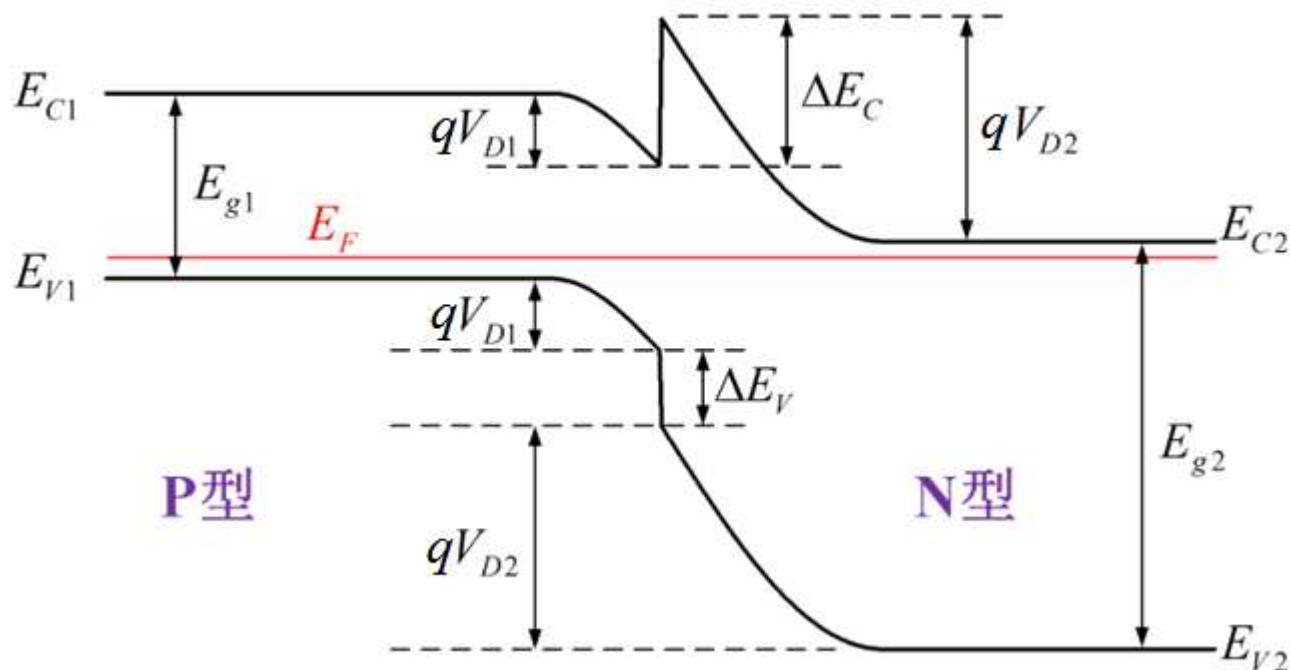
组成异质结之后的能带图

- 电荷流动
 - 电子从N区流向p区
 - 空穴从p区流向N区
- 形成空间电荷区
 - 内建电场将费米能级拉平



两种不同半导体材料构成pN结后的能带图

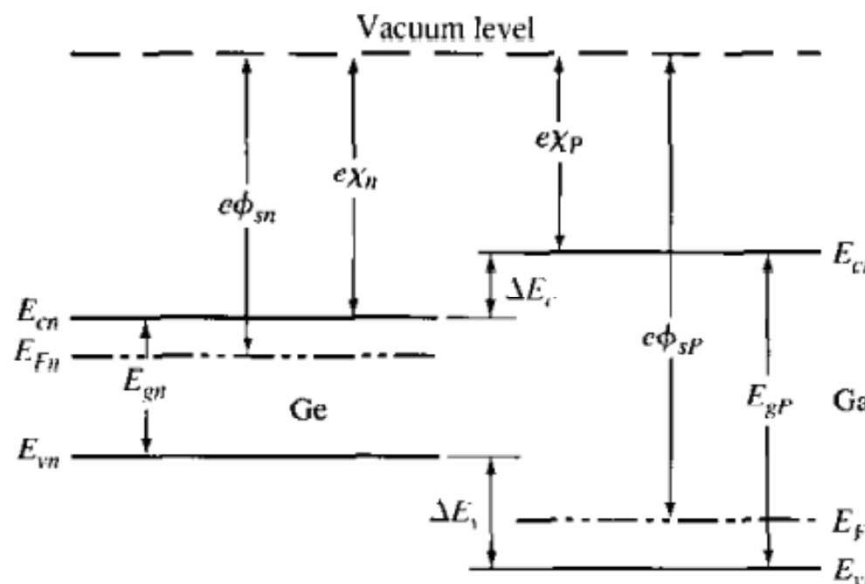
组成异质结之后的能带图



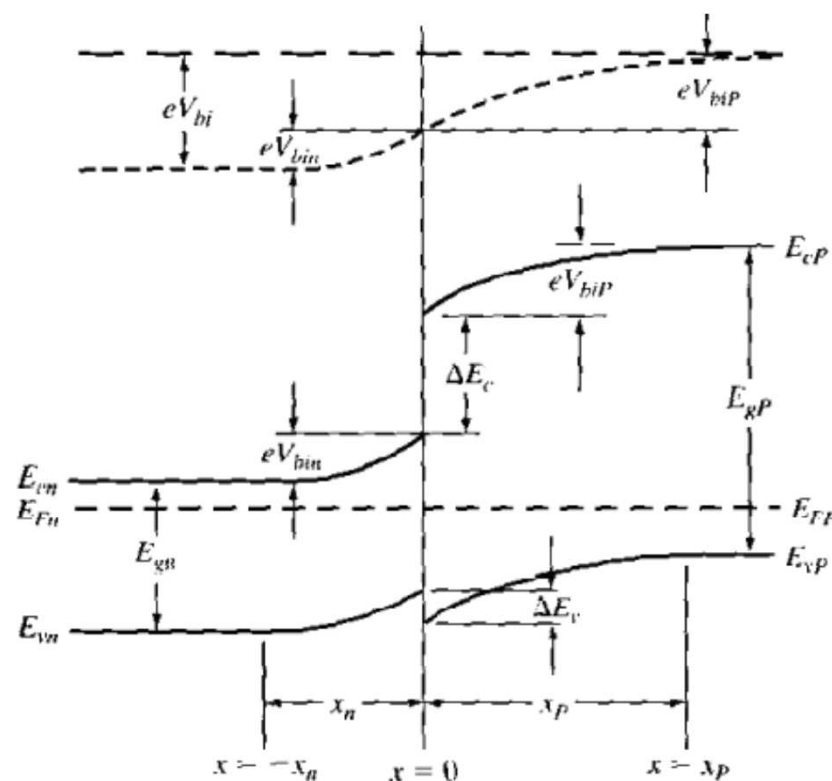
两种不同半导体材料构成pN结后的能带图

- 能带在界面出现间断
 - 例中，p区导带出现峡谷，N区导带出现尖峰

异质结的理想能带图画法



Pn型异质结



关键：确定能带弯曲的方向和保持能带差不变

同质PN结的注入比

总电流: $j = j_n + j_p = j_s \left(e^{qV/K_B T} - 1 \right)$

注入比定义: 总电流中, 电子电流与空穴电流的比例

普通PN结 (同质结)

注入到 p 区的电子电流密度为: $j_n = q \frac{D_n}{L_n} n_P^0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right)$

注入到 n 区的空穴电流密度为: $j_p = q \frac{D_p}{L_p} p_N^0 \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right)$

同质PN结的注入比

$$\text{总电流: } j = j_n + j_p = j_s \left(e^{qV/k_B T} - 1 \right)$$

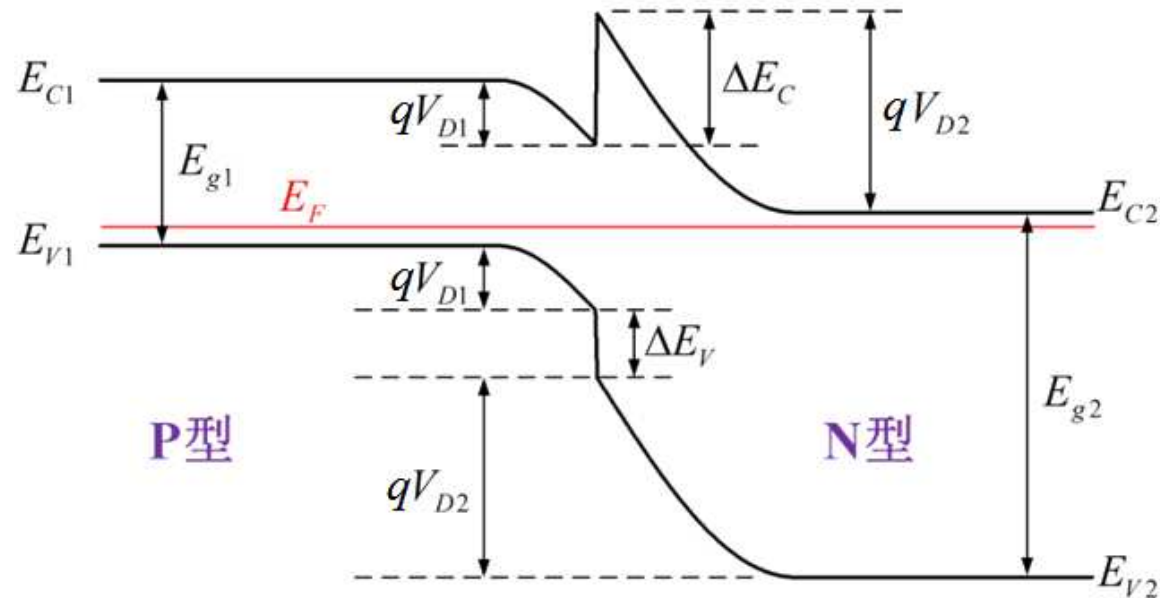
注入比定义：总电流中，电子电流与空穴电流的比例

正偏压下的电子注入比：

$$\frac{j_n}{j_p} = \frac{\frac{D_n n_P^0}{L_n}}{\frac{D_p p_N^0}{L_p}} = \frac{D_n L_p n_P^0}{D_p L_n p_N^0}$$
$$n_P^0 = \frac{n_i^2}{p_P} \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$
$$p_N^0 = \frac{n_i^2}{n_N} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$
$$\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A}$$

提高注入比的办法：提高N型区的施主杂质浓度

异质PN结具有很高的注入比



$$\frac{j_n}{j_p} = \frac{D_n L_p n_P^0}{D_p L_n p_N^0}, \quad n_P^0 = \frac{n_{iP}^2}{p_P} \approx \frac{n_{iP}^2}{N_A}, \quad p_N^0 = \frac{n_{iN}^2}{n_N} \approx \frac{n_{iN}^2}{N_D}$$

$$n_i = (N_- N_+)^{1/2} e^{-E_g / 2k_B T} \rightarrow \frac{n_{iP}^2}{n_{iN}^2} \approx e^{(E_{gN} - E_{gP}) / k_B T}$$

异质PN结具有很高的注入比

异质结中电子注入比：

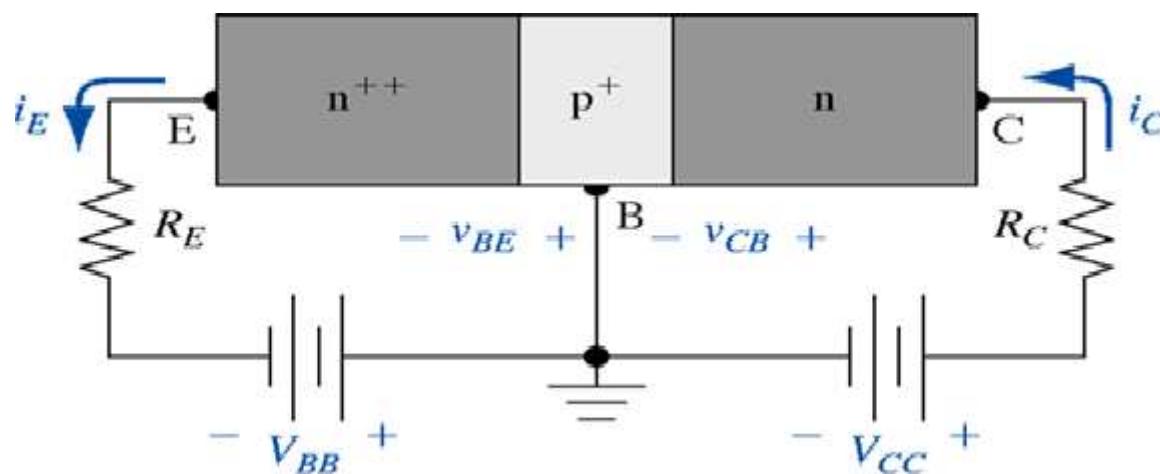
$$\frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n n_P^0}{L_n} \bigg/ \frac{D_p p_N^0}{L_p} = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A} e^{\frac{E_{gN} - E_{gP}}{k_B T}}$$

异质结构的优点：

也就是说，N型区的带隙宽度比p型区带隙宽度大，
可以进一步以指数级增加注入比

- 提高注入比的意义
 - 提高晶体管放大系数-异质结双极晶体管HBT

异质结双极晶体管



异质结双极晶体管的结构特点是具有**宽带隙的发射区**，大大提高了发射结的载流子注入效率。 ΔE_g 的存在允许基区比发射区有更高的掺杂浓度，因而可以降低基极电阻，减小发射极-基极电容，从而能得到高频、高速、低噪声的性能。由于 $\Delta E_g > 0$ 、并且有一定的范围，所以电流增益也很高。

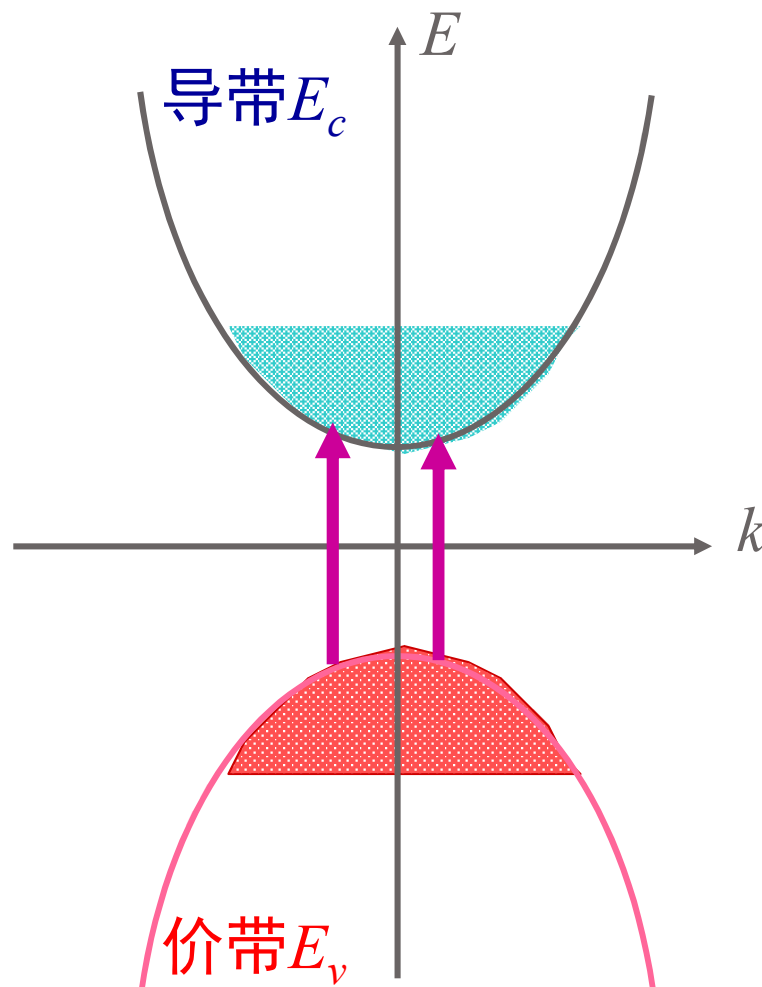
适合低相位噪声振荡器、高效功率放大器、宽带放大器

本征光吸收

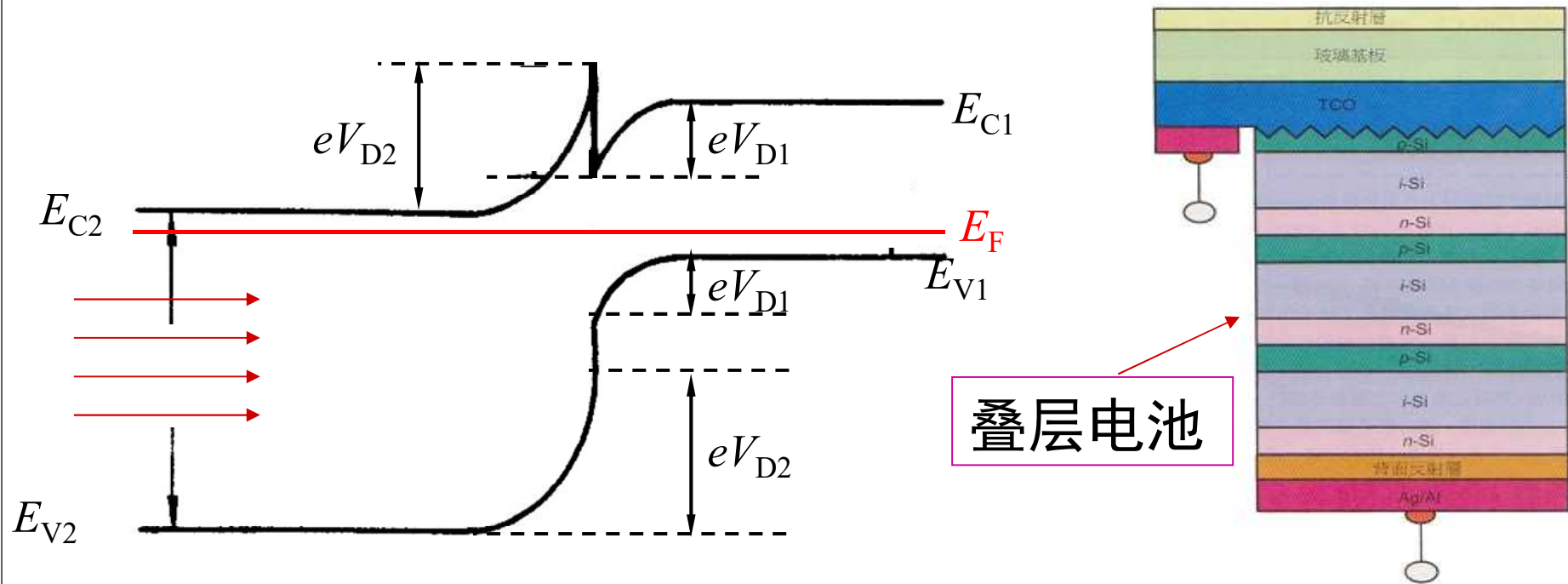
光照激发价带电子到导带，
形成电子-空穴对的过程

$$\hbar\omega \geq E_g$$

准动量守恒——竖直跃迁



“窗口效应”



光直接通过宽带隙的N区，而在带隙较窄的P区吸收
有效地减少表面复合以及高掺杂层的影响

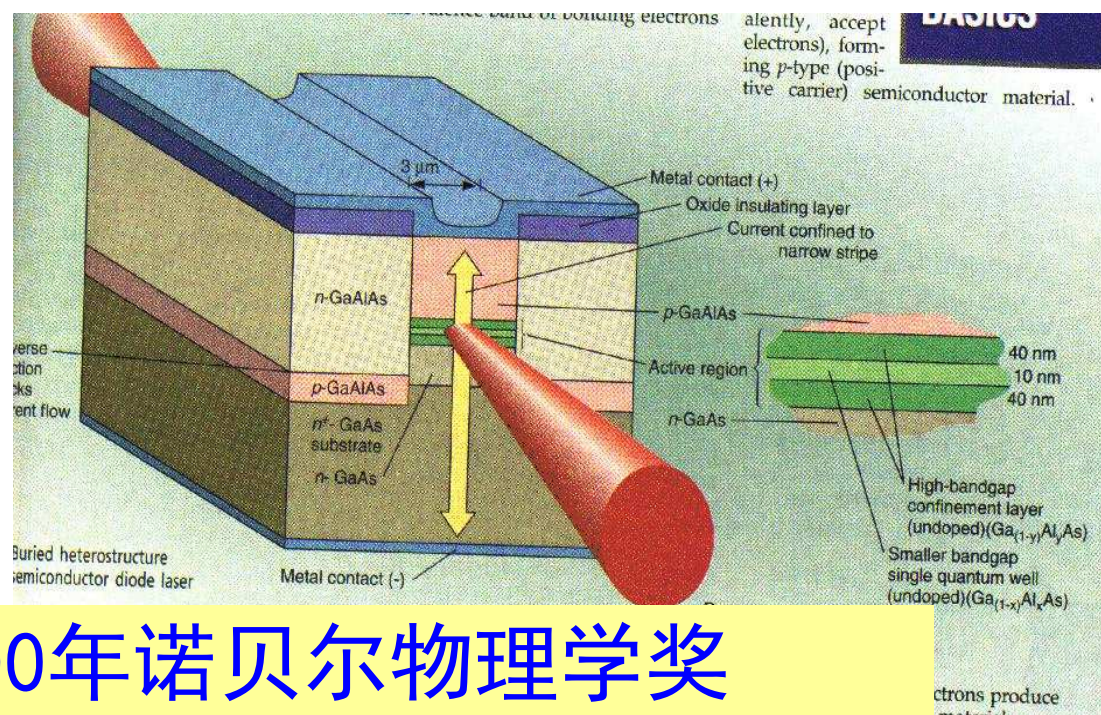
双异质结半导体激光器

1962

以同质pn结为基础,为了实现激射。必须注入很大的电流,而且只能在极低的温度下工作

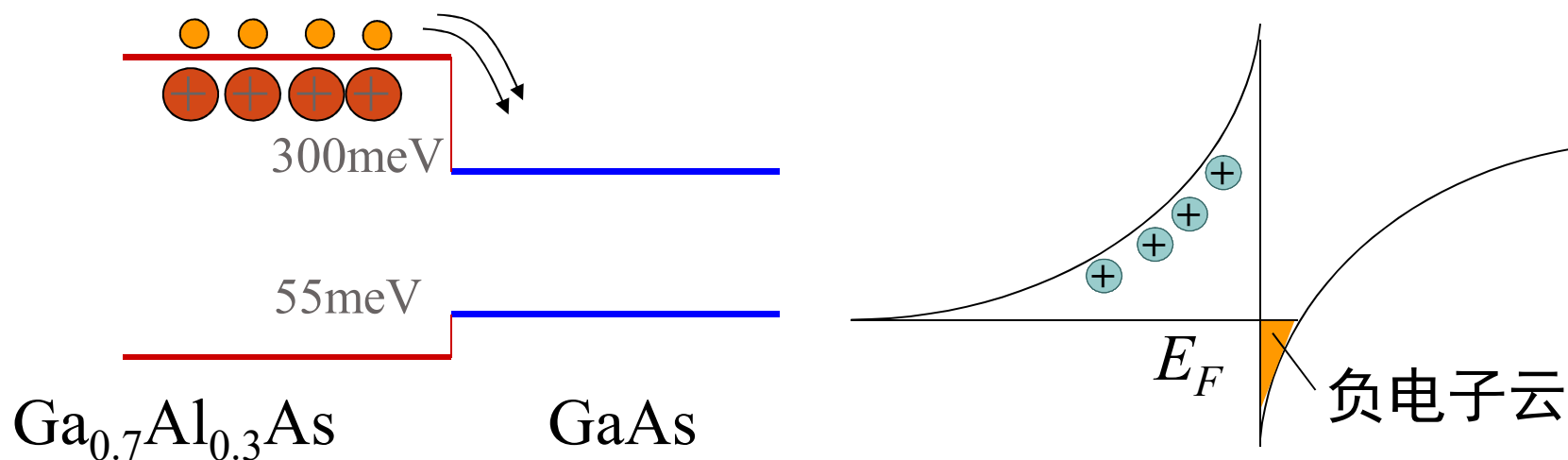
1970

双异质pn结引入,实现了
 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 异质结激光器的室温连续工作



获得2000年诺贝尔物理学奖

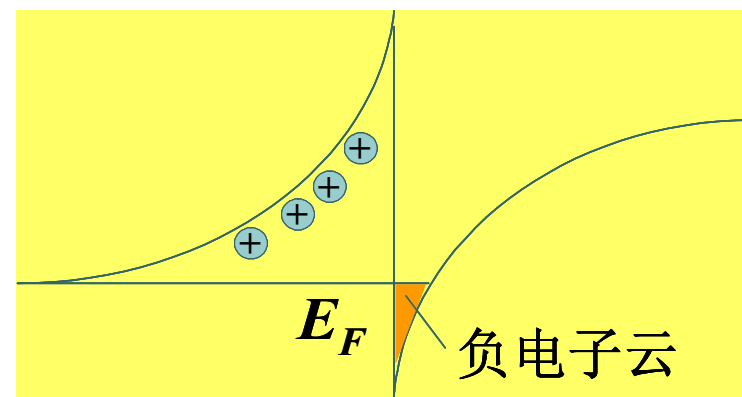
调制掺杂异质结构



- 在宽禁带的AlGaAs中掺以施主杂质，GaAs材料不掺杂
- 电子将从AlGaAs转移到GaAs
- 在AlGaAs一侧形成耗尽层，GaAs一侧有电子积累，构成调制掺杂异质结构

二维电子气体系统提高电子迁移率

- 电子被限制在窄的势阱中



- 尺度在10nm左右
- 垂直界面的方向，电子运动是量子化的，平行界面的方向，电子运动是自由的，属于一种二维电子气
- GaAs中的电子
 - 形成很高的电子浓度，但是不含有电离施主杂质
 - 电子与电离施主在空间分离，电子受电离杂质散射几率减弱，载流子迁移率大为提高

固体间接接触的电特性

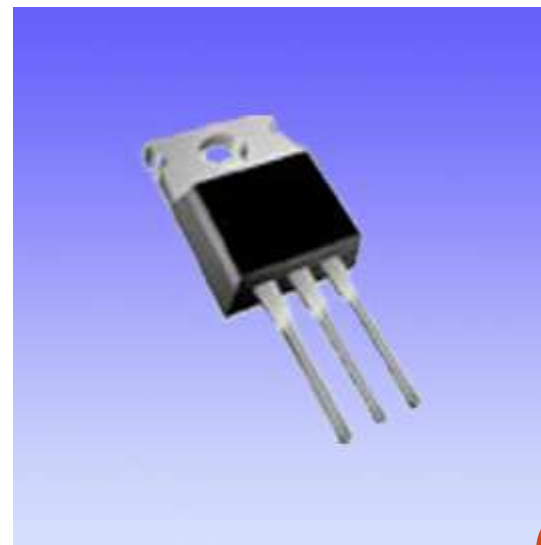
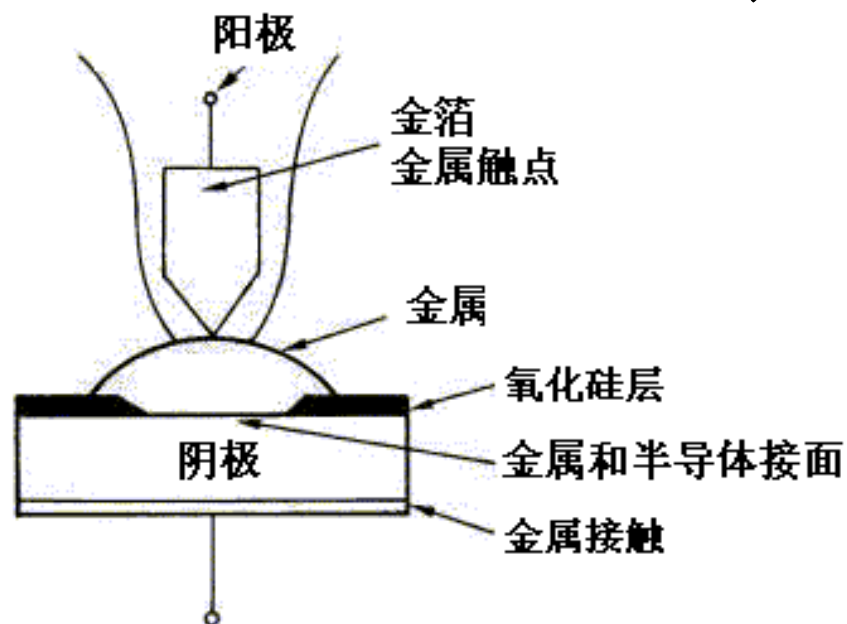
- 功函数与接触电势
- PN 结
- 金属-半导体(肖特基)结
- 金属-绝缘体-半导体系统

肖特基结

1938年，德国物理学家肖特基（Walter Schottky）发展了一套理论，以解释金属-半导体结

肖特基二极管——最早的半导体器件

金属须和裸露的半导体表面轻触而成
不容易形成，且可靠性差



肖特基结

1938年，德国物理学家肖特基（Walter Schottky）发展了一套理论，以解释金属-半导体结

肖特基二极管——最早的半导体器件
金属须和裸露的半导体表面轻触而成
不容易形成，且可靠性差

讨论金属-半导体接触（欧姆接触）的基础

金属-半导体结在IC电路的实际制作过程中非常重要，
因为其中有成百万、上亿个导线和有源器件的接触点

- 肖特基势垒（Schottky barrier）（与PN结相似）
- 欧姆接触（Ohmic contact）（与电阻相似）
- MOS接触（metal-oxide-semiconductor）

肖特基势垒-肖特基结

典型功函数(eV):

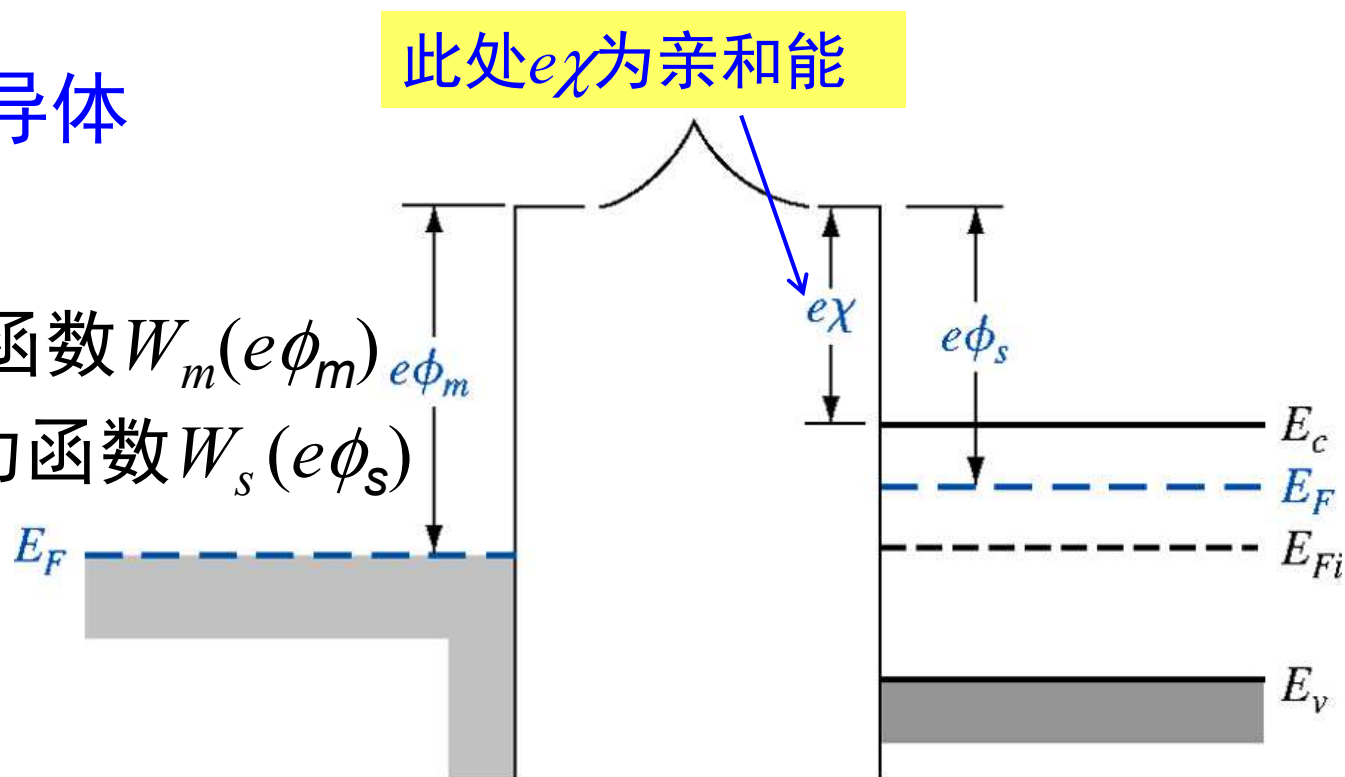
金属: Al 4.28, Au 5.1, Pt 5.65

半导体: Si 4.01, Ge 4.13, GaAs 4.07

金属-n型半导体

接触前:

一般金属的功函数 $W_m(e\phi_m)$
大于半导体的功函数 $W_s(e\phi_s)$

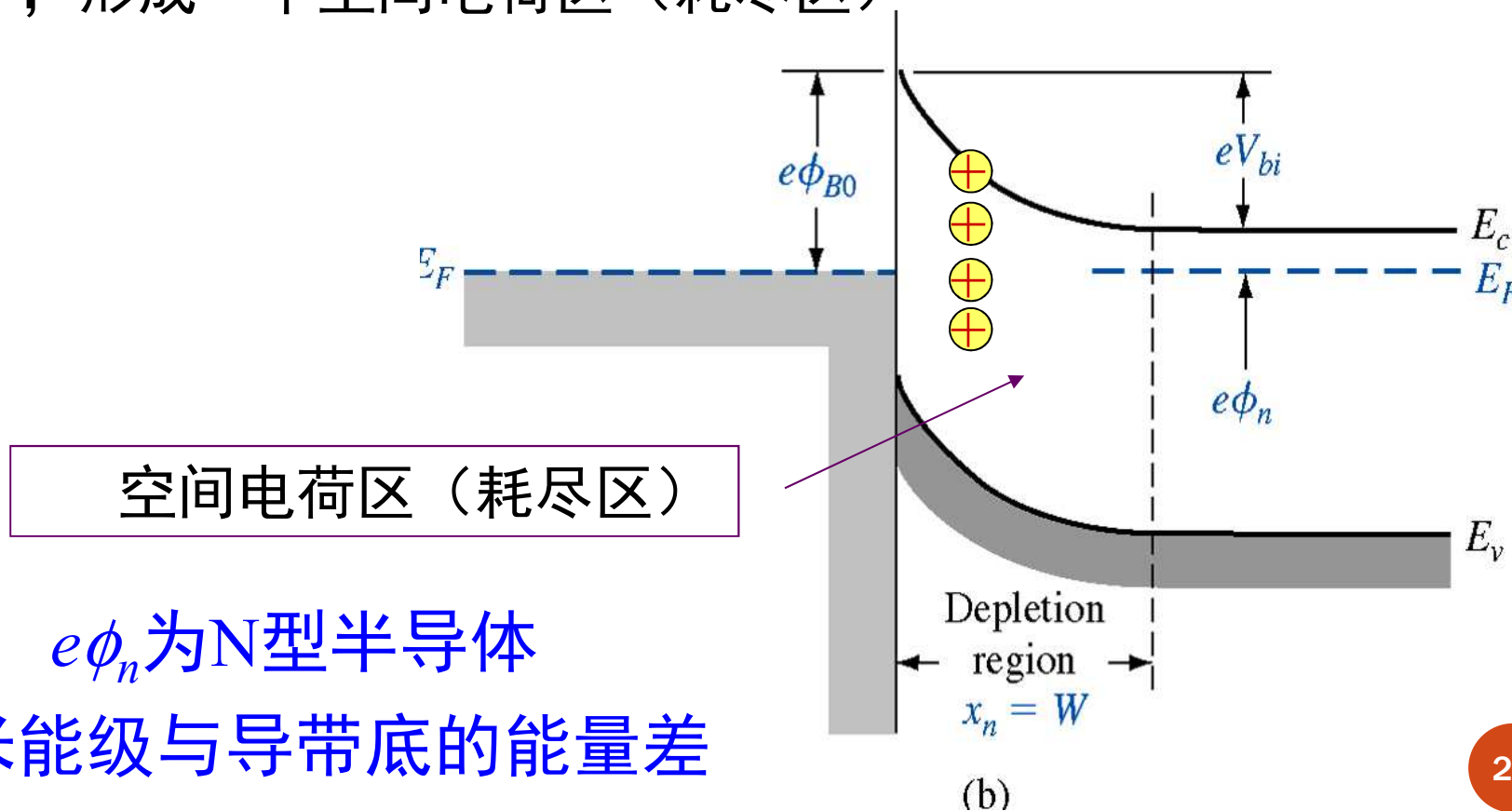


(a)

肖特基势垒-肖特基结

接触后： 金属-n型半导体 \rightarrow 金属-(p)-n型半导体

热平衡下，电子流向能量更低的金属，带正电荷的施主离子留下，形成一个空间电荷区（耗尽区）



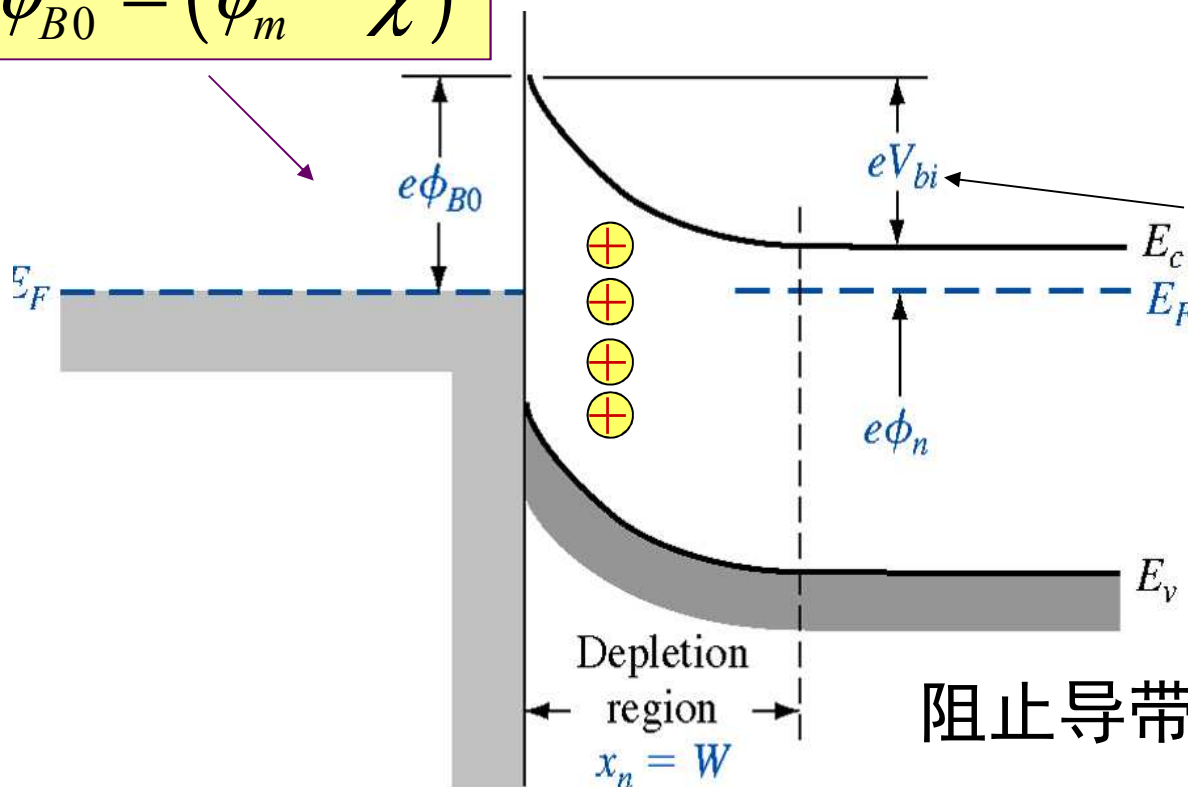
肖特基势垒-肖特基结

金属-n型半导体 → 金属-(p)-n型半导体

肖特基势垒

$$\phi_{B0} = (\phi_m - \chi)$$

阻止金属电子向半导体运动



内建电势差

$$V_{bi} = (\phi_{B0} - \phi_n)$$

阻止导带电子向金属运动

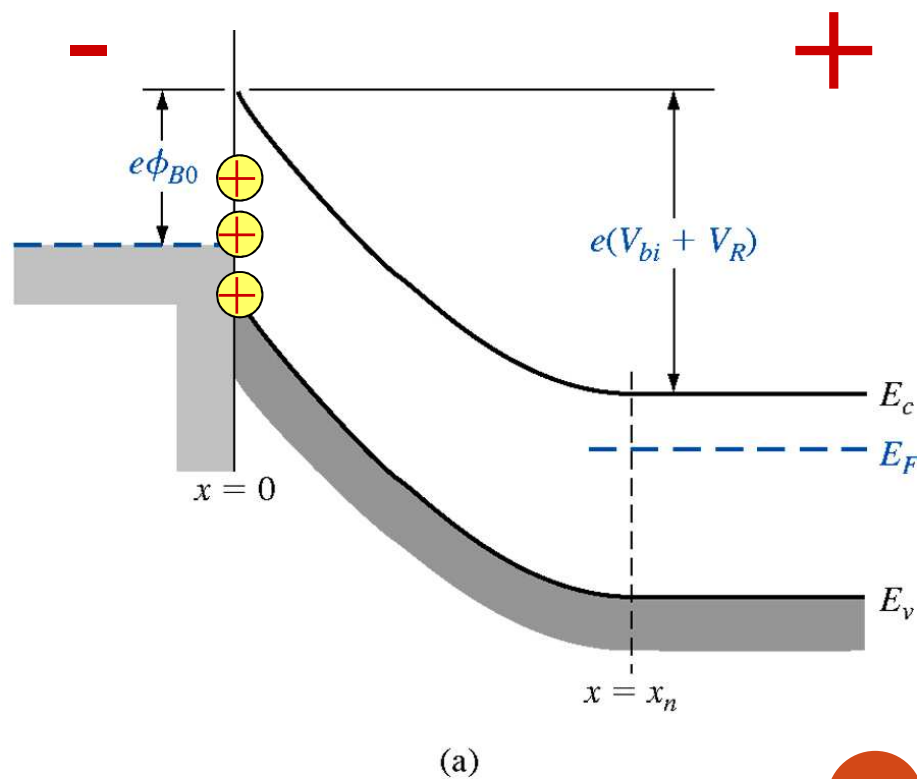
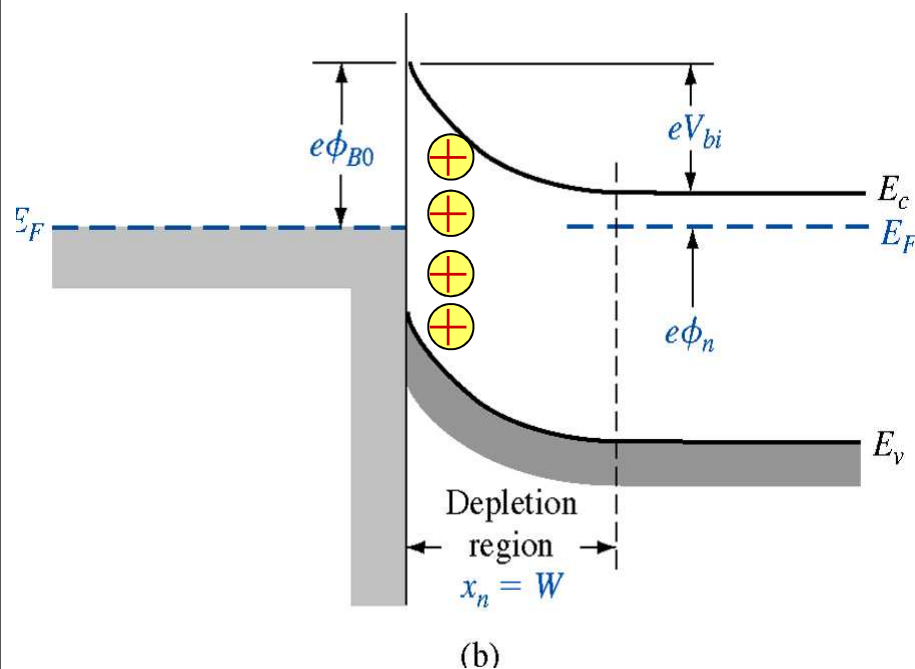
(b)

偏压的影响——金属为负极

金属-n型半导体

→ 金属-(p)-n型半导体

半导体到金属的势垒高度增加， ϕ_{B0} 不变，电子可以从金属流向半导体

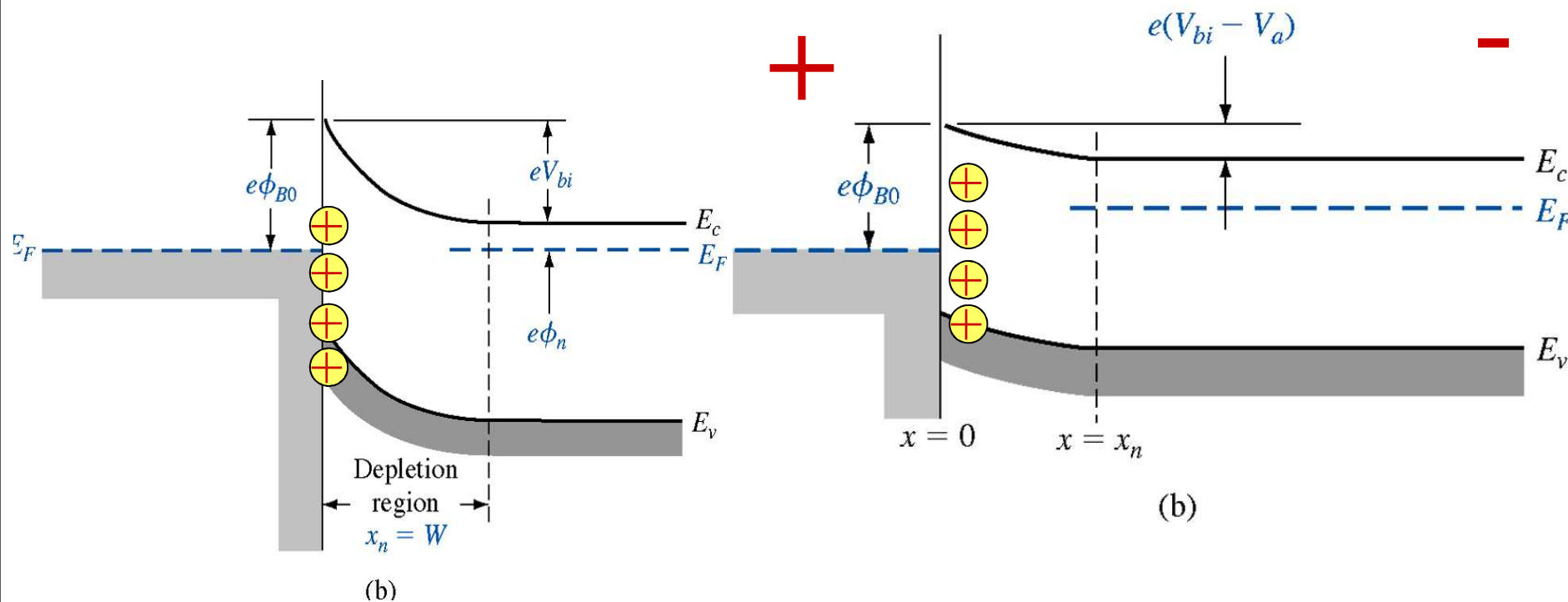


偏压的影响——金属为正极

金属-n型半导体

→ 金属-(p)-n型半导体

半导体到金属的势垒高度减小，
 ϕ_{B0} 不变，电子很容易
从半导体流向金属



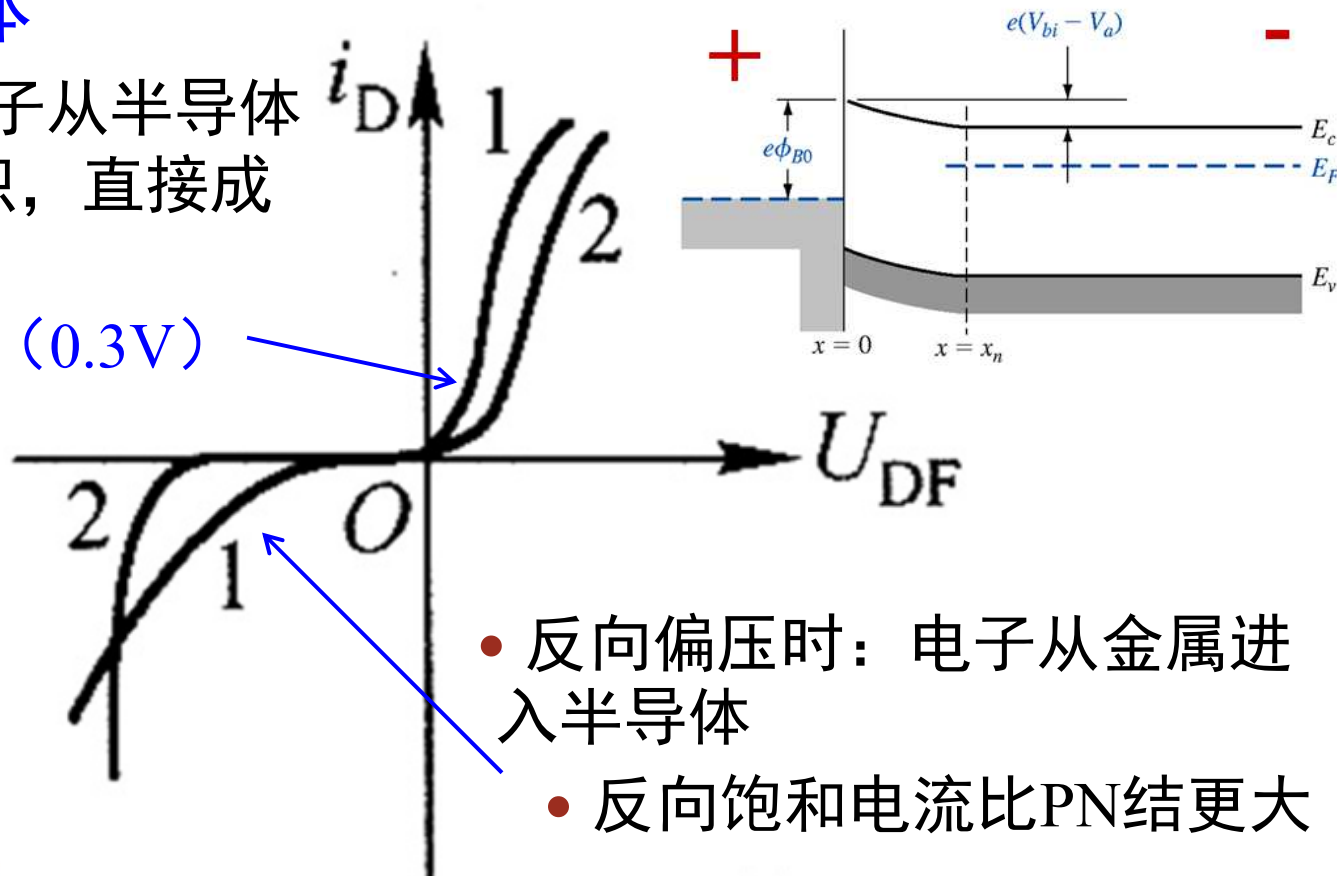
金属-p型半导体请参考韦丹书 P185

肖特基结与PN结的对比

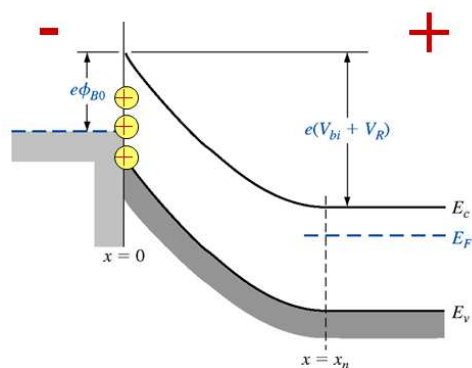
金属-n型半导体

- 正向偏压时：电子从半导体进入金属后不累积，直接成为漂移电流

- 开启电压更低 (0.3V)
- 高频特性更好



- 反向偏压时：电子从金属进入半导体
- 反向饱和电流比PN结更大



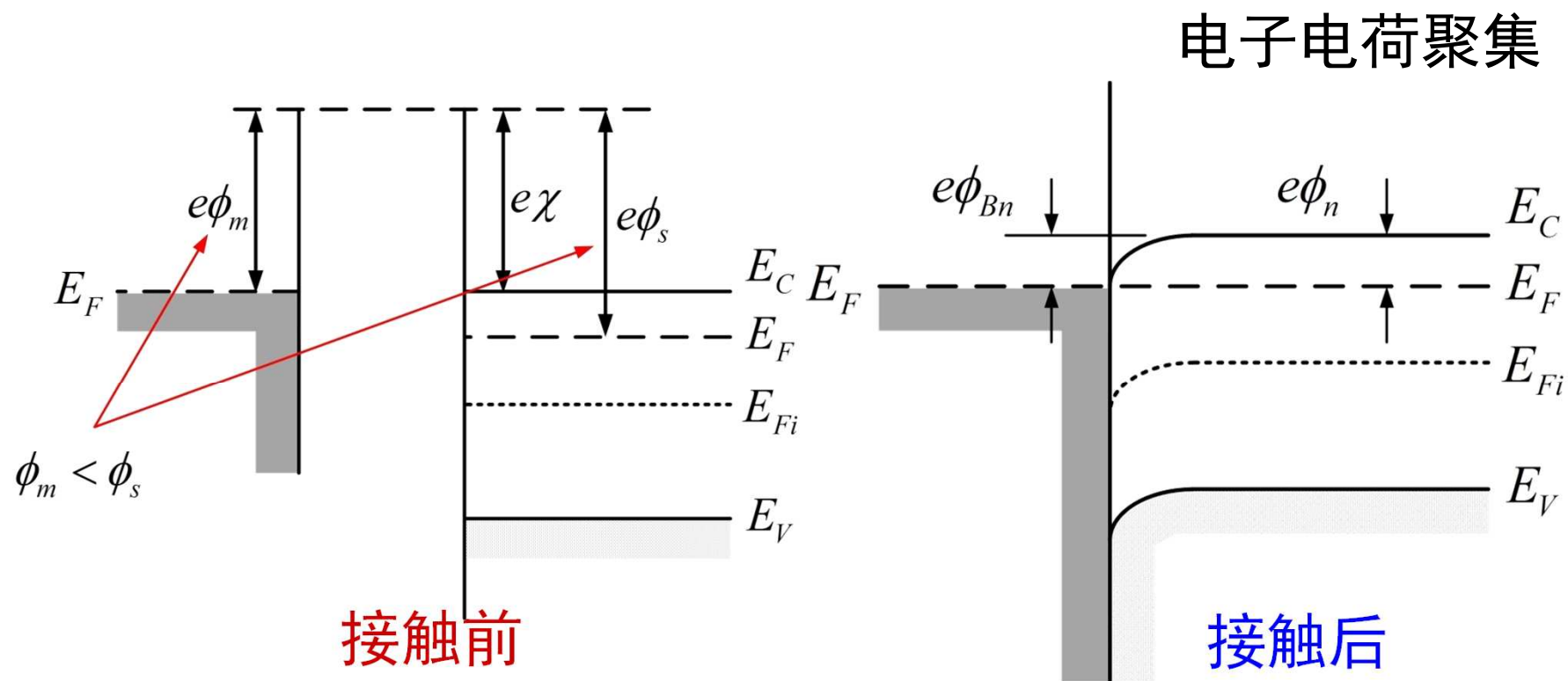
1 — 肖特基二极管;
2 — PN结二极管

金属与半导体的欧姆接触

欧姆接触是指金属与半导体的接触，而其接触面的电阻值远小于半导体本身的电阻，不产生明显的附加阻抗，而且不会使半导体内部的平衡载流子浓度发生显著的改变

- 金属与半导体接触，但不形成肖特基结
- 接触电阻很低，双向都形成电流接触
- 理想情况下，电流与电压成正比，电压很低

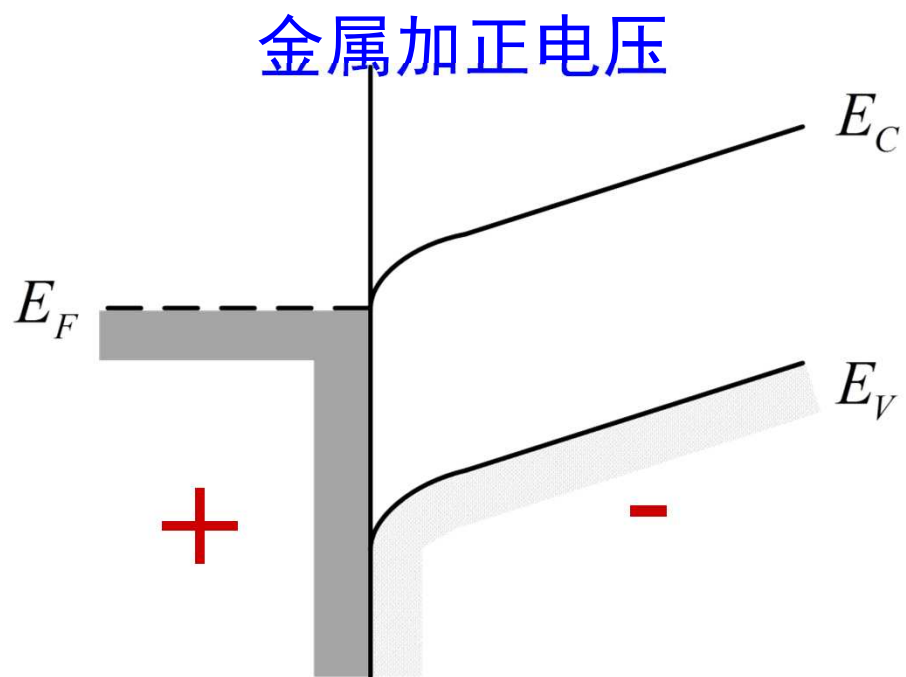
金属-n型半导体欧姆接触



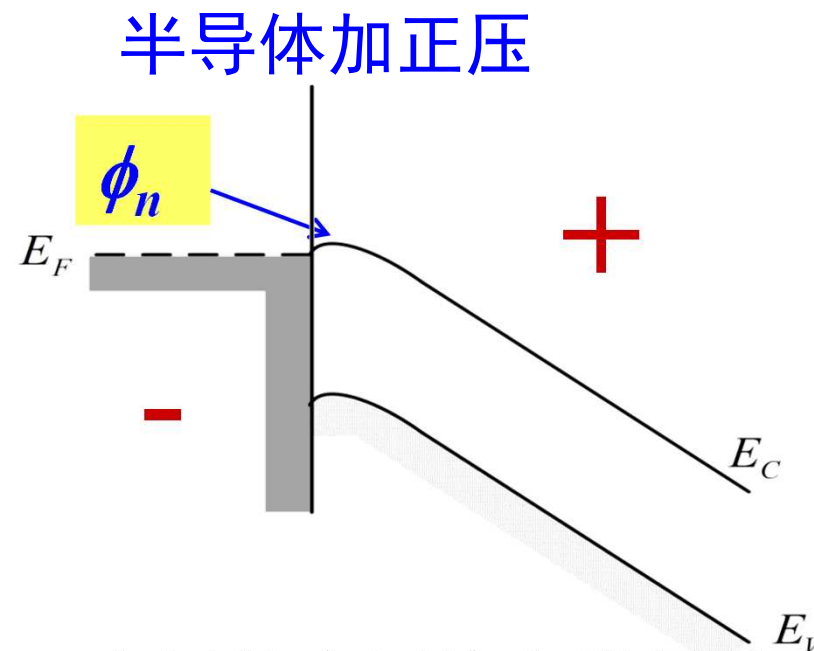
特别注意：金属的功函数小于半导体 $\phi_m < \phi_s$

- 为了达到热平衡，电子从金属流向半导体，半导体更加趋向n型
- 在界面有电子电荷聚集

金属-n型半导体欧姆接触



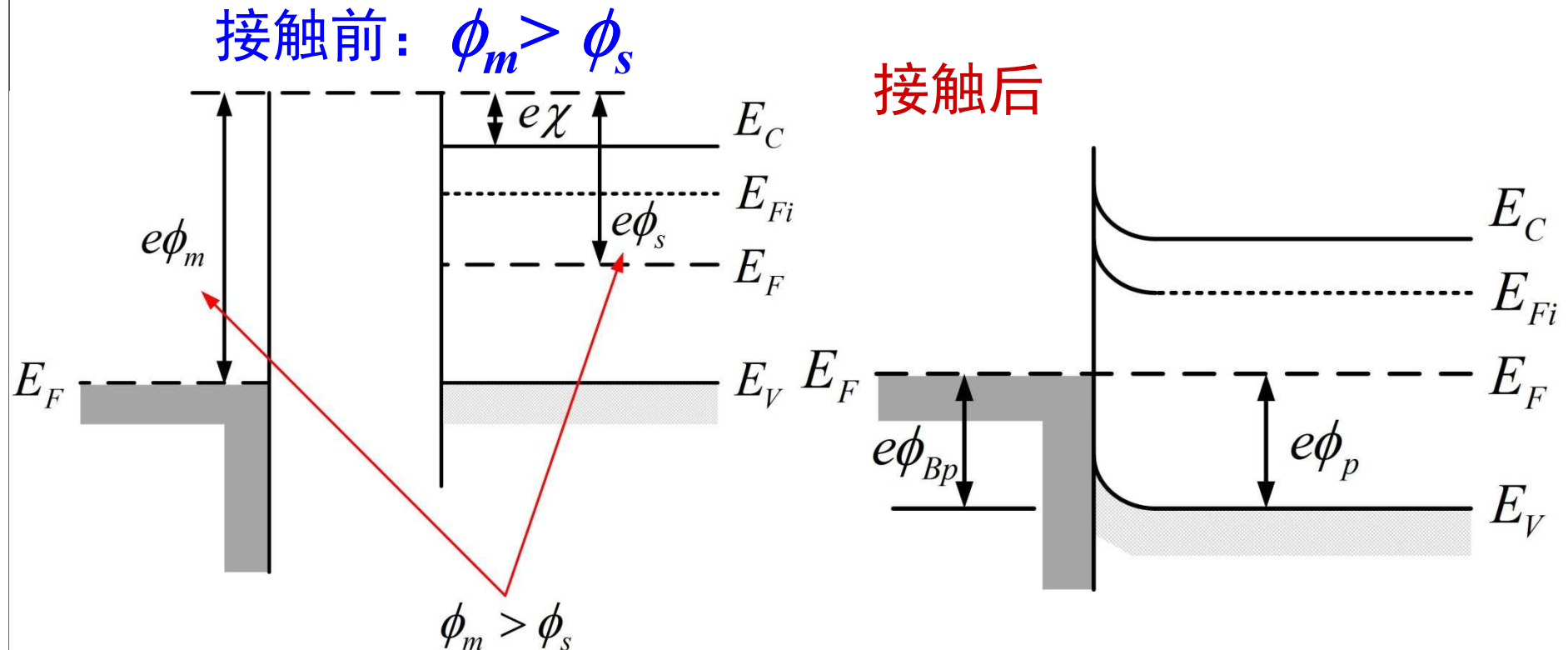
电子从半导体流向金属，半导体导带能量高于金属费米能级，不存在电子的势垒



电子从金属流向半导体，存在一个小势垒 ϕ_n 对于重掺杂的n型， ϕ_n 很小，电子很容易流向半导体

特别注意：金属的功函数小于N型半导体

金属-p型半导体欧姆接触

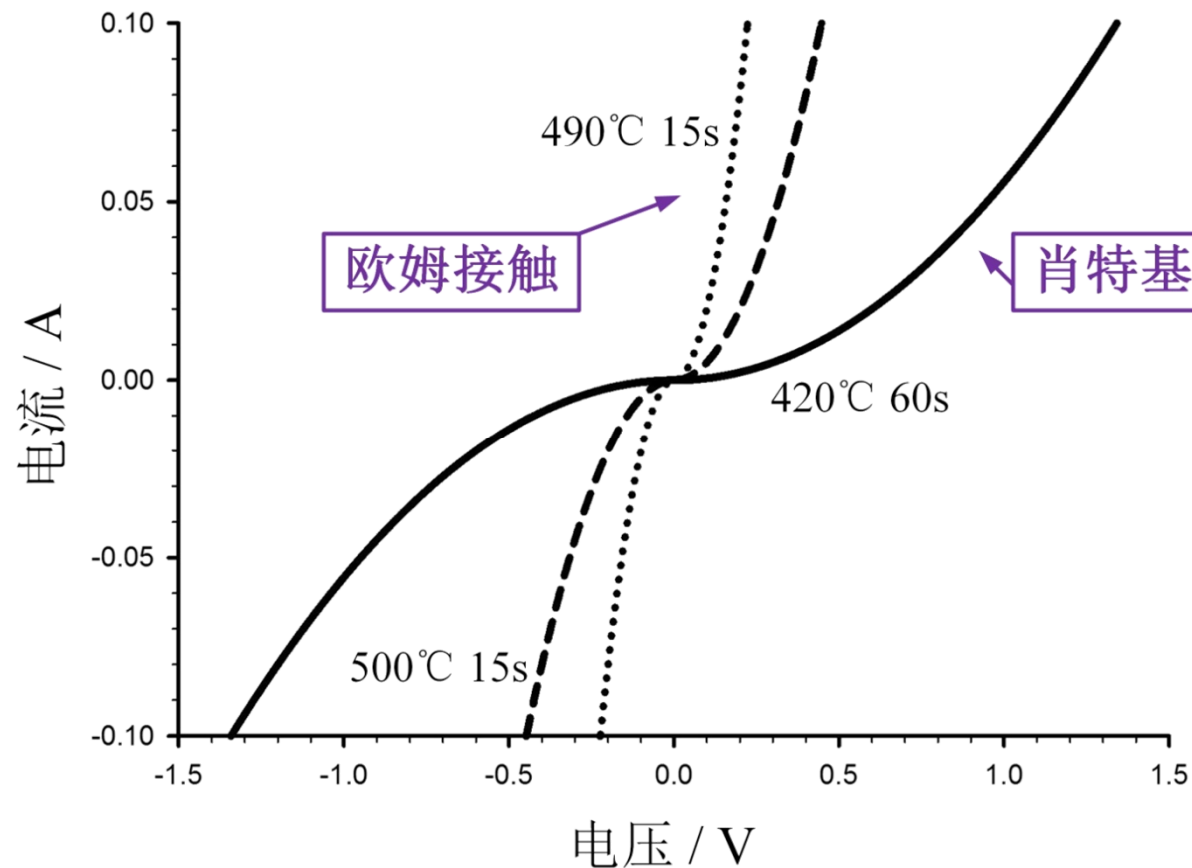


- p型半导体中有许多空穴，电子很容易从金属流向半导体，相当于空穴从半导体流向金属
- 由于功函数的差，电子也容易从半导体流向金属

特别注意：金属的功函数大于P型半导体

金属与半导体的欧姆接触

欧姆接触是指金属与半导体的接触，而其接触面的电阻值远小于半导体本身的电阻，不产生明显的附加阻抗，而且不会使半导体内部的平衡载流子浓度发生显著的改变

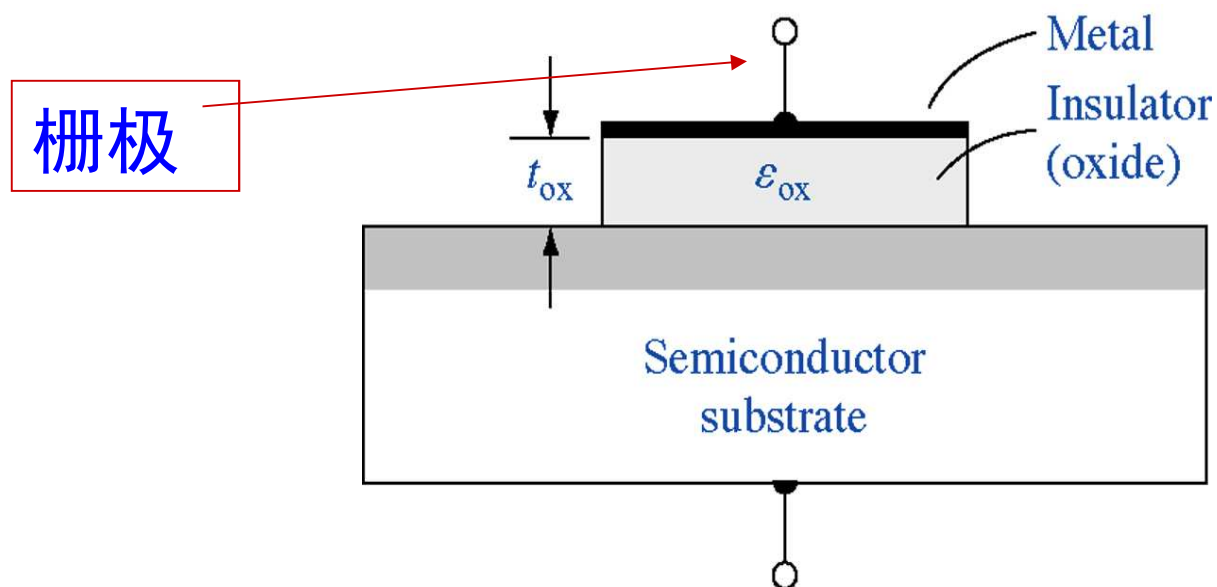


固体间接接触的电特性

- 功函数与接触电势
- PN 结
- 金属半导体结——肖特基结
- 金属-绝缘体-半导体系统——MOS

不要求

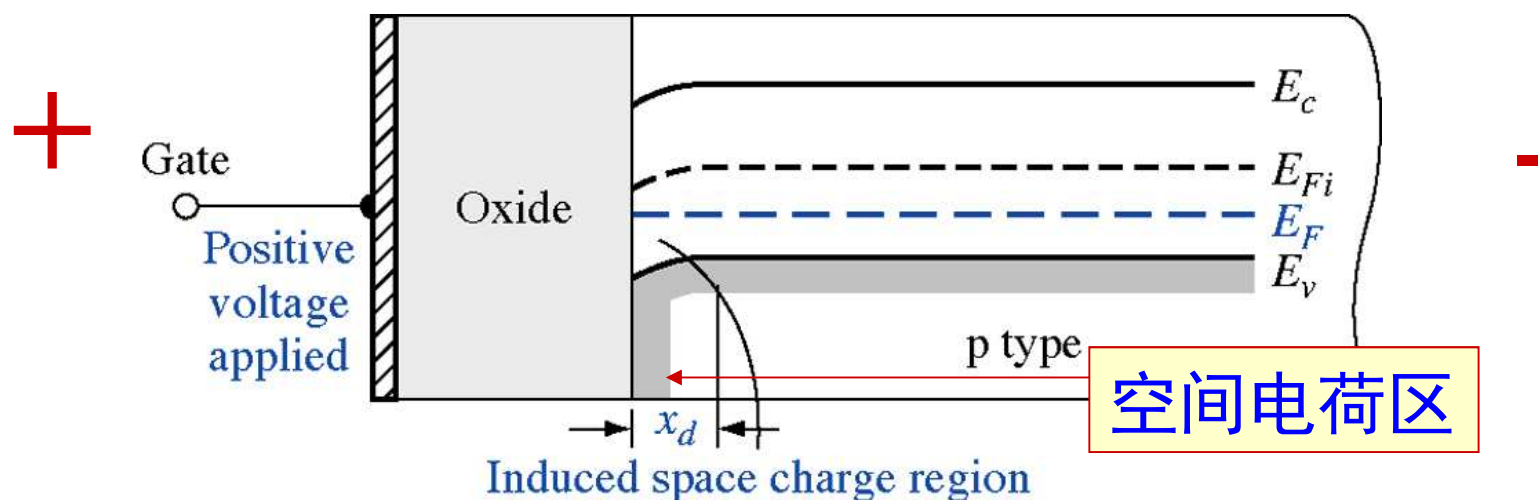
金属-绝缘体-半导体系统



- **MIS: Metal-Insulator-Semiconductor**
- **MOS: Metal-Oxide-Semiconductor**
 - 硅-SiO₂-铝（铜）
 - 更常用的情况下由具有高导电率的多晶硅作为导电层
 - 仍沿用MOS一词

核心：半导体表面的“反型”转变

MOS结构中的空间电荷区



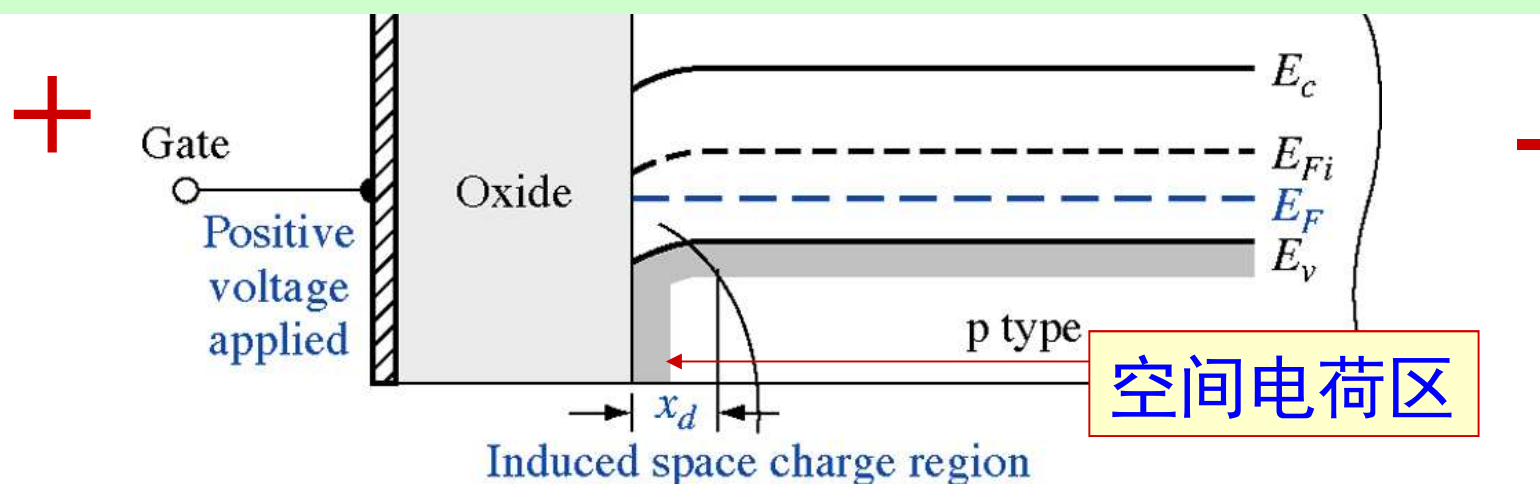
栅极加正压时，即有从P型半导体表面排斥多数载流子空穴的作用又有吸引少数载流子电子到半导体表面的作用。

当正栅压较小时，主要是P型半导体表面的空穴被赶走，形成带负电荷的耗尽层。空间电荷区可屏蔽栅压引起的电场。

空间电荷区中存在的电场引起电势的变化，使能带弯曲向下，形成空穴势垒。

MOS结构中的空间电荷区

半导体表面相对于体内的电势差称为表面势

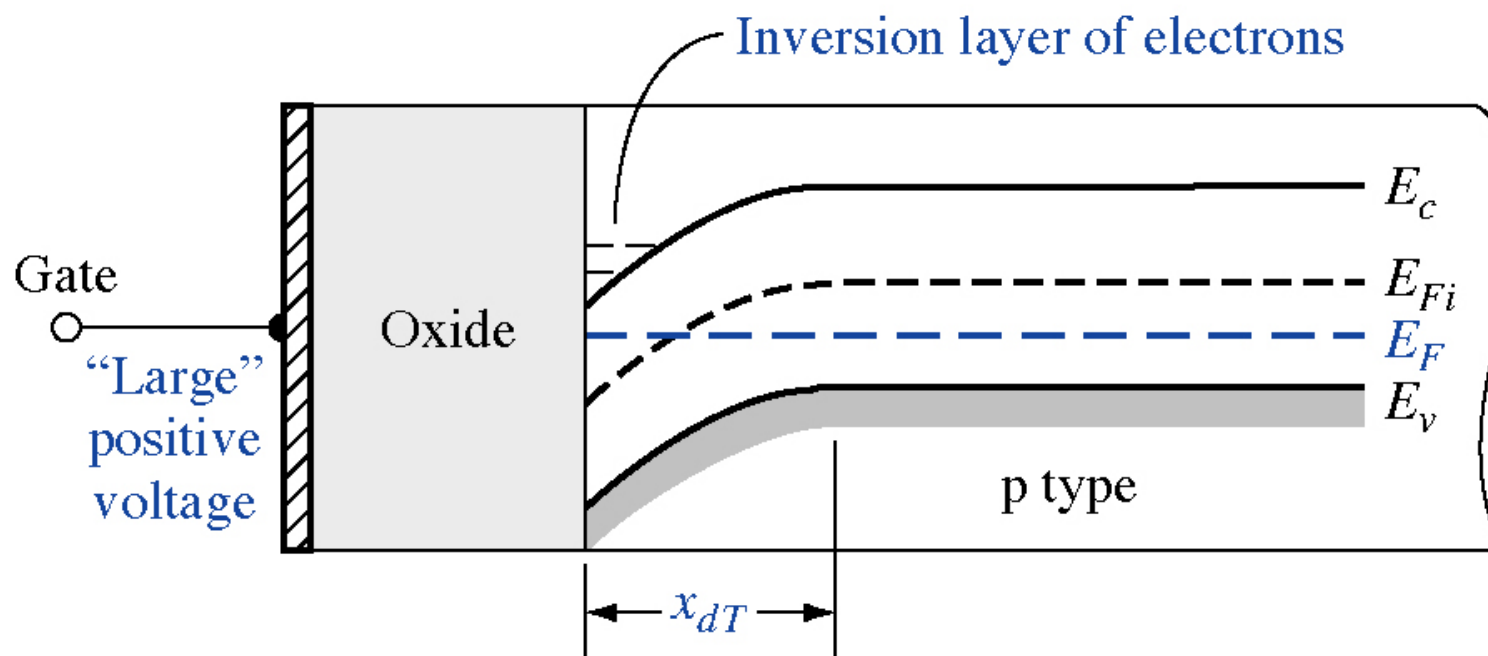


栅极加正压时，即有从P型半导体表面排斥多数载流子空穴的作用又有吸引少数载流子电子到半导体表面的作用。

当正栅压较小时，主要是P型半导体表面的空穴被赶走，形成带负电荷的耗尽层。空间电荷区可屏蔽栅压引起的电场。

空间电荷区中存在的电场引起电势的变化，使能带弯曲向下，形成空穴势垒。

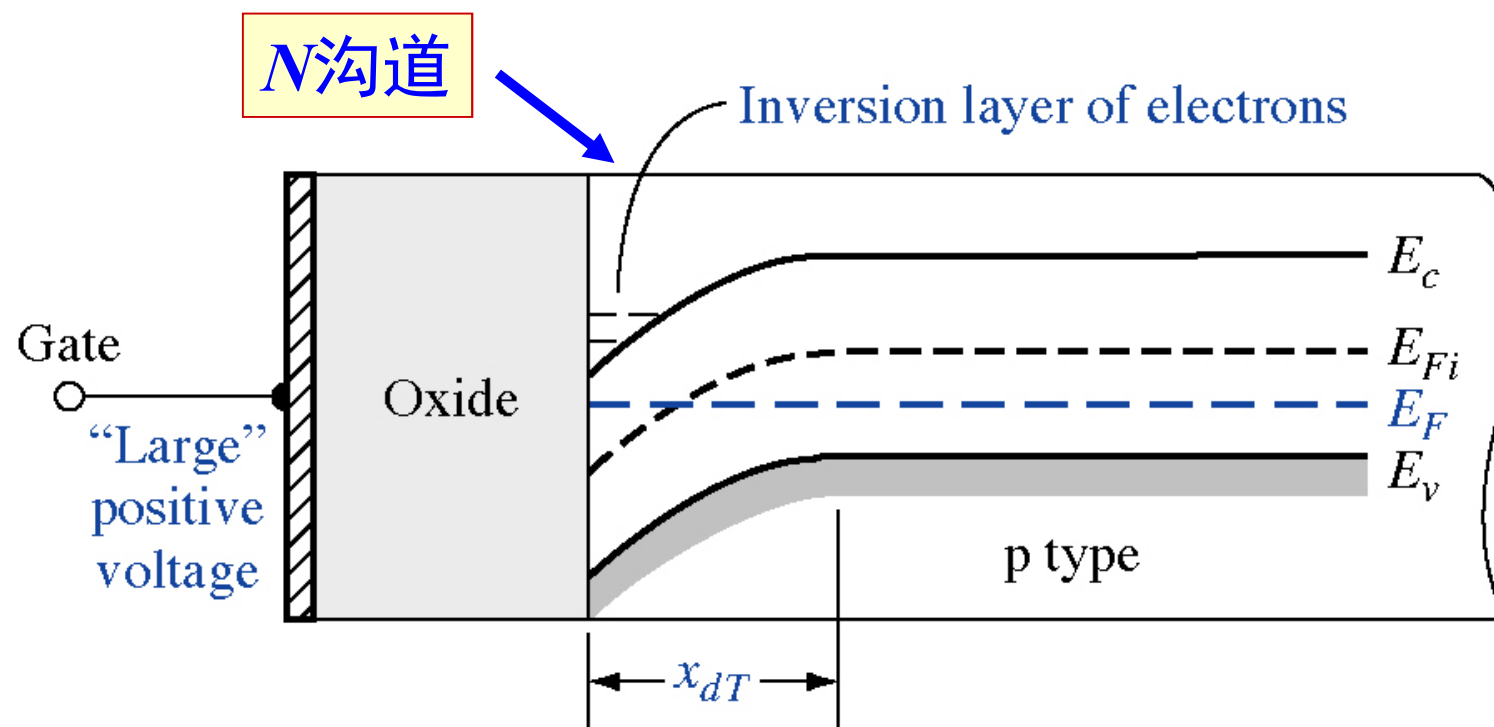
MOS结构中的空间电荷区



当正栅压较大时，表面势增强足够大时，**表面处的费米能级有可能进入带隙上半部**，这时在表面的电子浓度将超过空穴浓度，从而形成电子导电层

其载流子是和体内导电类型是相反的，称其为反型层

MOS结构中的空间电荷区



反型层中的电子实际上被限在表面附近能量最低的一个狭窄区域，因此反型层有时也称为**沟道**。

P型半导体的表面反型层是由电子构成的

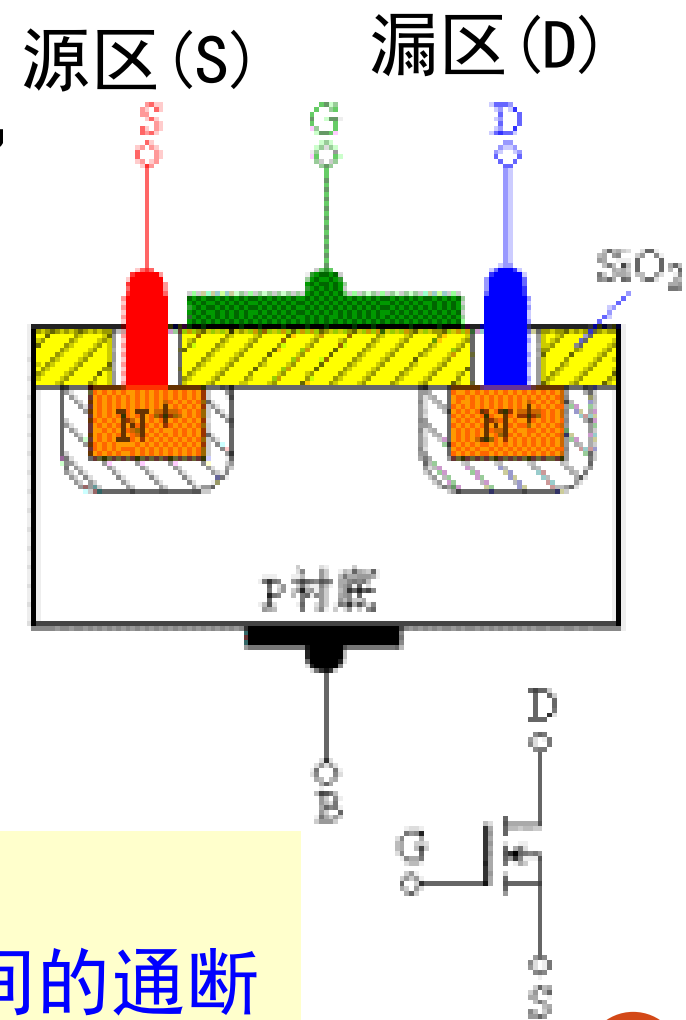
——称为**N沟道**

N型MOS场效应管的基础原理

源区和漏区之间相当于两个背靠背的pn结，
即便加电压，只有反向饱和电流

栅极加以**正偏压**，超过阈值形成反型层，
作为n沟道，再在源极和漏极间加以电压，
则有较明显的电流产生

即通过控制栅极电压，
可控制源、漏之间的通断

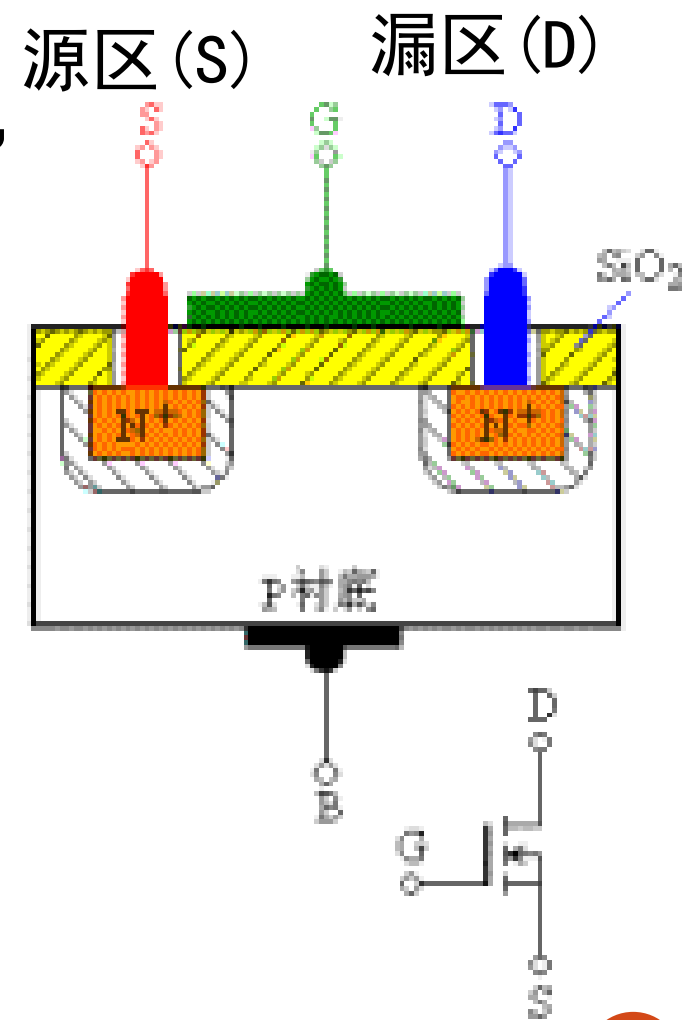


N型MOS场效应管的基础原理

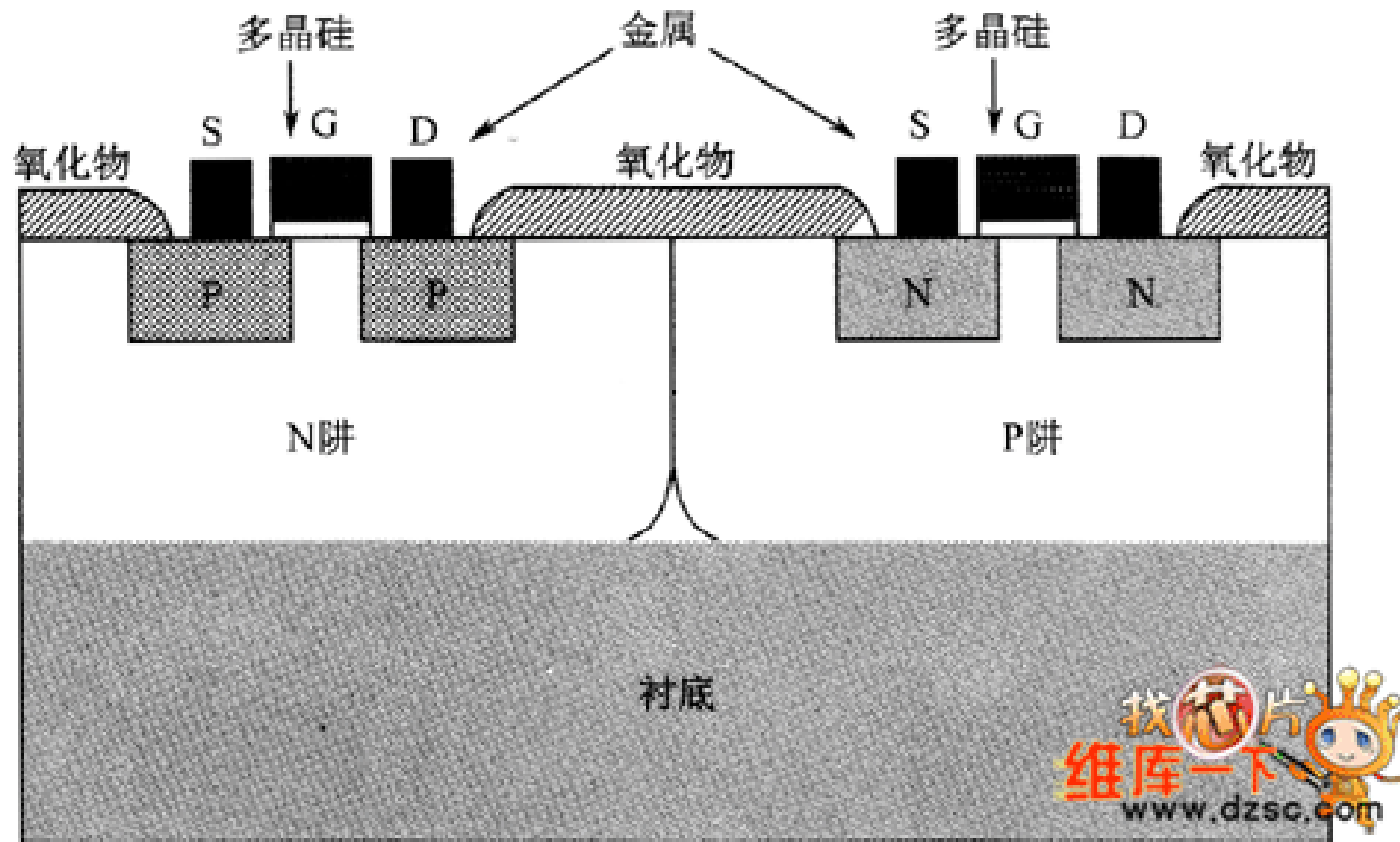
源区和漏区之间相当于两个背靠背的pn结，
即便加电压，只有反向饱和电流

MOS场效应管是单极型器件，
沟道中参加导电的主要是多数
载流子，相比之下易于控制，
热稳定性好，抗辐射能力强

NMOS PMOS

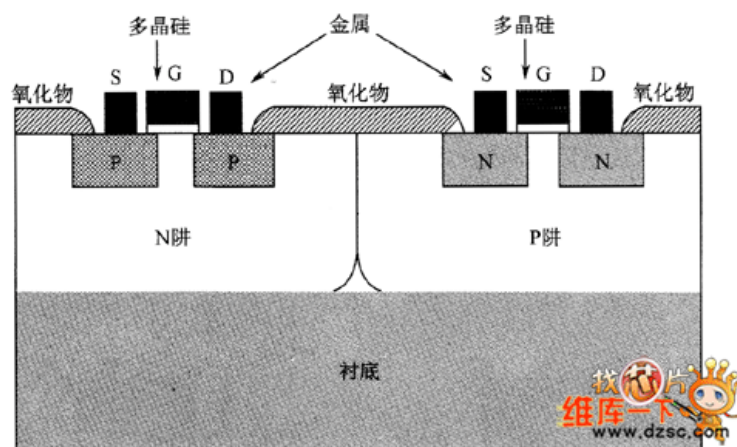


CMOS: Complementary Metal Oxide Semiconductor



CMOS:

Complementary Metal Oxide Semiconductor



CMOS集成电路用P沟道MOS管作为负载器件，N沟道MOS管作为驱动器件，因此在同个衬底上同时制作P沟道MOS晶体管和N沟道MOS晶体管。在制作中，必须将一种MOS晶体管制作在衬底上，而将另一种MOS晶体管制作在比衬底浓度高的阱中。CMOS集成电路工艺根据阱的导电类型可以分为P阱工艺、N阱工艺和双阱工艺。

第五部分：固体的电特性

- 自由电子的输运问题——金属的导电性

- 非(热)平衡状态下的分布函数

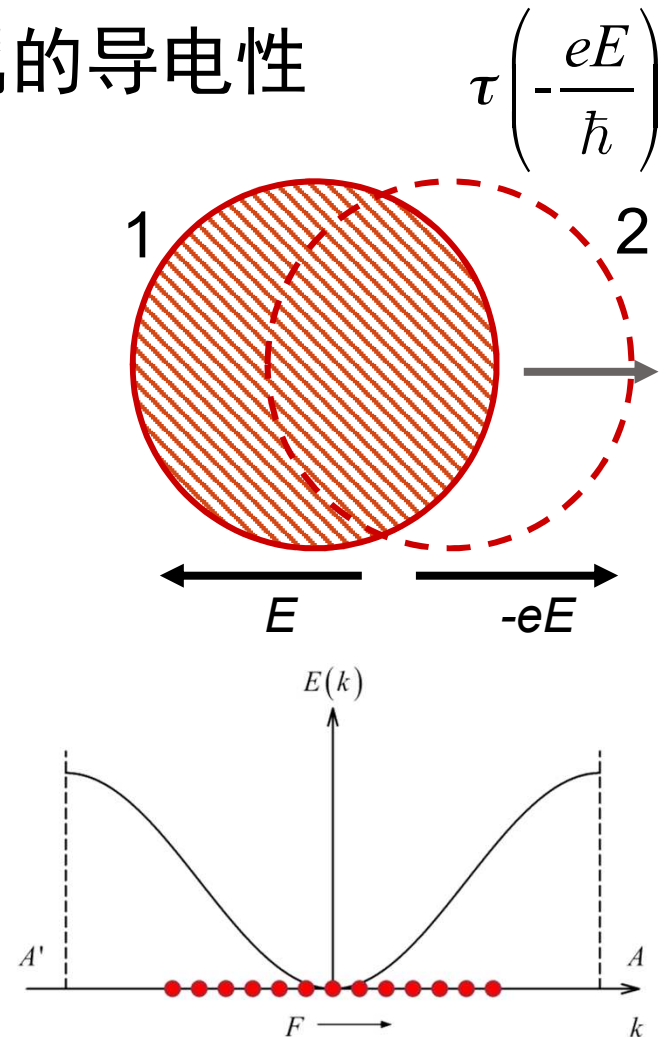
- 半满带中的准经典运动

- 波尔兹曼方程——漂移和碰撞

$$\frac{df}{dt} = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{漂移}} + \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{碰撞}} = 0$$

- 考虑能带以后金属的导电率

$$\sigma_0 = \frac{ne^2 \tau(E_F)}{m^*}$$



第五部分：固体的电特性

● 半导体中输运过程

1. 半导体中的载流子浓度和费米能级

- 能态密度抛物线近似

$$g(E) = \frac{V}{2\pi^2} \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{3/2} E^{1/2}$$

- 导带底和价带顶附近的能态密度

$$N_-(E) = \frac{4\pi(2m_-^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{(E - E_-)} \quad N_+(E) = \frac{4\pi(2m_+^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{(E_+ - E)}$$

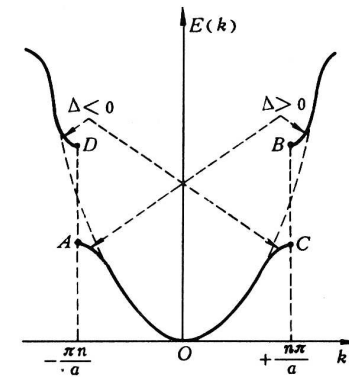
- 载流子浓度与有效能级密度——玻尔兹曼近似

$$p = N_+ e^{-(E_F - E_+)/k_B T}$$

$$n = N_- e^{-(E_- - E_F)/k_B T}$$

$$N_+ = \frac{2(2\pi m_+^* k_B T)^{3/2}}{h^3}$$

$$N_- = \frac{2(2\pi m_-^* k_B T)^{3/2}}{h^3}$$



$$E_{\pm} = \begin{cases} \bar{V} + T_n + |V_n| + \Delta^2 T_n \left(\frac{2T_n}{|V_n|} + 1 \right) \\ \bar{V} + T_n - |V_n| - \Delta^2 T_n \left(\frac{2T_n}{|V_n|} - 1 \right) \end{cases}$$

第五部分：固体的电特性

● 半导体中输运过程

2. 本征激发

- 本征载流子浓度
- 本征费米能级

$$n_i = n = p = (N_- N_+)^{1/2} e^{-E_g/2k_B T}$$

$$E_{Fi} = \frac{1}{2}(E_- + E_+) + \frac{3}{4}k_B T \ln(m_+^* / m_-^*)$$

3. 杂质激发 费米能级

N型半导体:

载流子浓度:

$$n \approx \begin{cases} (N_- N_D)^{1/2} e^{-E_i/2k_B T}, & \text{low } T \\ N_D, & \text{high } T \end{cases}, \quad p = n_i^2 / n$$

费米能级

$$E_F = E_{Fi} - k_B T \ln(p / n_i)$$

P型半导体:

载流子浓度:

$$p \approx \begin{cases} (N_A N_+)^{1/2} e^{-E_i/2k_B T}, & \text{low } T \\ N_A, & \text{high } T \end{cases}, \quad n = n_i^2 / p$$

补偿半导体:

$$N\text{型: } n_0 = \frac{(N_d - N_a)}{2} + \sqrt{\left(\frac{(N_d - N_a)}{2}\right)^2 + n_i^2}$$

总的杂质浓度: $N_{doping} = N_A + N_D$

第五部分：固体的电特性

● 半导体中输运过程

4. 载流子的迁移

$$\sigma = \frac{nq^2\tau}{m^*} = nq \frac{q\tau}{m^*} = nq\mu \quad \sigma = nq\mu_- + pq\mu_+$$

- 载流子的迁移率
- 影响电导率和迁移率的因素，金属与半导体电导率的对比

5. 载流子的漂移和扩散

- 非平衡载流子（产生原因） $n = n_0 + \delta n$, $p = p_0 + \delta p$, $np > n_i^2$

- 准费米能级 $n_0 + \Delta n = n_i \exp(\frac{E_{Fn} - E_{Fi}}{kT})$, $p_0 + \Delta p = n_i \exp(\frac{E_{Fi} - E_{Fp}}{kT})$

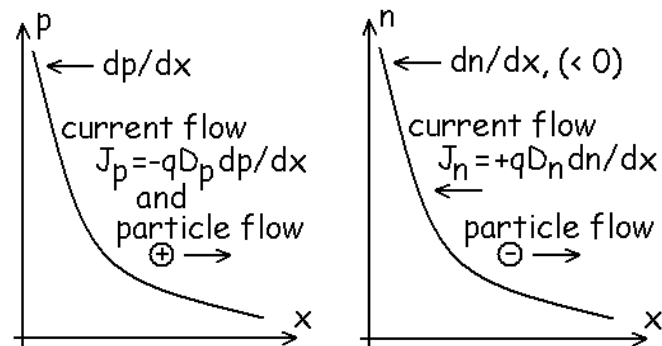
- 复合过程 $\Delta n = (\Delta n)_0 \exp(-t/\tau)$

- 载流子的扩散运动

- 载流子扩散和复合

$$\frac{d}{dx} \left(D \frac{dN}{dx} \right) - \frac{N}{\tau} = 0$$

$$\text{扩散流密度} = -D \frac{dN}{dx} = N_0 \frac{D}{L} e^{-x/L}$$



第五部分：固体的电特性

● 固体接触的输运过程

1. 功函数与接触电势

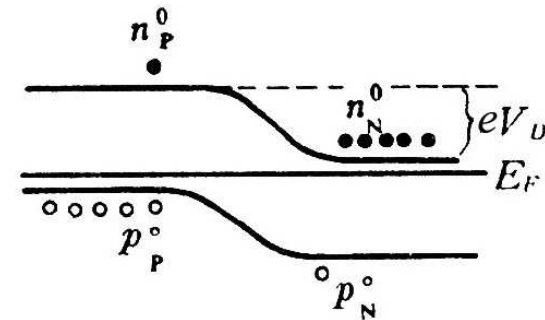
- 经典理论和量子理论对功函数的解释
- 接触电势： $V_A - V_B = (W_B - W_A)/q$

$$W = \chi \quad W = \chi - E_F$$

2. PN结

- PN结形成的物理过程和能带图

$$\frac{n_P^0}{n_N^0} = e^{-qV_D/k_B T}$$

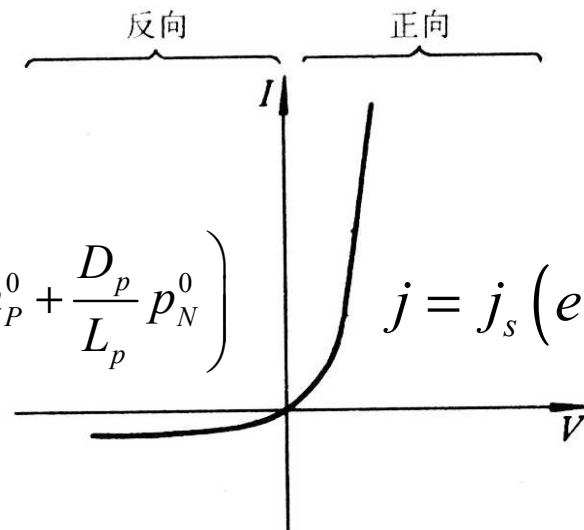


- 画能带图的三个要点
(1) 接触电势差确定
(2) 空间电荷区比例确定;
(3) 分别用抛物线型画出电位变化线

- 外场作用下PN的导电特性

$$j \approx -q \left(\frac{D_n}{L_n} n_P^0 + \frac{D_p}{L_p} p_N^0 \right)$$

$$j = j_s (e^{qV/K_B T} - 1)$$



第五部分：固体的电特性

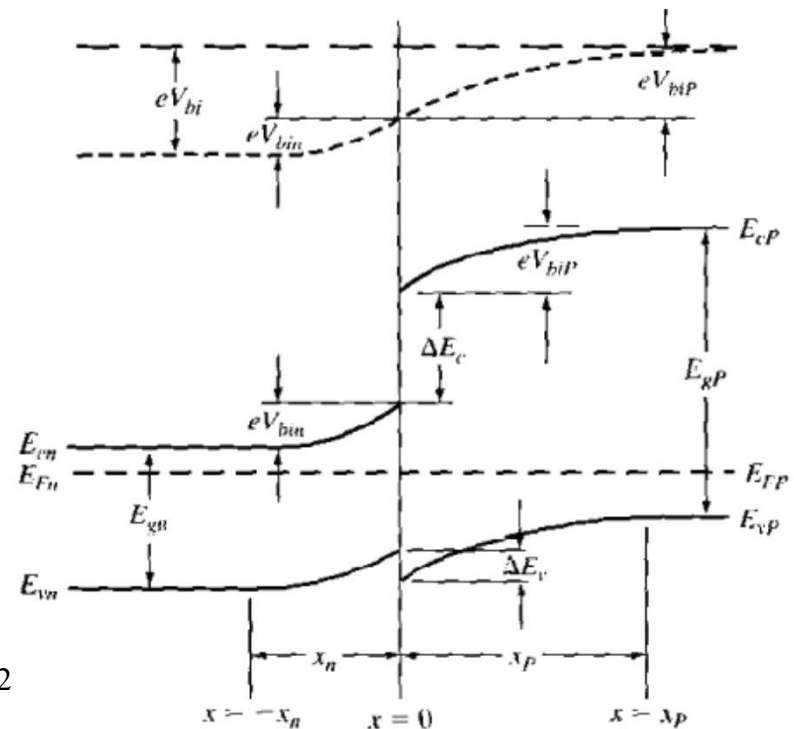
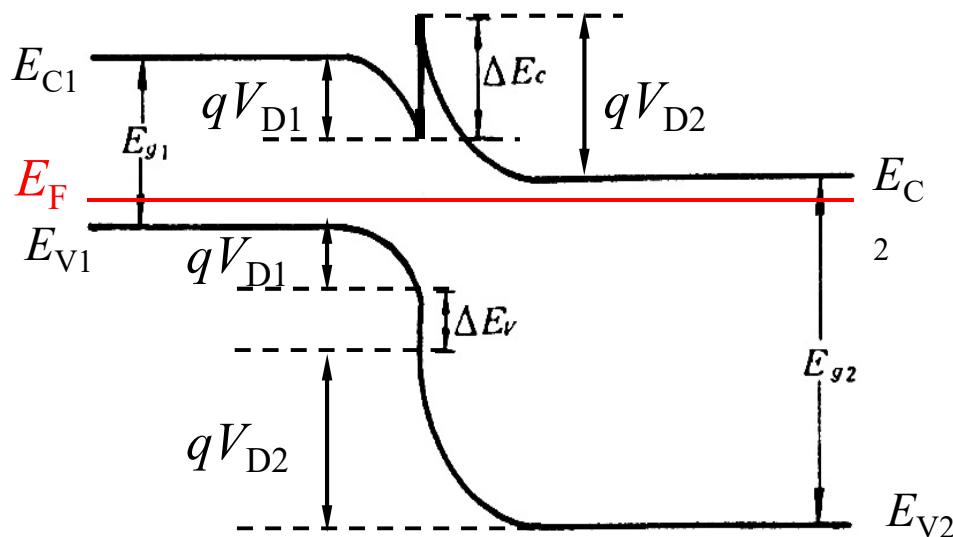
• 固体接触的输运过程

3. 异质结

- 能带图
- 注入比

- 导带能级差: $\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2$
- 价带能级差: $\Delta E_V = E_{g2} - E_{g1} - \Delta E_C$
- 导带能级差+价带能级差=带隙宽度差

$$\frac{J_n}{J_p} = \frac{D_n n_p^0}{L_n} \bigg/ \frac{D_p p_n^0}{L_p} = \frac{D_n L_p N_D}{D_p L_n N_A} e^{\frac{E_{gN} - E_{gP}}{k_B T}}$$



第五部分：固体的电特性

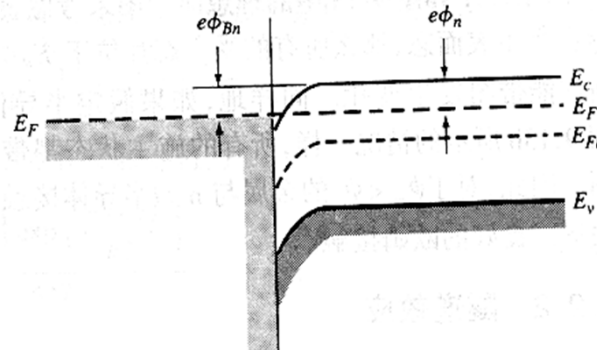
● 固体接触的输运过程

4. 肖特基结和欧姆接触

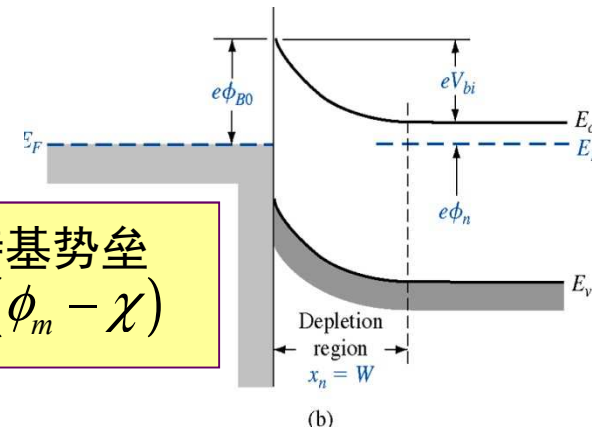
- 肖特基结：金属-(p)-n型半导体 $\phi_m > \phi_s$

- 欧姆接触：

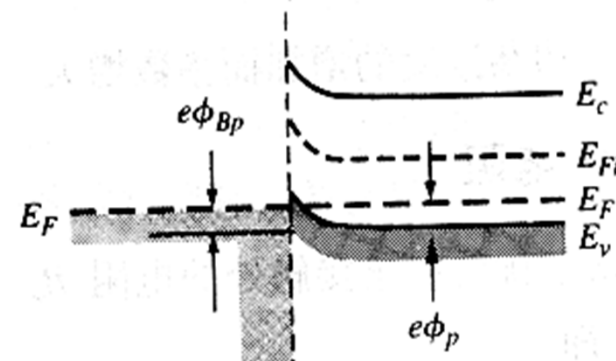
金属-n型半导体 $\phi_m < \phi_s$



肖特基势垒
 $\phi_{B0} = (\phi_m - \chi)$

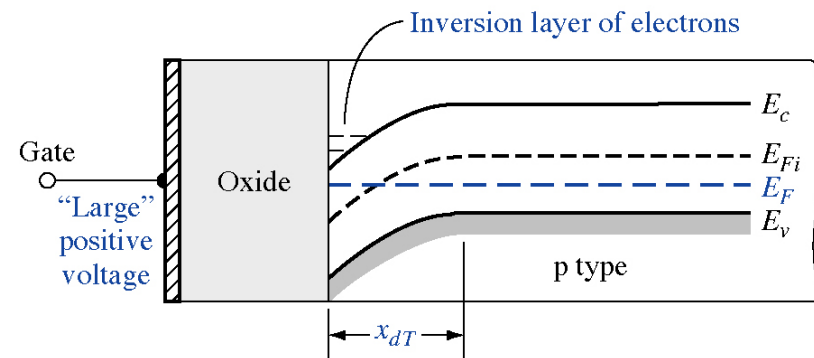


金属-p型半导体 $\phi_m > \phi_s$



5. MIS和MOS——不要求

- 反型层的形成——沟道
- 二维电子气
- 对比调制掺杂形成量子阱
- 场效应管和CMOS

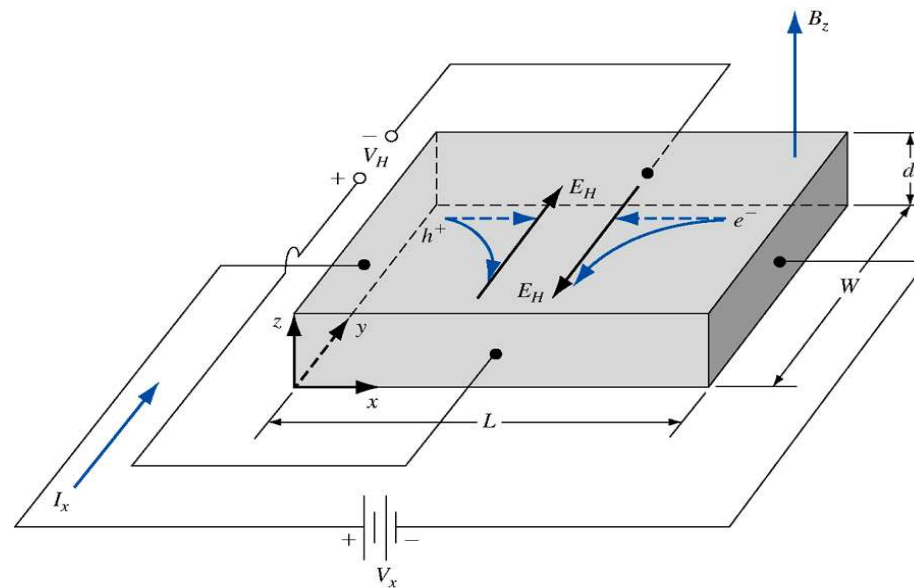


第五部分：固体的电特性

- 霍尔效应

霍尔系数：

$$R = \frac{1}{pq} = -\frac{1}{nq}$$



霍尔电压 $V_H = E_H * W$ ， W ：样品宽度