

第二章 PN结

§ 2.1 PN结的基本介绍

§ 2.2 PN结的耗尽近似理论

§ 2.3 PN结的直流IV特性

§ 2.4 PN结的CV特性

§ 2.5 PN结的瞬态特性

§ 2.6 PN结的击穿特性

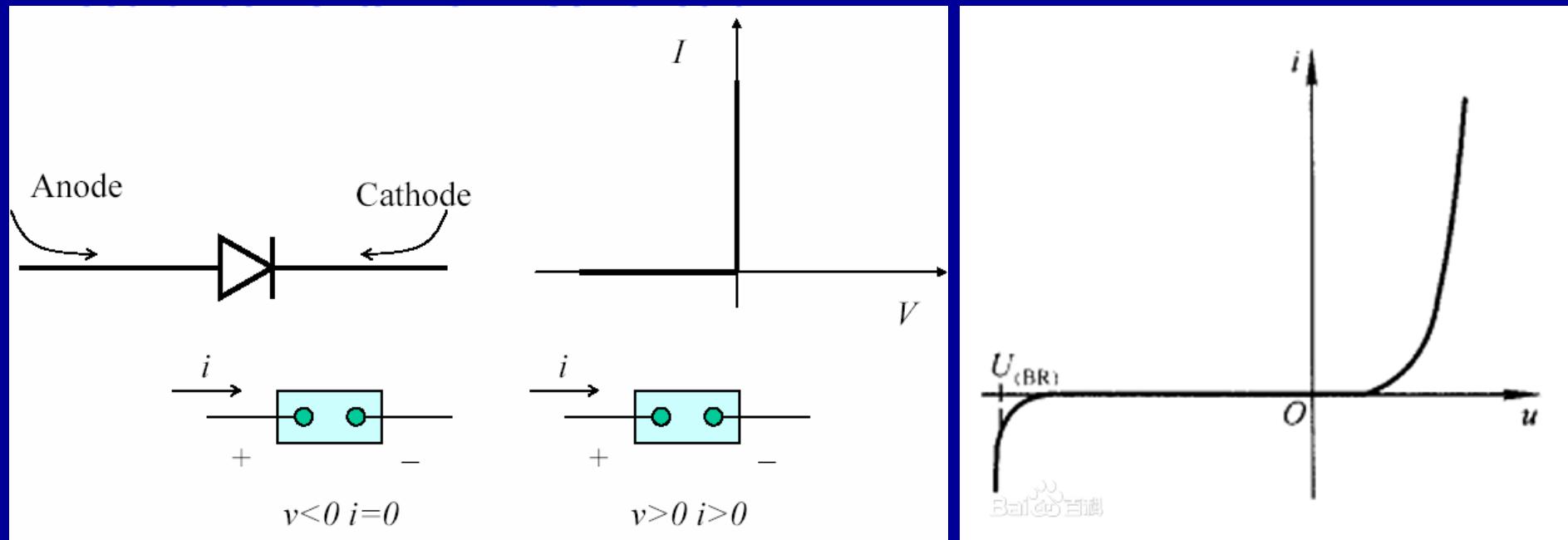
§ 2.7 异质结与高低结

§ 2.8 几种典型二极管的应用

§ 2. 1 PN结的基本介绍

- PN结作为整流、开关及其他用途的器件，同时也是半导体微波器件及光电器件的基本结构，也是双极型晶体管、可控硅整流器和场效应晶体管的基本组成部分。
- PN结最重要的性质是整流效应，即只允许电流一个方向通过。
- 典型的伏安特性：加正向偏置电压时，电流随偏压的增加而迅速增大，通常正向偏压 $< 1V$ 。加反向偏压时，开始时几乎没有电流，反向电压增加时，电流一直很小。当电压加到一个极限值时，电流突然增加，这种现象称为结击穿，反向击穿电压大约 $10V \sim 10KV$ ，与掺杂及器件其他参数有关。

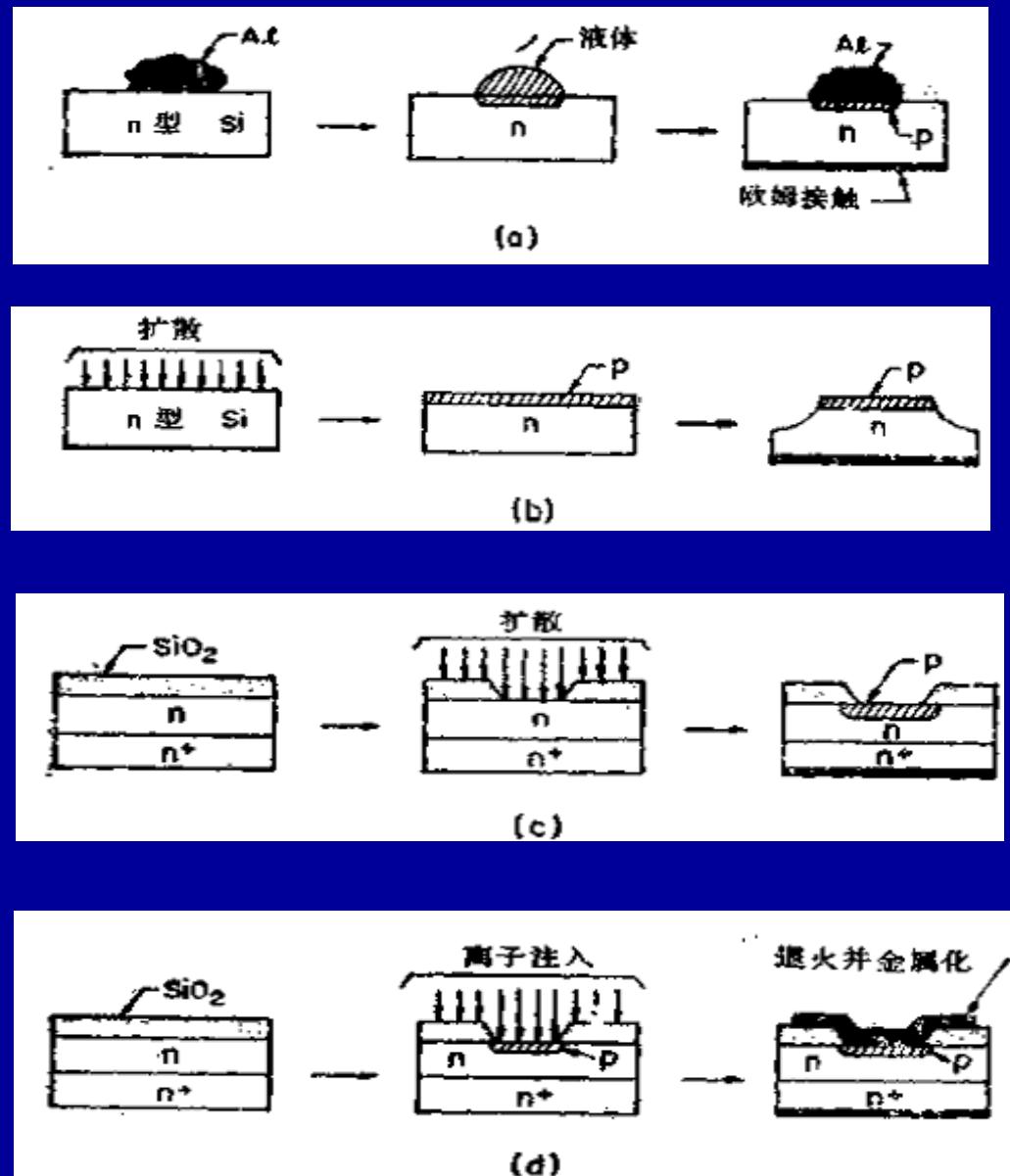
PN结二极管的单向导电特性



理想二极管

实际二极管

PN结基本工艺制造方法



Principle of Semiconductor Devices

平面工艺中主要工序

- (1) 晶体生长、外延
- (2) 氧化、薄膜淀积
- (3) 扩散
- (4) 离子注入
- (5) 光刻、刻蚀

● 晶体生长与外延

—从熔体中生长单晶：直拉法(Si)和布里奇曼法(GaAs)

原材料：石英砂



↓
冶金级硅

↓
电子级硅 (ppb量级)

硅片成形:前处理→切片→双面研磨→抛光

—外延：除常规外延工艺(如气相外延VPE)外，还有液相生长法（广泛应用于化合物半导体）及绝缘体上硅分子束外延等。

● 氧化与薄膜淀积

—四大类薄膜：

热氧化膜、电介质膜、多晶硅膜和金属膜

—热氧化膜：如栅氧化层、场氧化层

—介质膜：如淀积的 SiO_2 、 Si_3N_4 膜（绝缘层、掩蔽膜、覆盖在掺杂的薄膜上、钝化）

—多晶硅膜：MOS栅、多层金属化的导电材料、浅结器件的接触材料

—金属膜：如铝和硅化物（欧姆接触、整流、互连线）

● 扩散与离子注入

用可控制数量的杂质掺入半导体

—扩散：掺杂分布主要由扩散温度及扩散时间决定，用于形成深结：

扩散流密度F(单位时间通过单位面积的杂质原子数)：

$$F = -D \frac{\partial C}{\partial x}$$

C为杂质浓度，D是扩散系数

- 扩散过程的基本起因是浓度梯度
- 扩散结果评价：结深（染色法）、薄层电阻（四探针法）、扩散层杂质分布（SIMS）
- 杂质再分布

—离子注入：掺杂分布主要由离子质量和注入离子的能量决定（典型的离子能量是30-300keV,注入剂量是在 10^{11} - 10^{16} 离子数/cm²范围），用于形成浅结

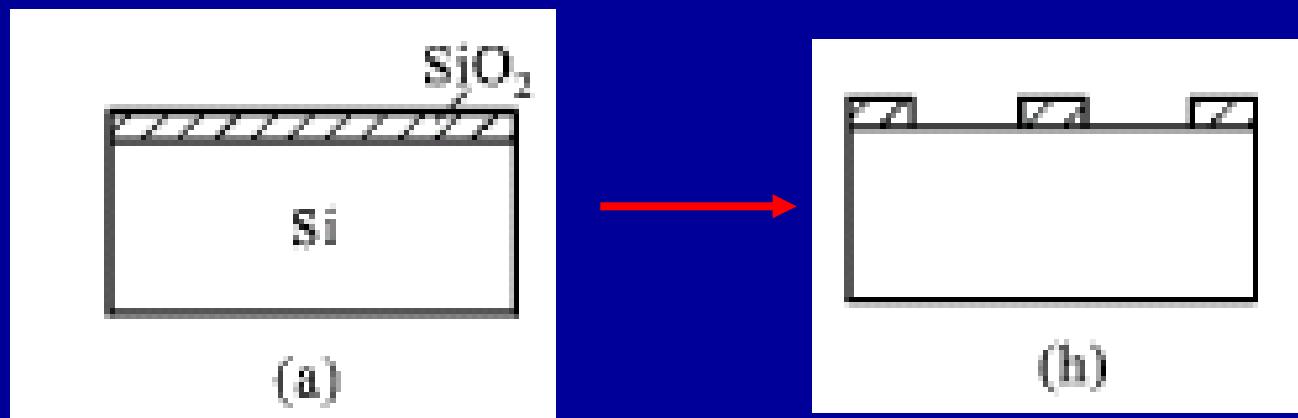
- 由于离子注入形成损伤区和畸变团，为了激活注入的离子：退火

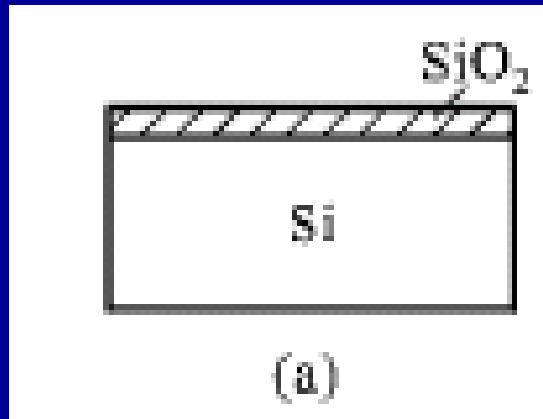
- 光刻—图形曝光与刻蚀

- 0.1μm以内仍采用光学光刻技术

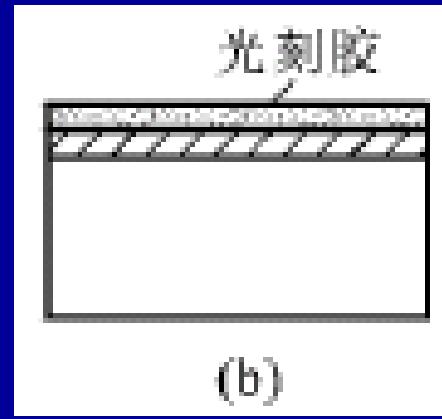
- 短波长的射线：1nm波长软X射线、
13nm波长极紫外线、电子束曝光

光刻工艺

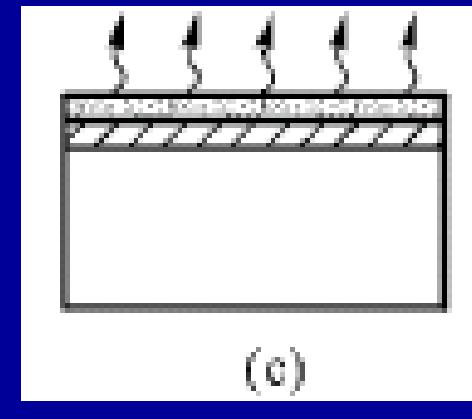




(a)



(b)



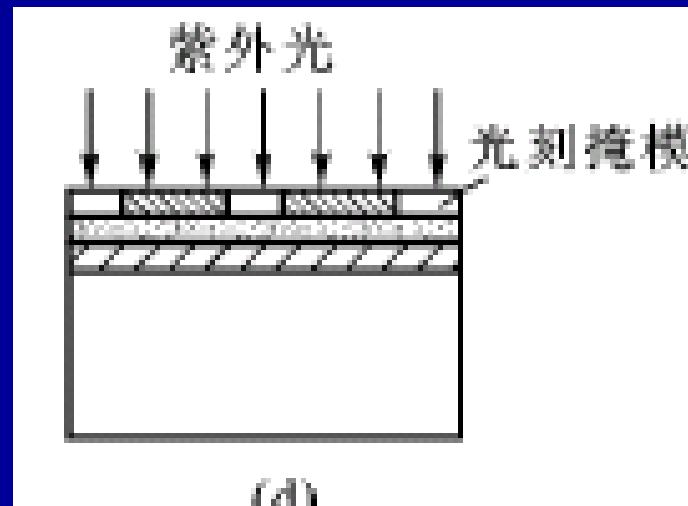
(c)

(a) 经清洗的晶片

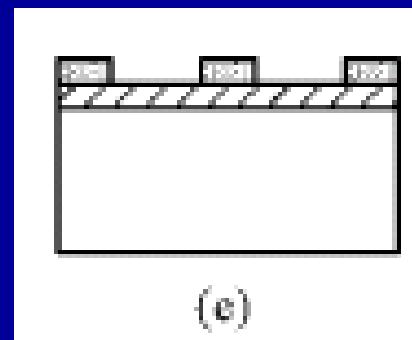
(b) 涂光刻胶

(c) 前烘

将光刻版（又称为掩膜）放在光刻胶层上，然后用一定波长的紫外光照射，使光刻胶发生化学反应。

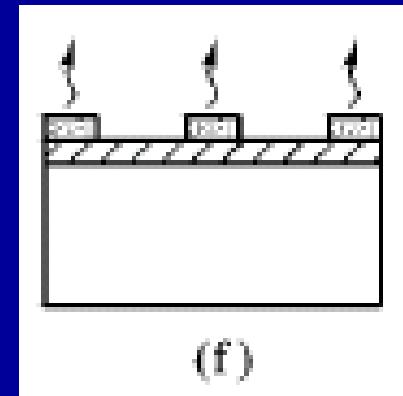


④ 曝光



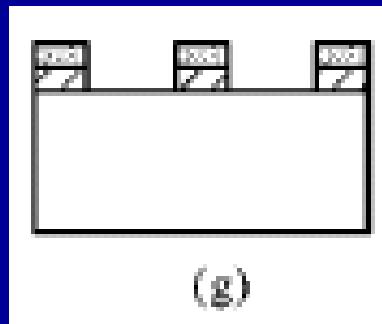
(e)

⑤ 显影



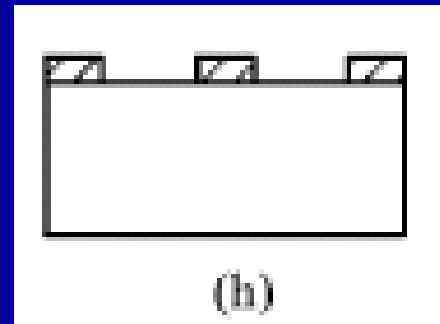
(f)

⑥ 坚膜



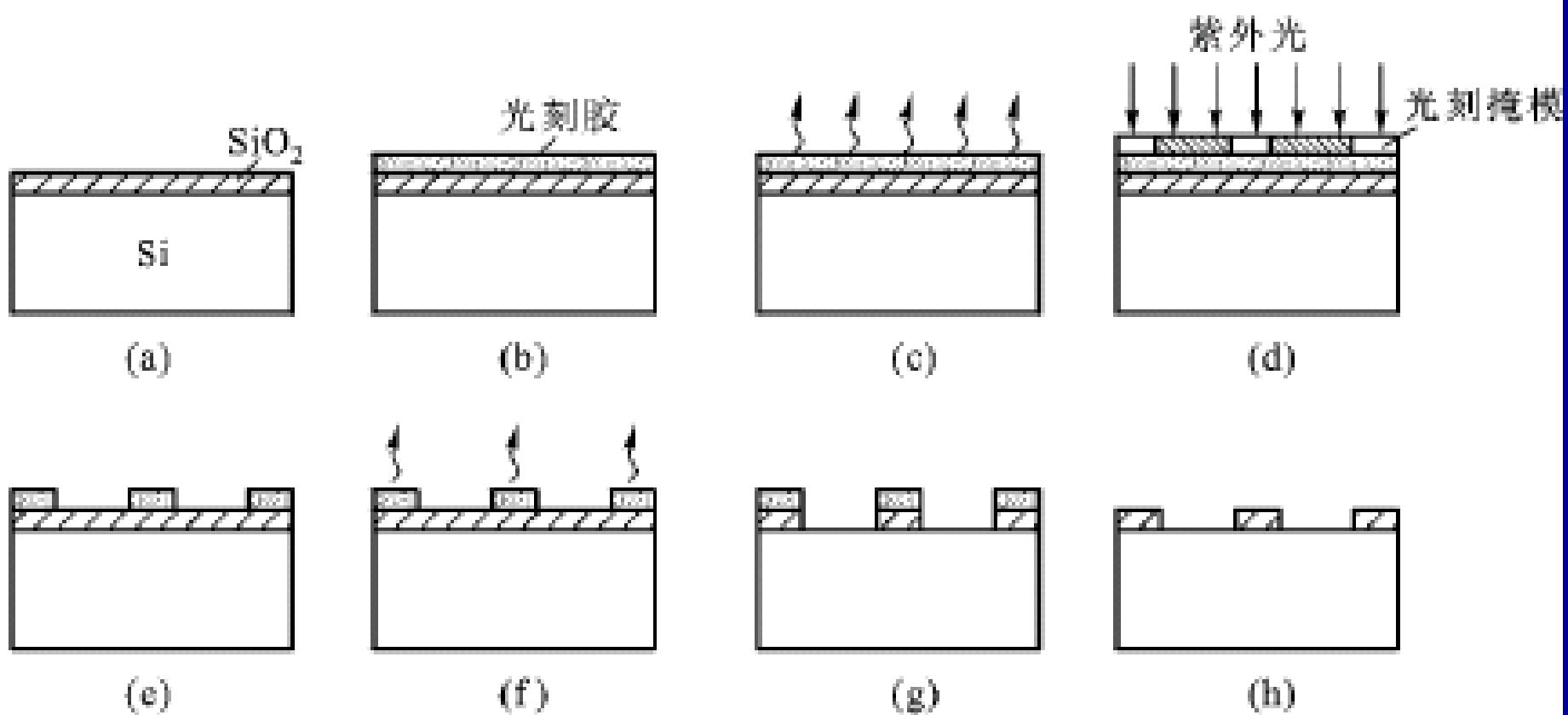
(g)

(g) 腐蚀

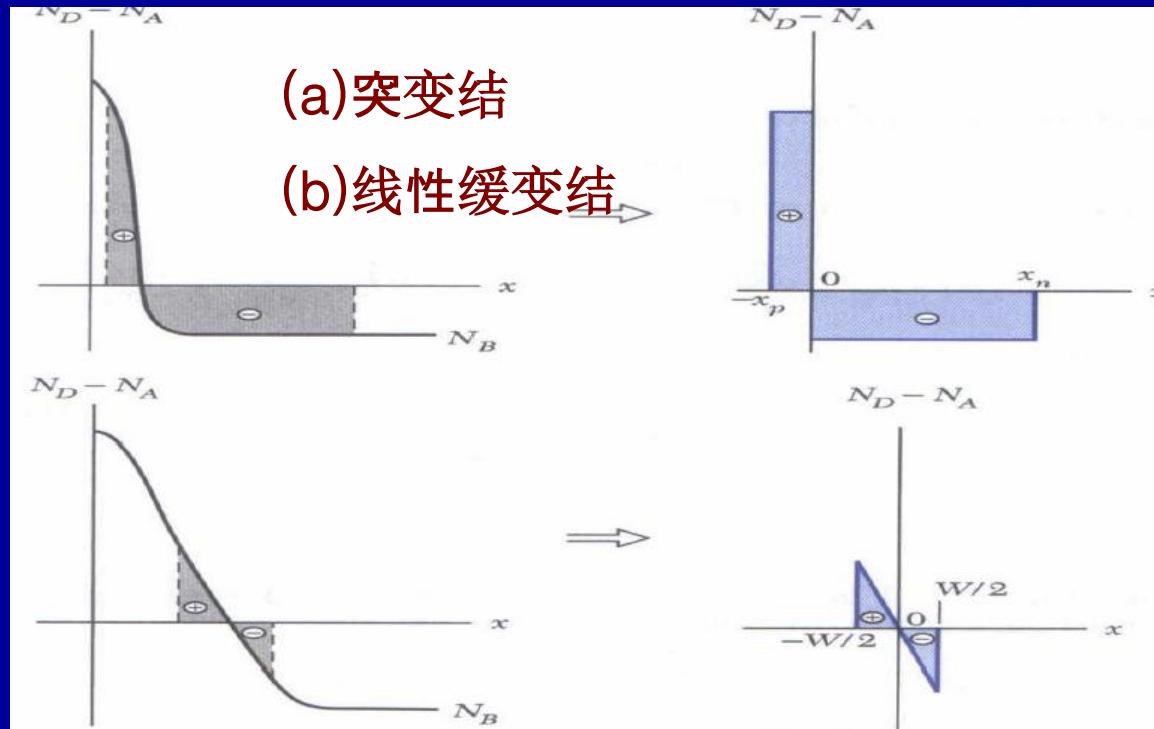


(h)

(h) 去胶



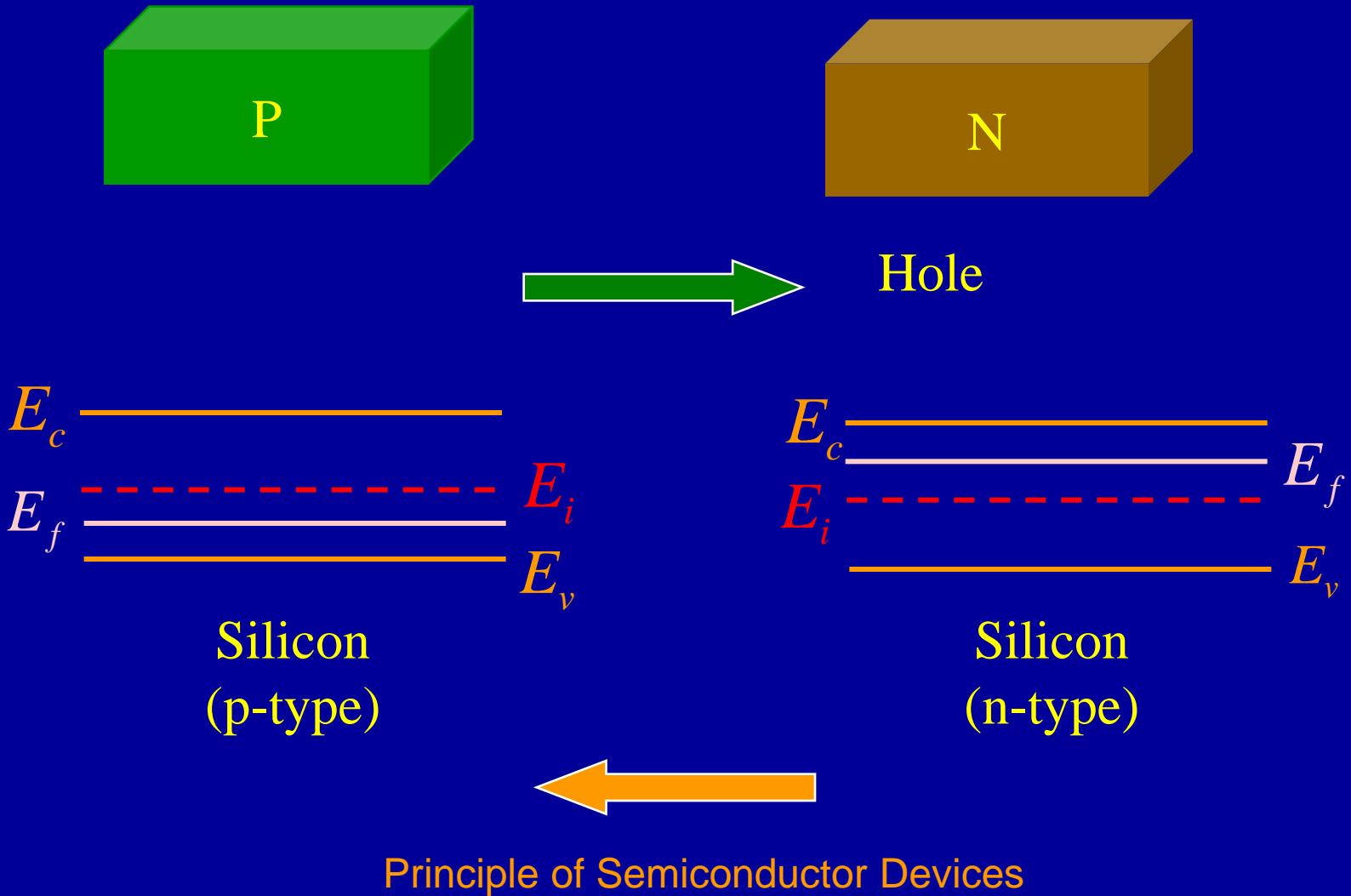
杂质分布近似

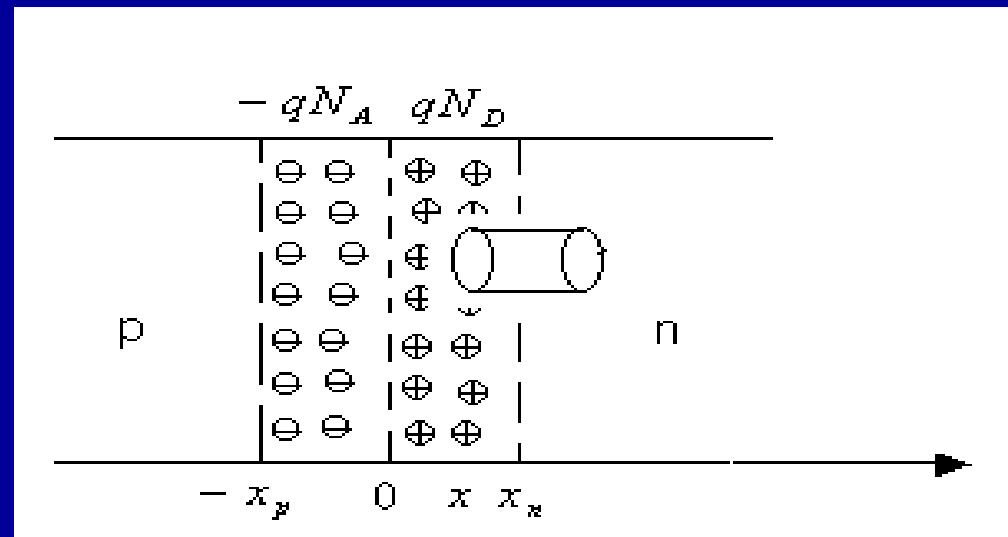


PN结大致可以分为两种：

- (1) 突变结：PN结两区中的杂质浓度为均匀分布，且在交界面处发生杂质突变。如果一区的杂质浓度远高于另一区，称为单边突变结 P^+N 或 N^+P 结。由合金、浅扩散或低能离子注入形成。
- (2) 线性缓变结：结附近，其杂质分布是缓变分布的，可以用直线近似，其斜率称为杂质浓度梯度。由深扩散或高能离子注入制得的结。

热平衡条件

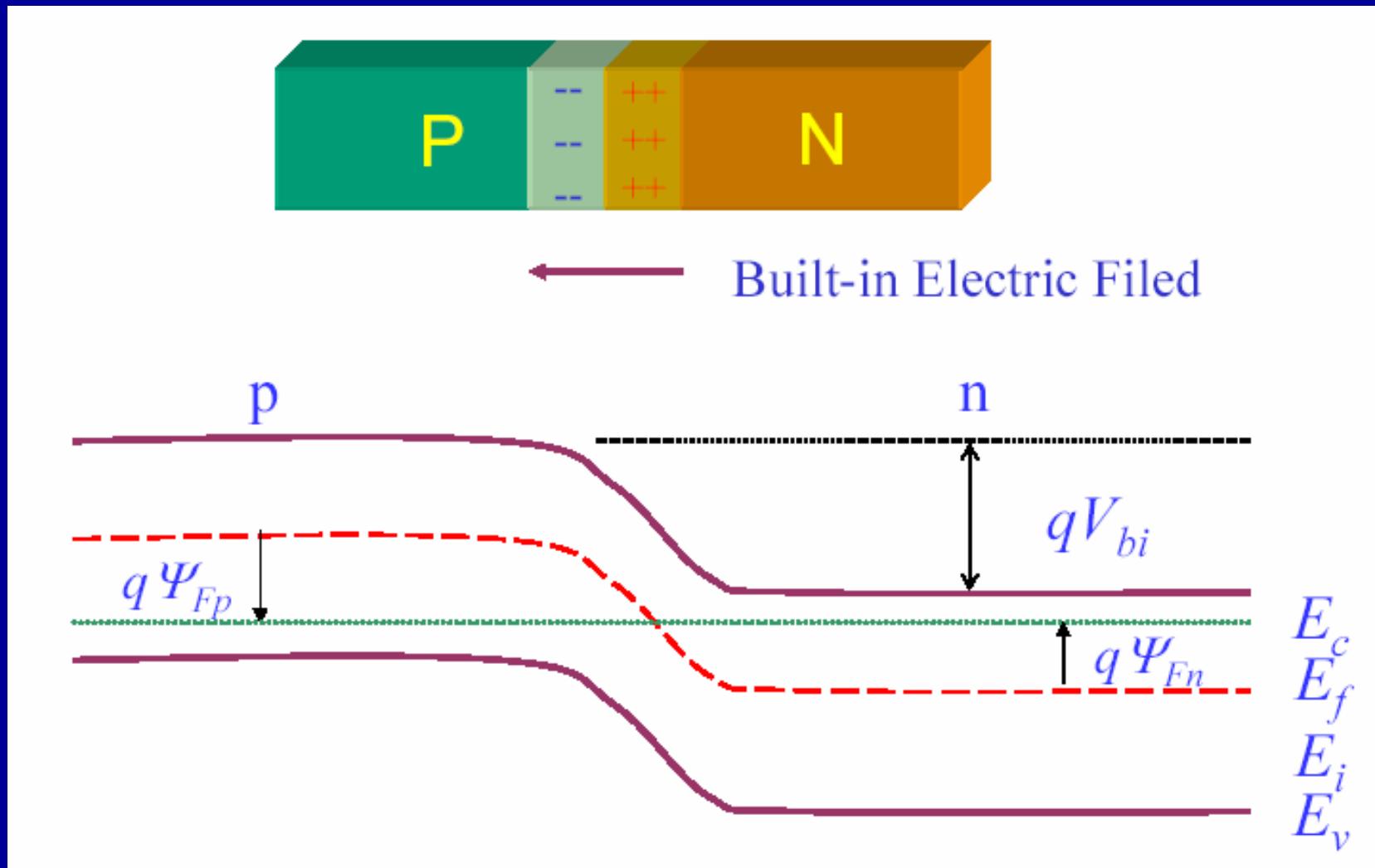




- 在界面处存在空穴和电子的浓度梯度，使得空穴由P区向N区扩散，电子由N区向P区扩散，两者都在扩散过程中通过复合而逐渐消失。这样，在结两侧附近电中性被破坏，杂质离子显露出电性，称为空间电荷。
- 空间电荷区：存在空间电荷的区域
- 自建电场（或内建电场）

这种平衡是一种动态平衡。

热平衡条件



Principle of Semiconductor Devices

1. 热平衡下P区与N区的费米能级相等

- 所谓平衡P-N结，即指无外界作用且温度恒定的P-N结。
- 费米能级在整个样品内必须为常数。

$$J_p = J_{p(\text{漂移})} + J_{p(\text{扩散})} = q\mu_p p \varepsilon - qD_p \frac{dp}{dx}$$

2. 内建电势（接触电势差）

N型中性区

$$n_0 = N_c \exp\left[\frac{-(E_c - E_{Fn})}{kT}\right] = n_i \exp\left[\frac{-(E_{Fn} - E_{Fi})}{kT}\right]$$

$$n_0 = n_i \exp\left[\frac{-q\phi_{Fn}}{kT}\right] \Rightarrow V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}|$$

$$\phi_{Fn} = \frac{-kT}{q} \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right) \quad V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{\frac{N_A N_D}{2}}{n_i}\right)$$

P型中性区

$$p_0 = N_v \exp\left[\frac{-(E_{Fp} - E_v)}{kT}\right] = n_i \exp\left[\frac{-(E_{Fi} - E_{Fp})}{kT}\right]$$

$$\phi_{Fp} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$

内建电势的另一种求法：

$$J_n = qD_n \frac{dn}{dx} + qn\mu_n E = 0$$

$$E = \frac{D_n}{\mu_n} \frac{1}{n} \frac{dn}{dx} = \frac{kT}{q} \frac{d \ln n}{dx}$$

$$V_{bi} = \int_N^P Edx = \frac{kT}{q} \ln n \Big| \frac{P}{N}$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2}$$

§ 2. 2 PN结的耗尽近似理论

- 耗尽近似理论，又称耗尽近似条件

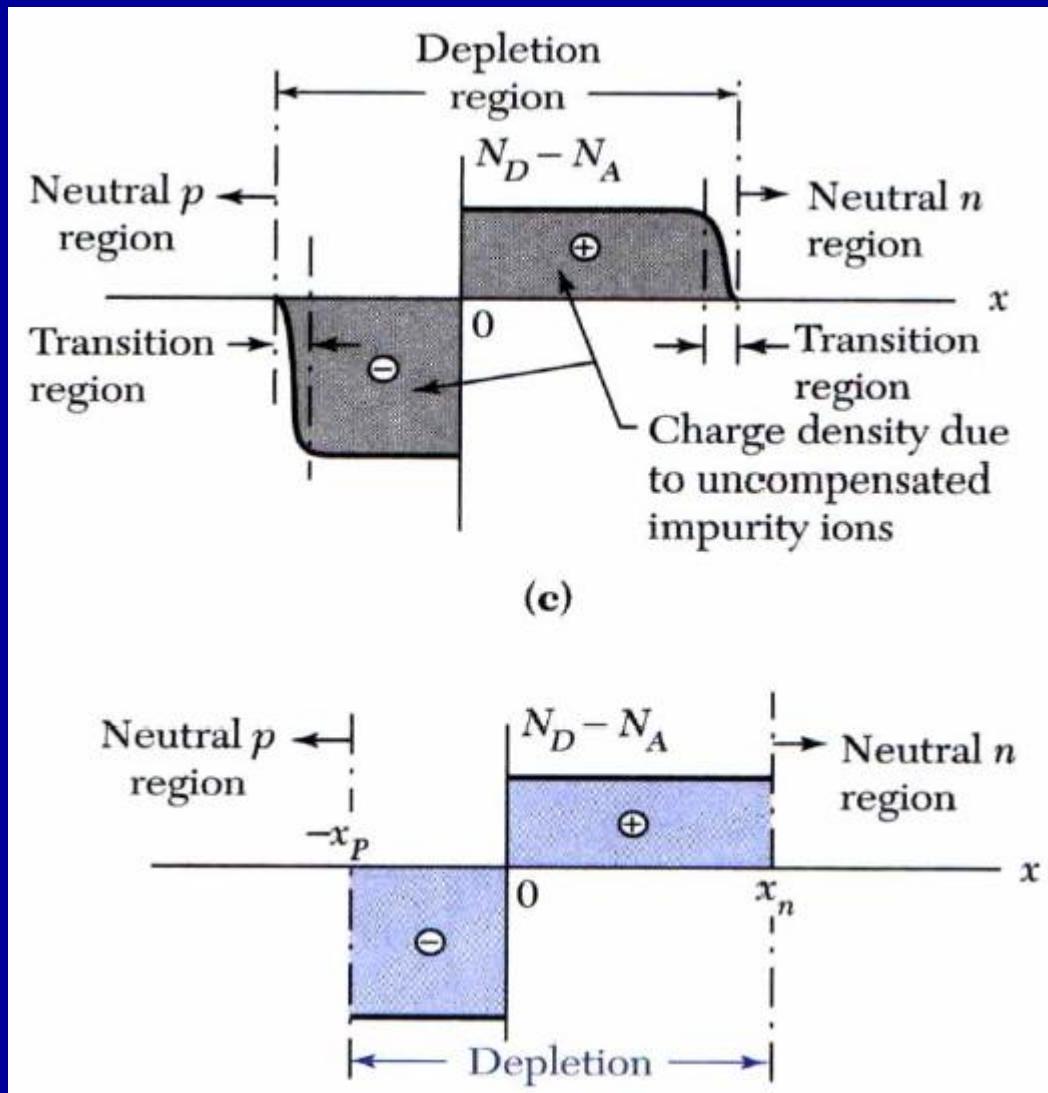
在P-N结的理论分析中，为简化问题的处理，常常假设空间电荷区中正负电荷密度完全由电离杂质浓度决定，从而忽略自由载流子的影响。

- 耗尽区

从中性区向结移动时，将遇到一个狭窄的过渡区，此处的杂质离子部分地被可动载流子补偿，经过过渡区就是完全耗尽区，其中可动的载流子浓度为零，这个区称为耗尽区，也叫空间电荷区。

- 一般地，对Si, GaAs的p-n结，过渡区的宽度远小于耗尽区，可以忽略过渡区。

耗尽区（空间电荷区）、过渡区



Principle of Semiconductor Devices

1、热平衡时的耗尽区（耗尽层）特性

- 求解泊松方程，必须知道杂质分布。
- PN结大致可以分为两种：
 - (1) 突变结：PN结两区中的杂质浓度为均匀分布，且在交界面处发生杂质突变。如果一区的杂质浓度远高于另一区，称为单边突变结 P^+N 或 N^+P 结。由合金、浅扩散或低能离子注入形成。
 - (2) 线性缓变结：结附近，其杂质分布是缓变分布的，可以用直线近似，其斜率称为杂质浓度梯度。由深扩散或高能离子注入制得的结。

(1) 突变结

- 空间电荷区宽度向低掺杂浓度一侧展宽

$$N_D \cdot x_n = N_A \cdot x_p$$

- 泊松方程

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s}$$

电场分布

利用耗尽近似条件，得：

$$-\frac{d^2\Psi}{dx^2} = \frac{qN_D}{\varepsilon_{si}} \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$-\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{qN_A}{\varepsilon_{si}} \quad -x_p \leq x \leq 0$$

由边界条件 $\varepsilon(-xp) = \varepsilon(xn) = 0$ ，得：

$$\boxed{\varepsilon(x) = \frac{qN_D}{\varepsilon_s}(x - x_n)} \quad 0 \leq x \leq x_n$$

$$\boxed{\varepsilon(x) = -\frac{qN_A}{\varepsilon_s}(x + x_p)} \quad -x_p \leq x \leq 0$$

电势分布

- $X=0$ 处，电场有最大值。

$$|\epsilon_m| = \frac{qN_A}{\epsilon_s} x_p = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x_n$$

- 若取 $x=0$ 处的电势为零，

$$\psi(x) = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \left(\frac{1}{2} x^2 + x_p \cdot x \right) \quad -x_p \leq x \leq 0$$

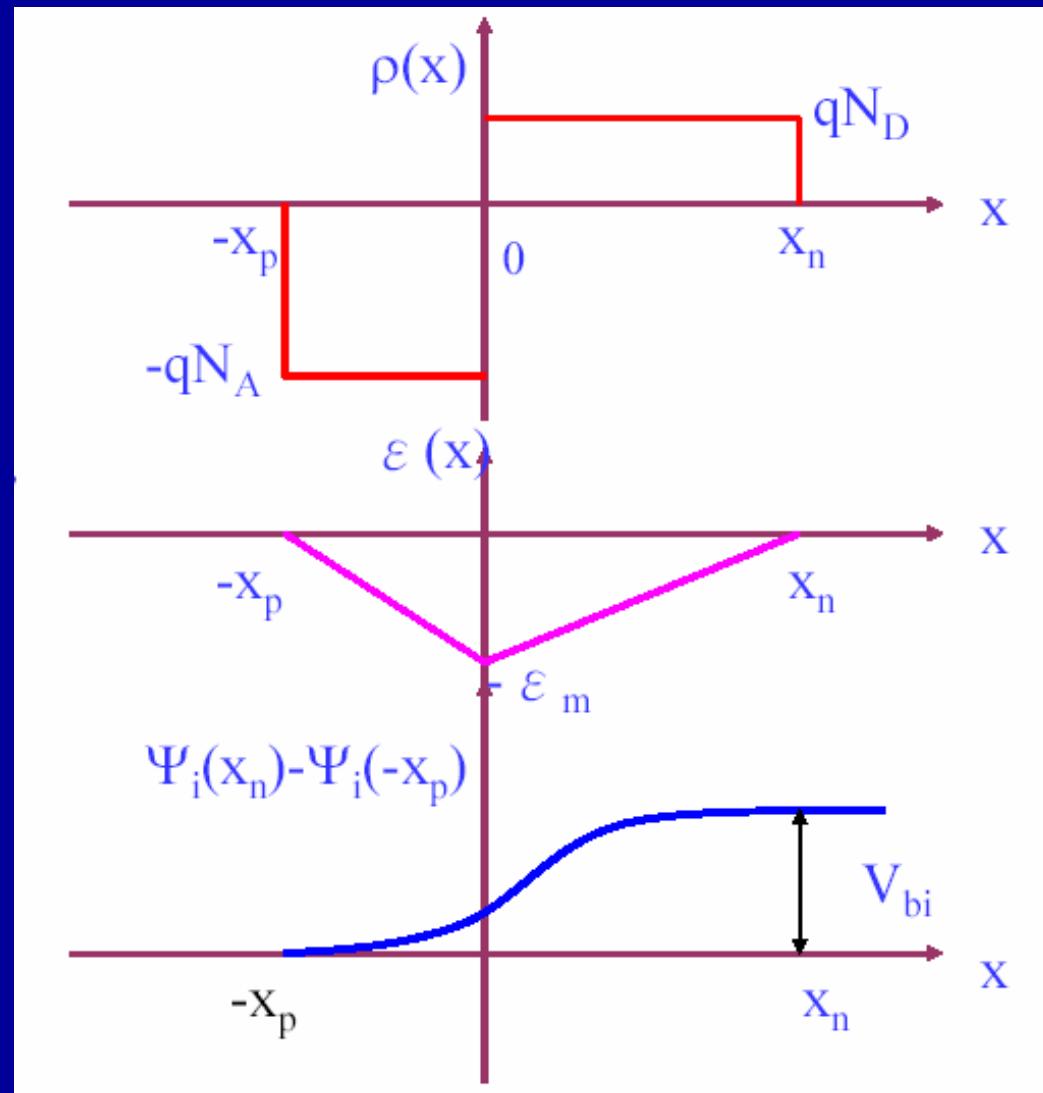
$$\psi(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left(\frac{1}{2} x^2 - x_n \cdot x \right) \quad 0 \leq x \leq x_n$$

耗尽区

电荷分布

电场分布

电势分布



内建电势

- 由 $N_A \cdot x_p = N_D \cdot x_n$ 以及 $x_p + x_n = W$ 。 可以求得：

$$x_n = \frac{N_A \cdot W}{N_D + N_A}$$

$$x_p = \frac{N_D \cdot W}{N_D + N_A}$$

$$V_{bi} = \psi(x_n) - \psi(-x_p) = \frac{q}{2\epsilon_s} (N_D \cdot x_n^2 + N_A \cdot x_p^2)$$

$$V_{bi} = \frac{q}{2\epsilon_s} \cdot \frac{N_A \cdot N_D}{N_A + N_D} \cdot W^2 = \frac{1}{2} \epsilon_m W$$

耗尽区宽度

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \cdot \frac{N_A + N_D}{N_A \cdot N_D} \cdot V_{bi}}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \cdot \frac{N_A}{(N_A + N_D) \cdot N_D} \cdot V_{bi}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \cdot \frac{N_D}{(N_A + N_D) N_A} \cdot V_{bi}}$$

单边突变结

实际问题中经常遇到p区和n区掺杂浓度相差悬殊的情况,当突变结一边杂质浓度远大于另一边时,称为单边突变结。

对于单边突变结,空间电荷区宽度简化为

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_B}}$$

式中 N_B 为PN结轻掺杂区的浓度。

对p⁺n结：

$$\xi(x) = \xi_m + \frac{qN_D}{\epsilon_{si}} x \quad 0 \leq x \leq x_n$$

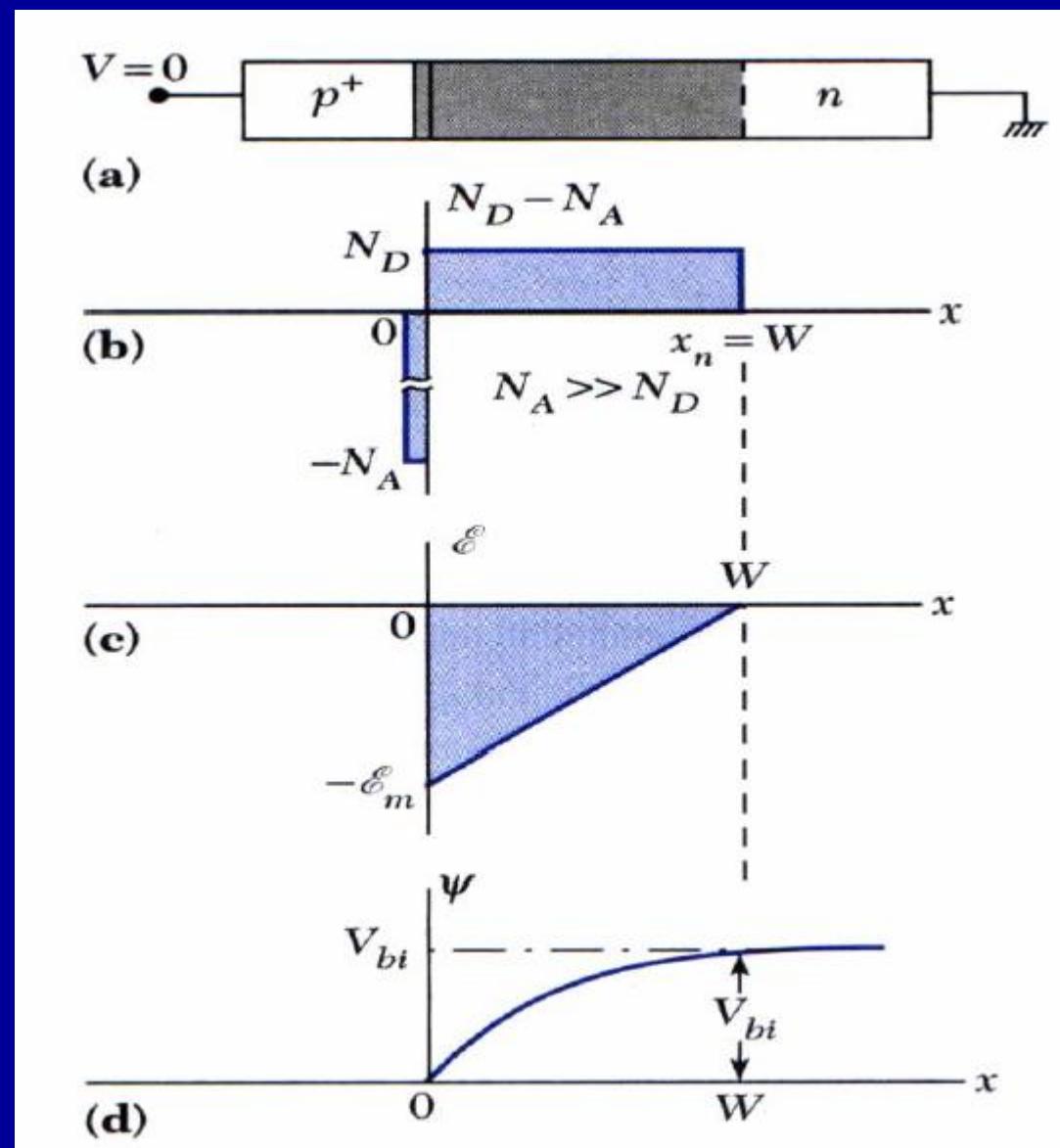
$$\xi_m = \frac{qN_D W}{\epsilon_{si}}$$

$$\xi(x) = \xi_m \left(1 - \frac{x}{W} \right)$$

$$\psi(x) = \xi_m \left(x - \frac{x^2}{2W} \right) + \text{constant}$$

设p型中性区为电势零点，则Constant = 0

单边突变结



Principle of Semiconductor Devices

例：硅的单边突变结， $N_A = 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, $N_D = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, 求零偏压下300K时耗尽层宽度和最大电场强度。

- 除了考虑杂质浓度外，还考虑到自由载流子的影响时，则在P型侧有 $\rho(x) = -q[N_A - p(x)]$ ，在N型侧有 $\rho(x) = q[N_D - n(x)]$ 的关系，由此进行简单修正后可以得到更精确的耗尽层宽度，这种简单模型对大多数突变结作出了相当好的预言。
- 对极不对称的结，或超浅结，为了得到精确结果，需进行数值分析。

(2) 线性缓变结

- 对于线性缓变结，其杂质分布可表示为

$$N = a_j x$$

- 由结对称，两边耗尽区宽度为W/2，利用耗尽近似条件，空间电荷分布为

$$\rho(x) = q \cdot a_j \cdot x \quad -W/2 \leq x \leq W/2$$

电场分布

- 沂松方程

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s} = -\frac{qa_jx}{\epsilon_s}$$

$$-W/2 \leq x \leq W/2$$

由电场边界条件: $\left. \epsilon \right|_{x=\pm\frac{W}{2}} = 0$

可得电场分布:

$$\epsilon(x) = -\frac{q \cdot a_j}{2\epsilon_s} \left[\left(\frac{W}{2} \right)^2 - x^2 \right]$$

$$-W/2 \leq x \leq W/2$$

电势分布

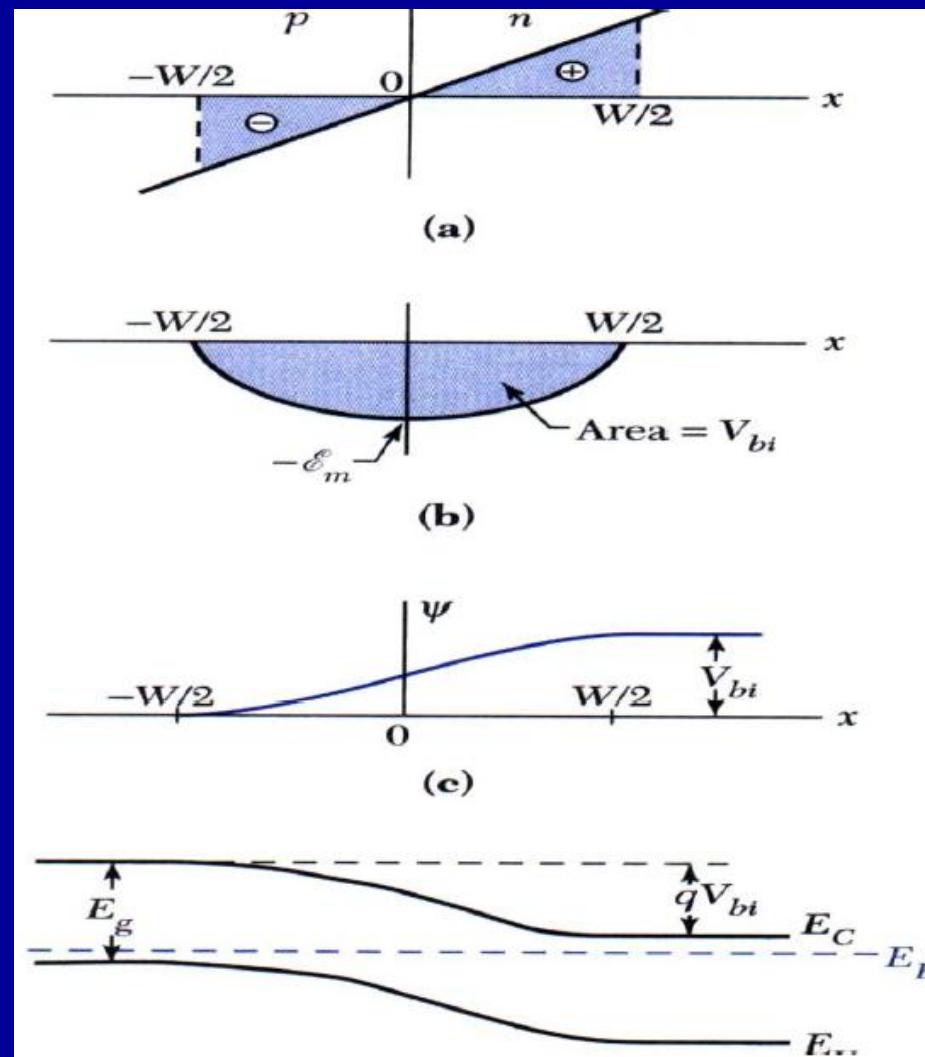
- X=0处，电场有最大值。

$$|\mathcal{E}_m| = \frac{q \cdot a_j}{2\epsilon_s} \cdot \left(\frac{W}{2}\right)^2 = \frac{qa}{8\epsilon_s} W^2$$

- 若取x=0处的电势为零，

$$V(x) = -\frac{q \cdot a_j}{2\epsilon_s} \left[\frac{x^3}{3} - \frac{W^2}{4} \cdot x \right] \quad -W/2 \leq x \leq W/2$$

线性缓变结



- 可以求得内建电势:

$$V_{bi} = - \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} \varepsilon(x) dx = \frac{qa}{12\varepsilon_0} W^3$$

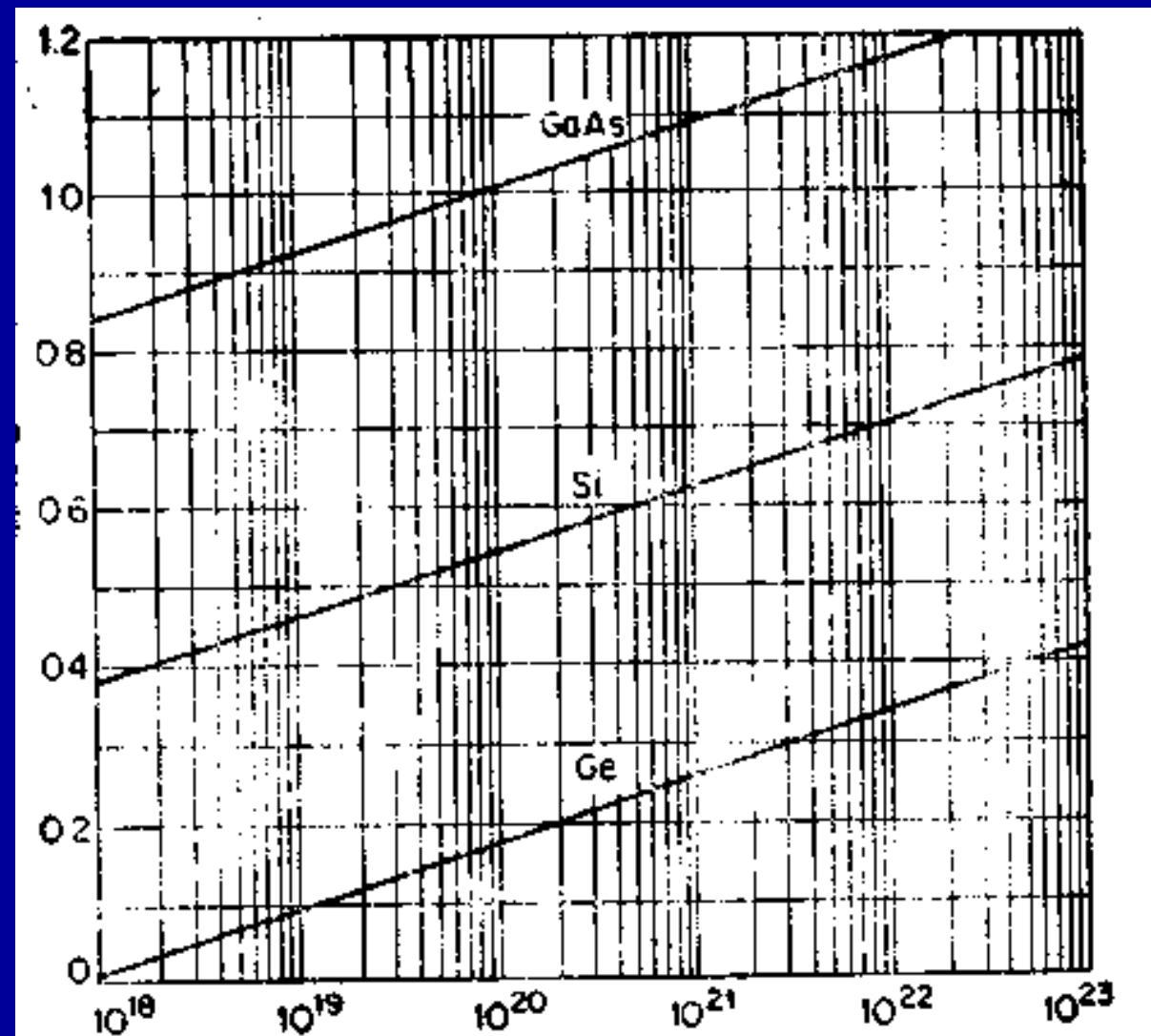
- 耗尽区宽度:

$$W = (12\varepsilon_s V_{bi} / qa)^{1/3}$$

如果把线性缓变结看成由无数薄层组成，每一薄层掺杂浓度均匀，则类似于突变结，由此内建电势可由耗尽区边缘处的杂质浓度表示：

$$V_{bi} = kT/q \ln \left[(aW/2)^2 / n_i^2 \right] = 2kT/q \ln (aW/2n_i)$$

将两式联立，消去W，可得到V_{bi}与杂质浓度梯度a的函数关系。

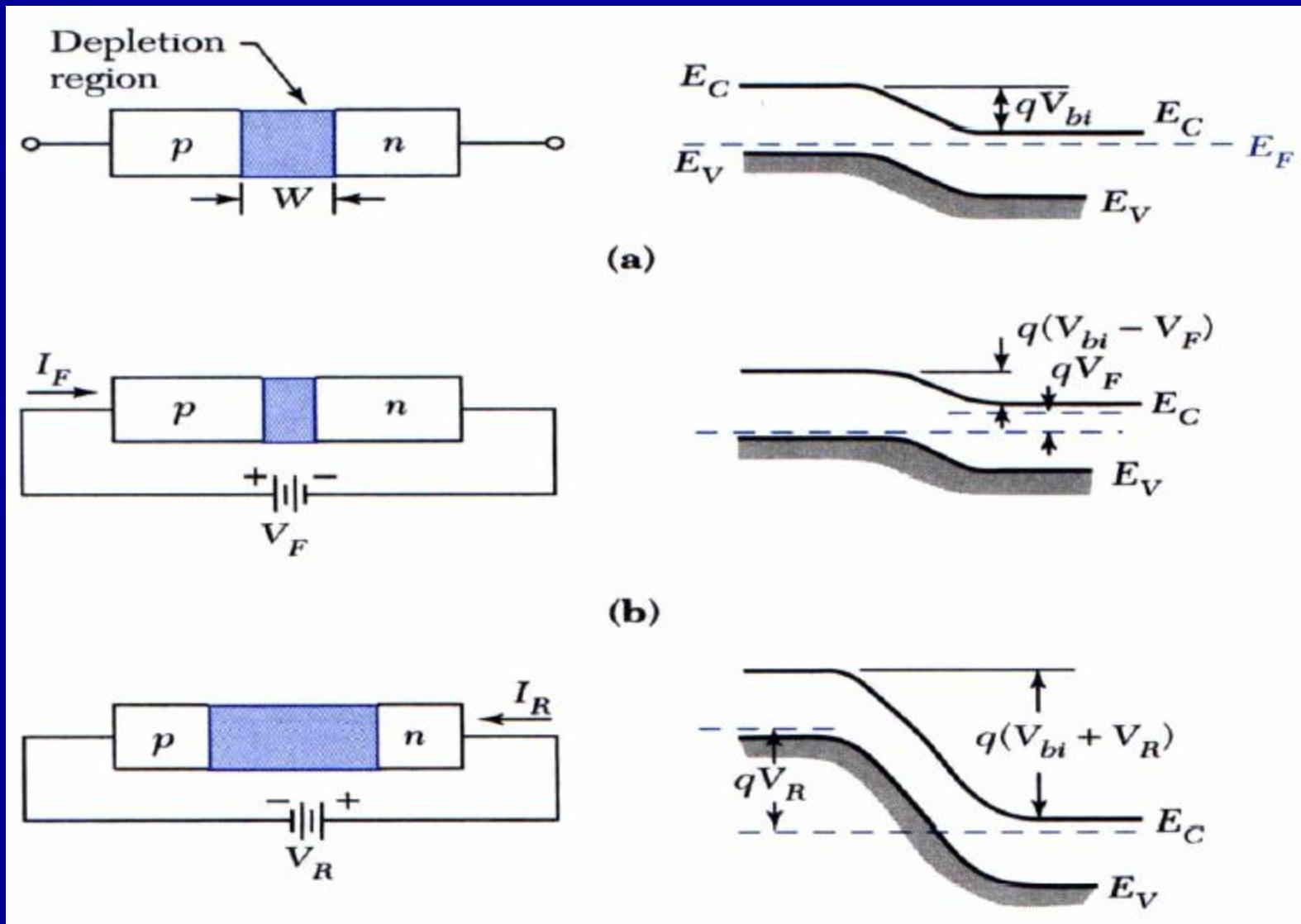


Si和GaAs线性缓变结的内建电势和杂质梯度的关系图 (cm^{-4})
Principle of Semiconductor Devices

2、非平衡PN结的特性

- 一个P-N结，当加上外电压时，势垒区中载流子的扩散和漂移两种运动的相对平衡状态将被破坏。直接结果是一种运动大于另一种运动，导致P-N结上净电流的流动。
- 当外加电压的方向使P区相对于N区为正时，称为正向偏置；反之，则称为反向偏置。

不同电压偏置下的P-N结



Principle of Semiconductor Devices

准费米能级

- 电子的准费米能级
描述导带电子分布的费米能级

$$n = N_C \exp\left[\frac{(E_{F_n} - E_C)}{kT}\right]$$

- 空穴的准费米能级
描述价带空穴分布的费米能级

$$p = N_V \exp\left[\frac{(E_V - E_{F_p})}{kT}\right]$$

- 非平衡载流子越多，准费米能级偏离E_F越远。

波尔兹曼关系

- 由电子和空穴的准费米能级可得N区边界处注入的空穴浓度：

$$p(x_n) = N_V \exp \left\{ \frac{[E_V(x_n) - E_{Fp}^'(x_n)]}{kT} \right\}$$

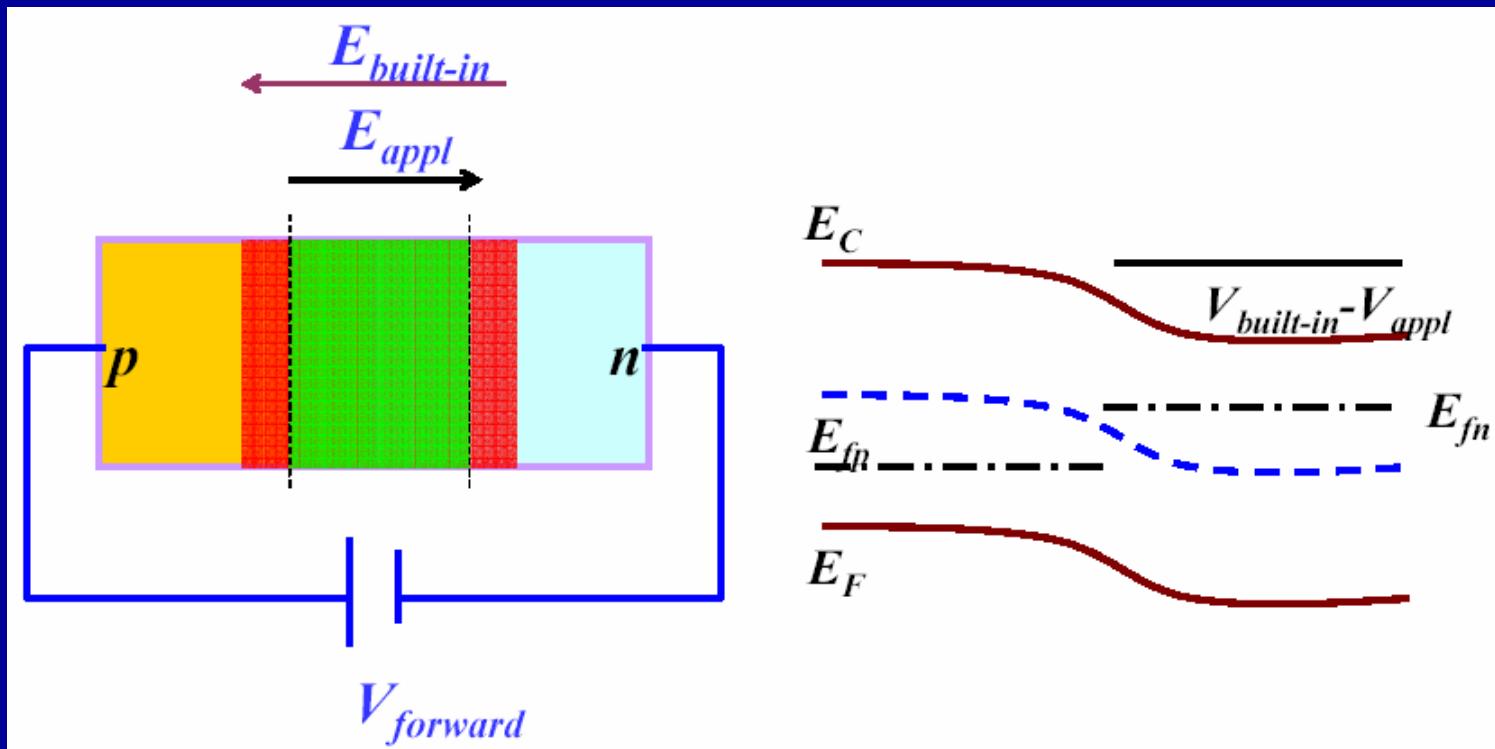
- 结定律：

$$p(x_n) = p_{n0} \exp \left(\frac{qV_f}{kT} \right) \quad n(-x_p) = n_{p0} \exp \left(\frac{qV_f}{kT} \right)$$

- 边界处注入的少子浓度由平衡态少子浓度和外加电压所决定，其值为平衡少子浓度的 $\exp(qV_f/kT)$ 倍。

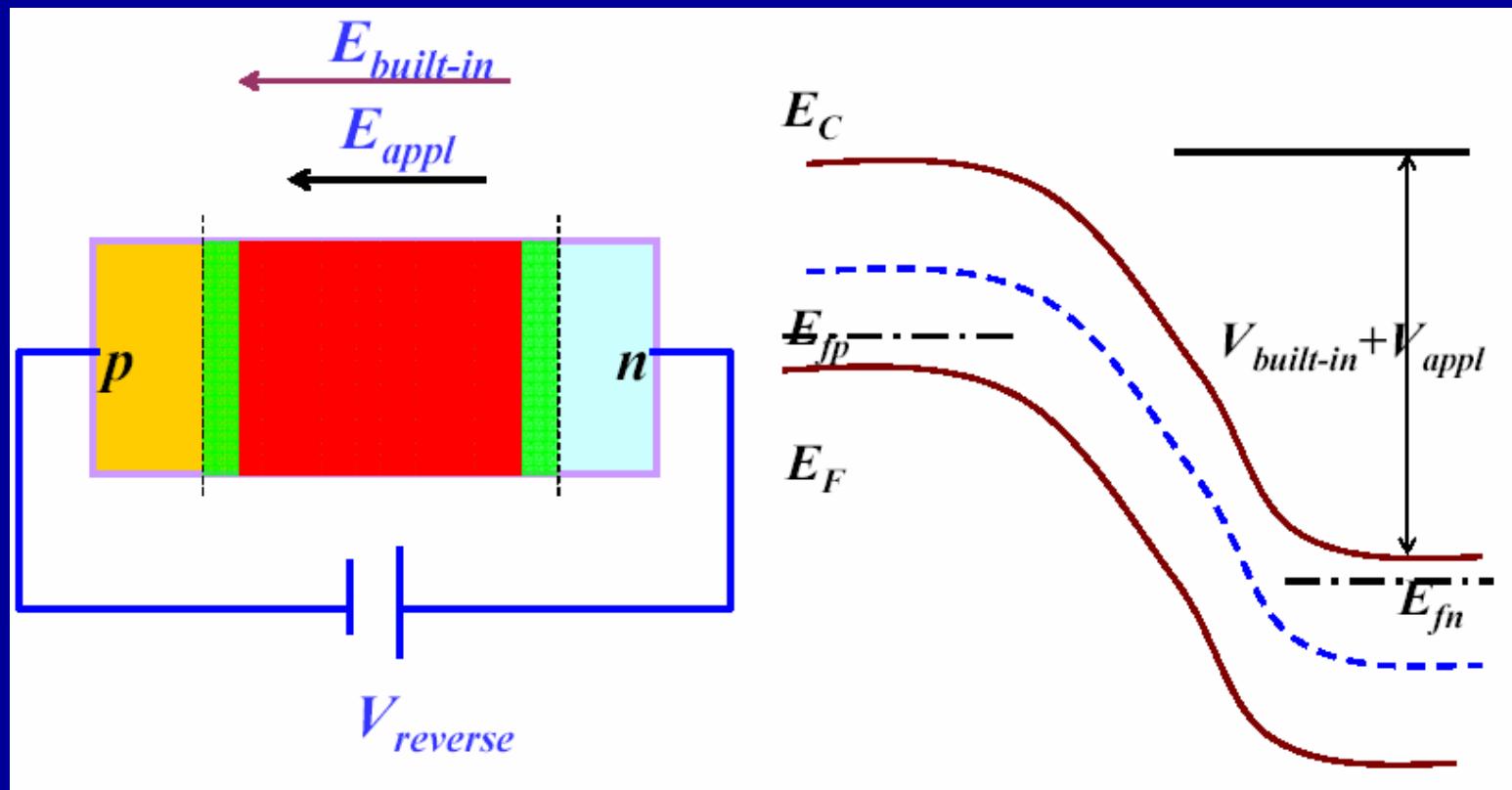
P-N结正向注入效应

空间电荷区两侧少子扩散长度范围内的区域称为扩散区。在P区一侧为电子扩散区，N区一侧为空穴扩散区。



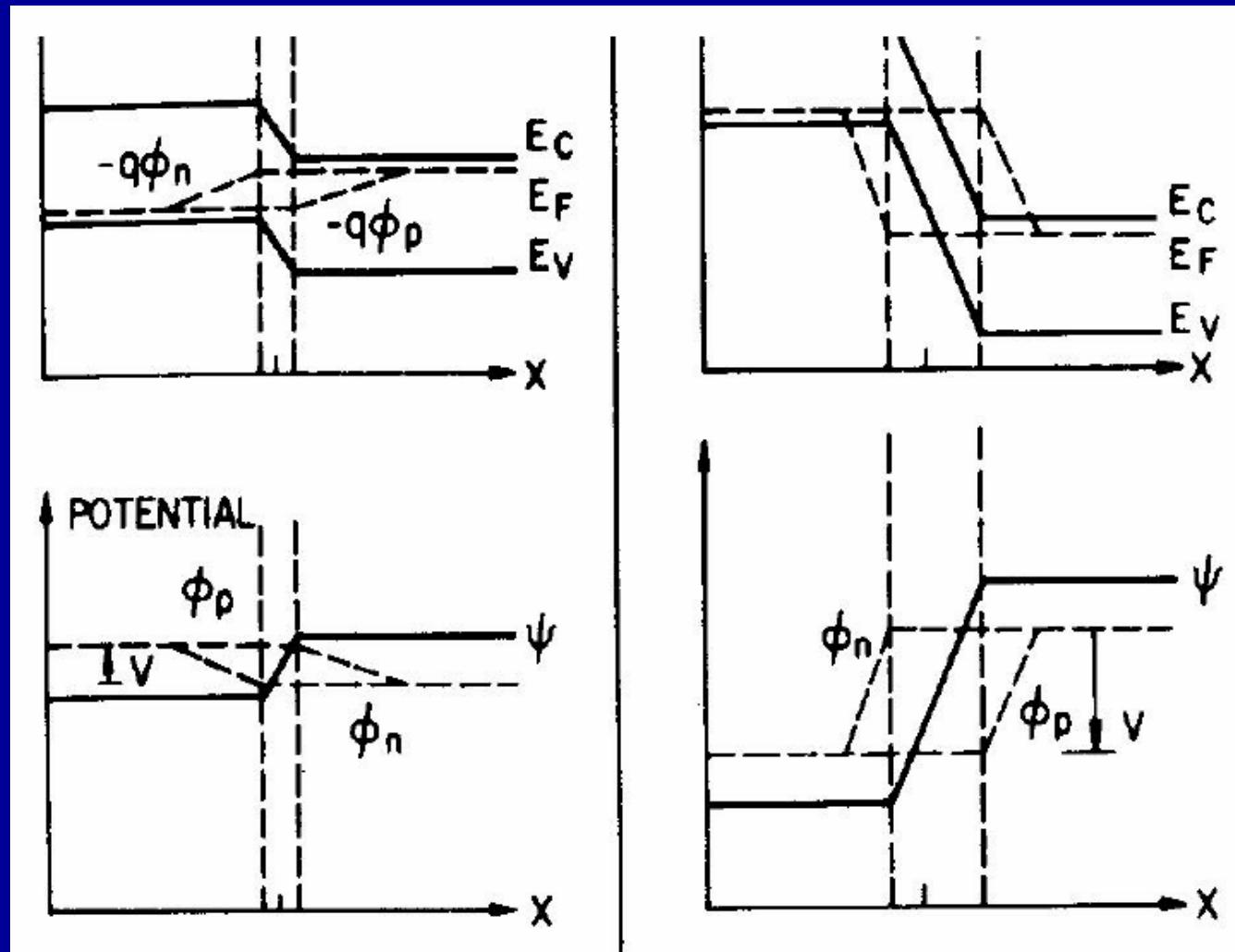
反向偏压下的P-N结

反向偏压下的P-N结电流只能来自势垒区两侧的少子扩散长度范围内对少子的抽取作用。



正向偏置

反向偏置



非平衡情况下空间电荷区宽度的变化

- 对于突变结有：

$$W \propto (V_{bi} - V_f)^{1/2}$$

$$W \propto (V_{bi} + V_R)^{1/2}$$

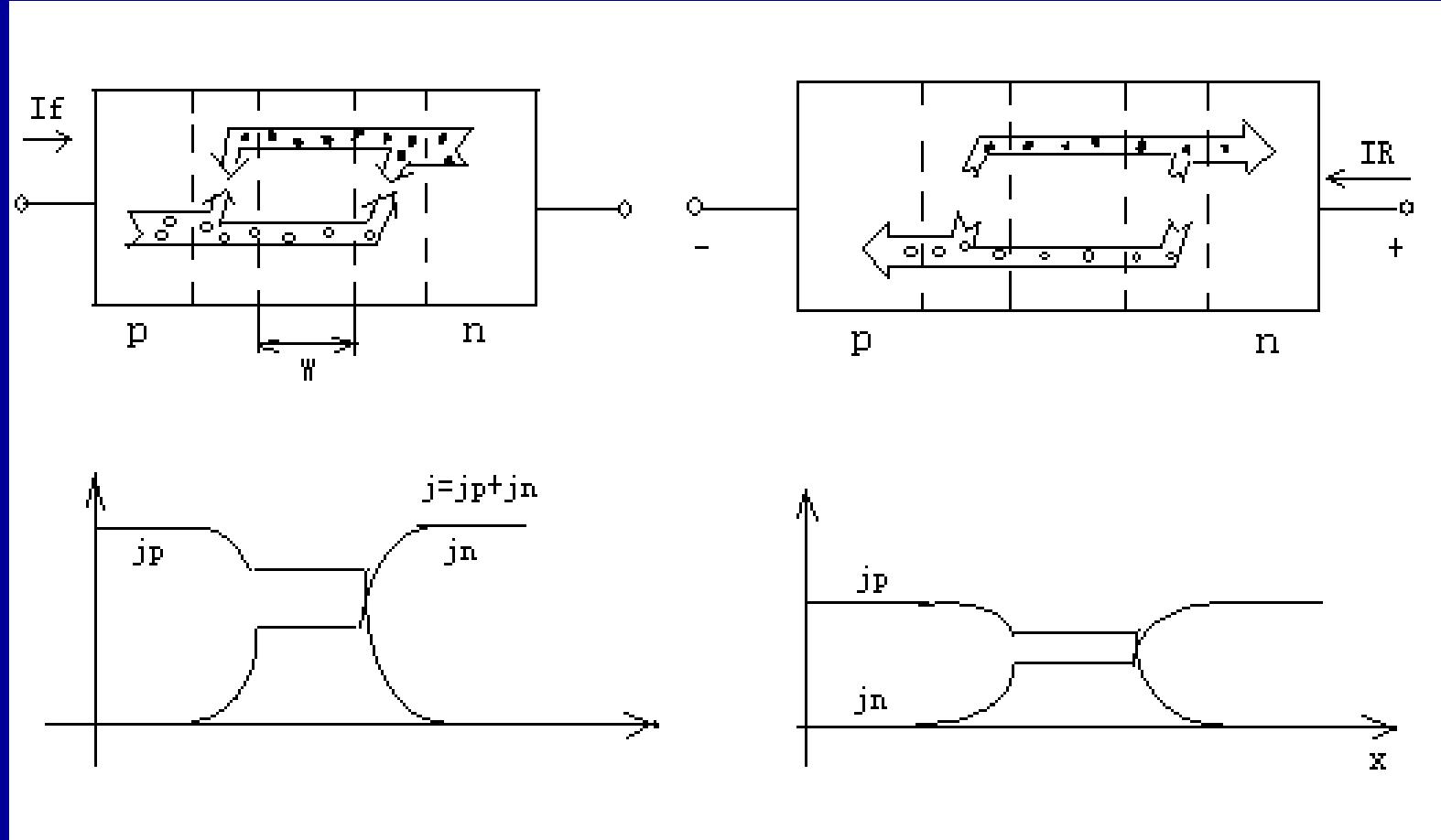
- 对于线性缓变结有：

$$W \propto (V_{bi} - V_f)^{1/3}$$

$$W \propto (V_{bi} + V_R)^{1/3}$$

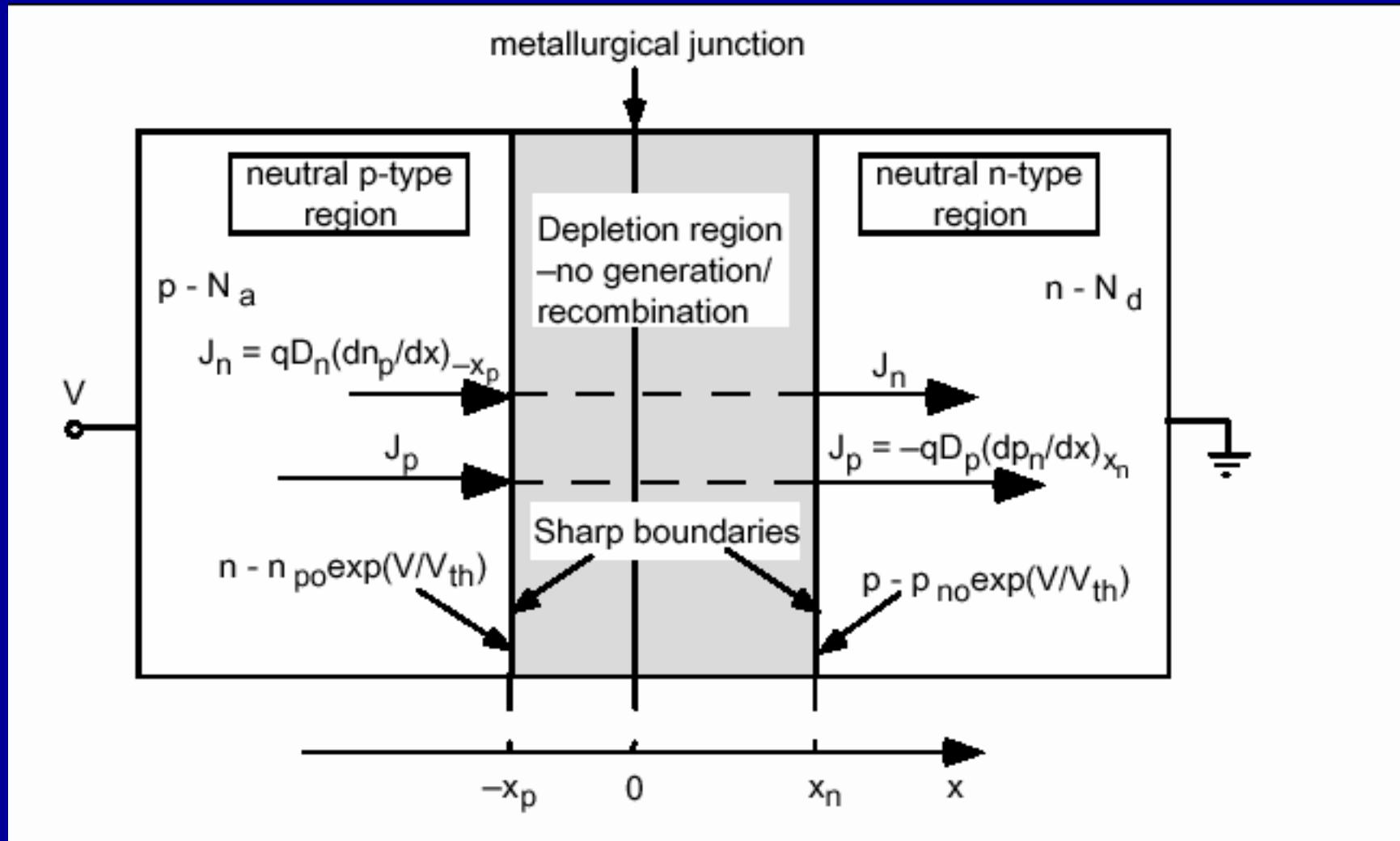
§ 2.3 PN结的直流IV特性

- 在正偏压下，电子从N区扩散到P区，空穴从P区扩散到N区。两者运动方向相反，但因所带电荷异号，所以形成的电流方向相同，都是从P区向N区流动。因此，通过P-N结的总的正向电流为两者之和。当外压增大时，势垒区电场将更减弱，电子、空穴扩散电流亦相应增加，于是总电流增大。
- 在反向偏压下，势垒区两侧一个扩散长度范围内少子反扩散形成了电流，其方向从N区流向P区。由于少子浓度很低，故反向电流很小，且由于少子浓度梯度是不变的，因此，反向电流不随外压的改变而变化，即反向电流饱和。



P-N结电流的传输与转换过程及电流密度分布

PN结的电流组成



Principle of Semiconductor Devices

理想伏安特性

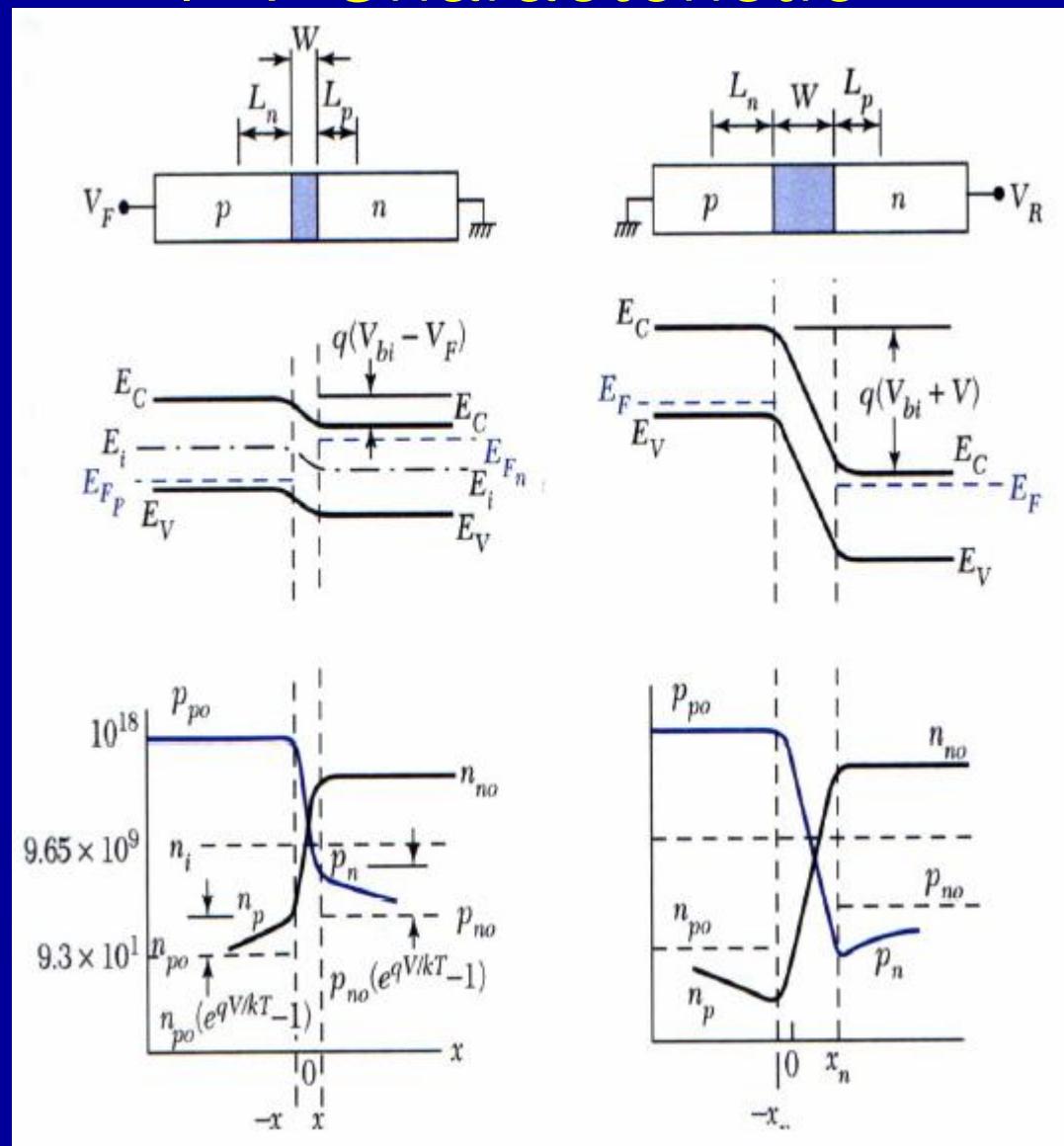
- 基本假设：
 - ①耗尽区有突变的边界，边界外的半导体为电中性，外加电压全部降在势垒区中；满足突变耗尽近似，即势垒区中载流子全部耗尽。
 - ②两个边界处的载流子浓度通过结上的静电势差相关联。等同于半导体非简并，等同于满足玻尔兹曼分布条件。
 - ③小注入条件。即注入的少子浓度远小于多子浓度。在外加电压变化时，中性区边界处的多子浓度的变化可忽略。
 - ④忽略势垒区中载流子的产生和复合作用，耗尽区内既无产生电流，又无复合电流，通过势垒区的电子和空穴电流为常数。

基本方程组

- 从半导体的基本方程出发。描述载流子运动规律的电流密度方程和连续性方程

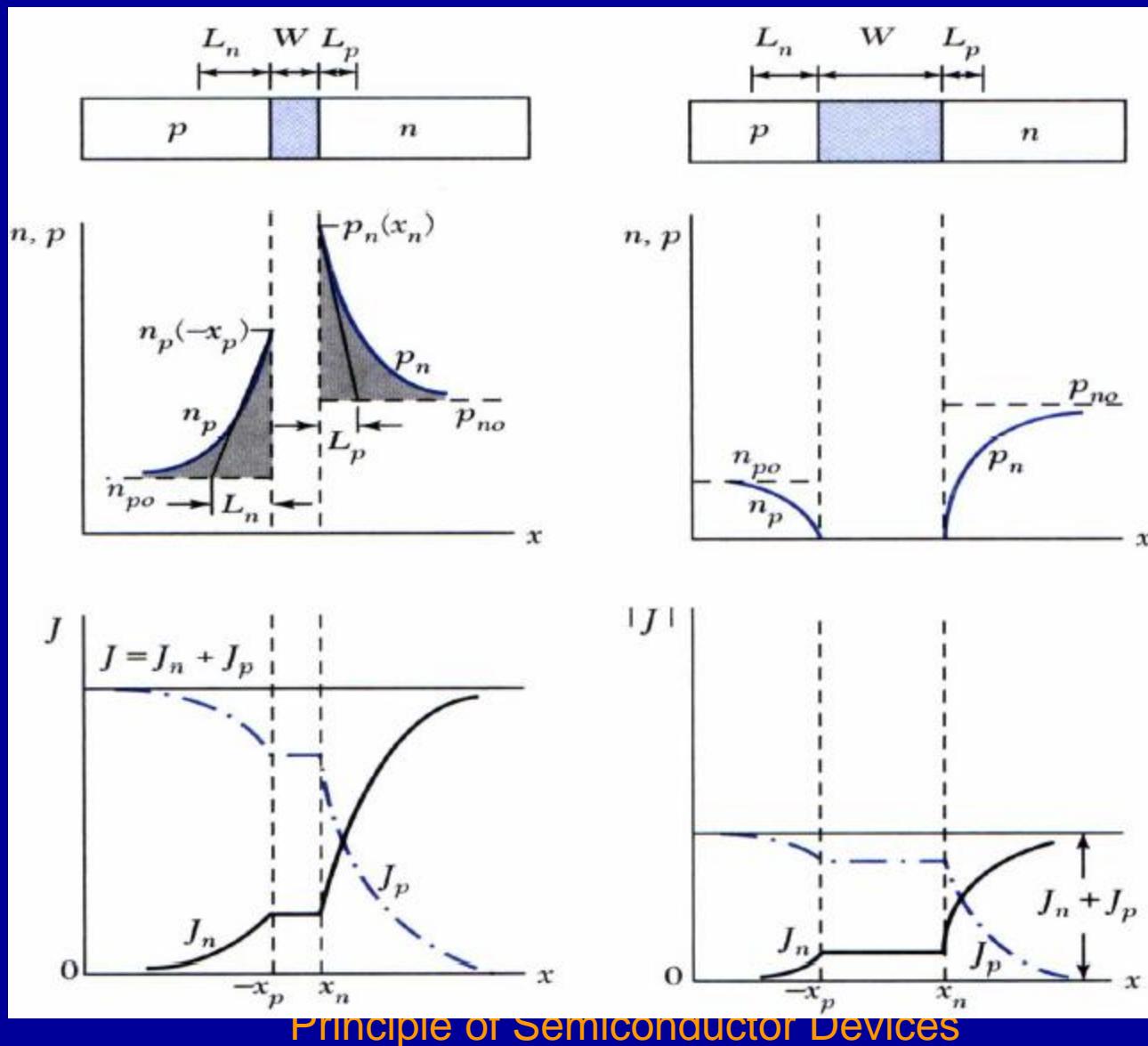
$$\begin{aligned}
 J_n &= q\mu_n n\varepsilon + qD_n \frac{\partial n}{\partial x} \\
 J_p &= q\mu_p p\varepsilon - qD_p \frac{\partial p}{\partial x} \\
 \frac{\partial n_p}{\partial \tau} &= \frac{1}{q} \frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{\Delta n_p}{\tau_n} \\
 \frac{\partial p_n}{\partial \tau} &= -\frac{1}{q} \frac{\partial J_p}{\partial x} - \frac{\Delta p_n}{\tau_p}
 \end{aligned}$$

I-V Characteristic



Principle of Semiconductor Devices

I-V Characteristics



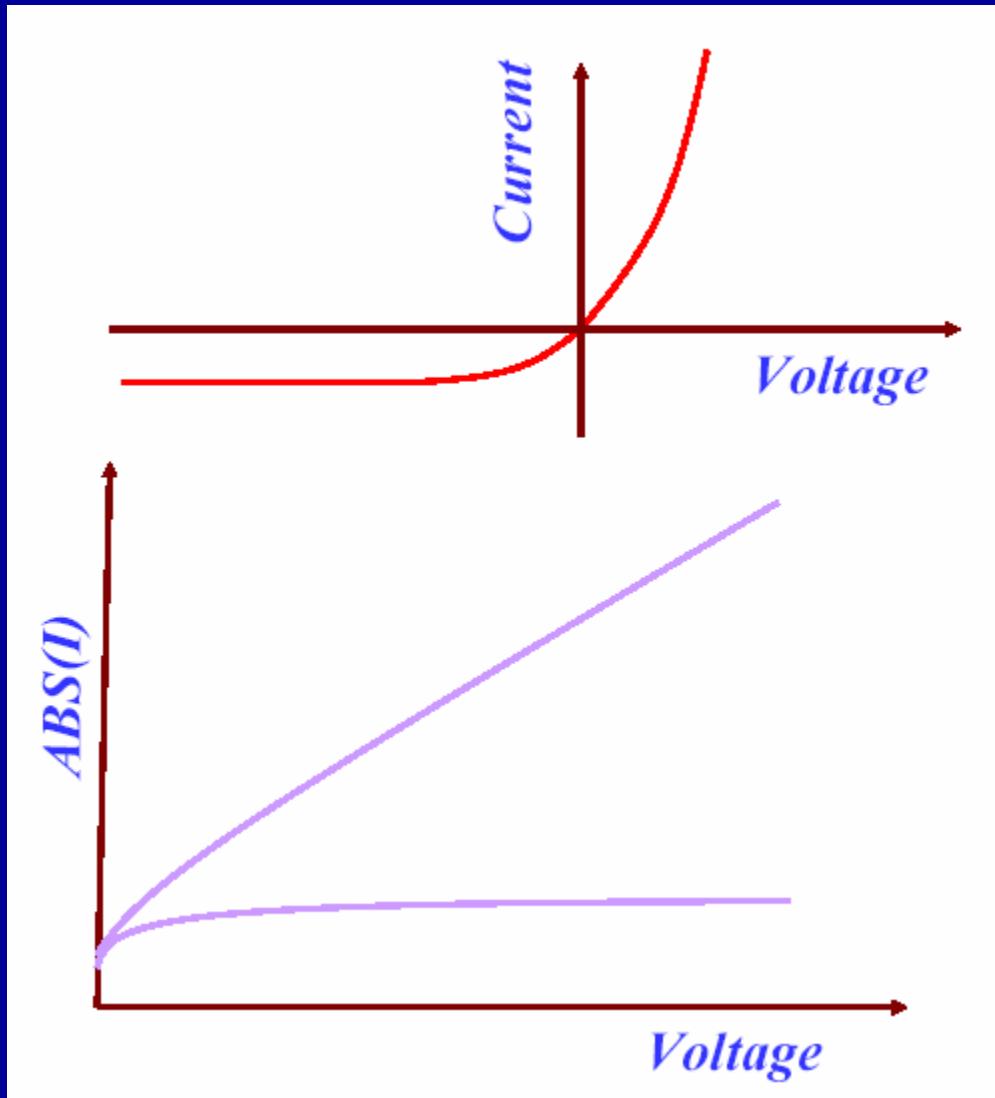
肖克莱方程

- 求得P-N结的直流基本表达式，即肖克莱方程：

$$J = J_p(x_n) + J_n(-x_p) = J_S \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right)$$

$$J_S = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}$$

I-V 特性曲线图



正向偏置：

$$J = J_n + J_p = J_s \left(e^{qV/kT} - 1 \right)$$

反向偏置：

$$J = -J_s$$

$$J = J_s \exp(qV/kT)$$

$$J = -J_s = -\left(\frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n}\right)$$

讨论

1. 具有单向导电性
2. 温度对电流的影响

其中 D_n 、 L_n 、 $n_p 0$ 、 D_p 、 L_p 、 $p_n 0$ 与 T 有关， J_s 随 T 的升高而增大，且禁带宽度 E_g 愈大， J_s 变化越快

3. 上述理想方程描述Ge的pn结在小电流密度下的伏安特性是适合的，而对Si和GaAs的pn结只能定性符合，因此需要进行修正，包括**产生复合效应、大注入效应、串联电阻效应和温度效应**

产生复合效应

1. 反向偏置

当P-N结反向偏置时，由耗尽近似知，势垒区中的载流子浓度 $n=p=0$ ，此时电子和空穴的产生过程占支配地位，俘获过程并不重要。

- 势垒区中产生电流密度为
- $$J_g = \int_0^W qGdx = \frac{qn_i}{2\tau_g} \cdot W$$
- P-N结反向电流为反向扩散电流与反向产生电流之和

$$J_R \approx q \sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \frac{n_i^2}{N_D} + \frac{qn_iW}{2\tau_g}$$

2. 正向偏置

- 对于P⁺-N结，总的正向电流为

$$J_F = \frac{qL_p n_i^2}{\tau_p N_D} e^{qV/kT} + \frac{qn_i W}{2\tau_r} e^{qV/2kT}$$

- 正向电流密度常用下列经验公式表示

$$J_F \sim e^{\frac{qV}{\eta kT}}$$

η称为二极管的理想化因子

大注入效应

- 在P-N结中，当注入的少数载流子浓度达到甚至超过多数载流子浓度时，称为大注入。大注入只在正向偏置中存在。
- 大注入时的边界条件为

$$p_n(x_n) = n_i e^{qV/2kT}$$

$$n_p(-x_p) = n_i e^{qV/2kT}$$

- 大注入下通过P⁺-N结的总电流可表示为：

$$J = J_p(x_n) = \frac{q(2D_p)n_i}{L_p} \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - \frac{p_{n0}}{n_i} \right]$$

$$J = \frac{2qD_p n_i}{L_p} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

- 同理可得，对于大注入到p区的电子电流

$$J = \frac{2qD_n n_i}{L_n} \exp\left(\frac{qV}{2kT}\right)$$

小结：

- ①大注入使扩散系数加倍，少子扩散系数由 D_P 增加到 $2D_P$ ，此时，漂移电流和扩散电流各占一半。
- ②大注入时电流对电压的依赖关系由小注入的 $\exp(qV/kT)$ 变为 $\exp(qV/2kT)$ ，电流随电压增加的速度变慢。
- ③大注入的电流密度与N区掺杂浓度无关，只与 n_i 成正比。而小注入下与 n_i^2/N_D 成比例。

串联电阻效应

- 大电流时，在串联电阻R（包括中性区的电阻和非理想欧姆接触的电阻）上的压降不能忽略。
- 实际加在势垒上的电压只有 $V - IR$ ，因此

$$I = I_s e^{\frac{q(V-IR)}{kT}} = I_s \frac{e^{\frac{qV}{kT}}}{e^{\frac{qIR}{kT}}}$$

- 电流随正向电压增加的速度变慢

温度效应

- 工作温度对器件的性能影响很多，无论是正偏还是反偏，扩散电流和复合产生电流的大小都强烈依赖于温度。

1. 反向偏置时：

在室温附近，对Si的pn结，温度每增加1K， I_S 相应增加15%，即温度每增加6°C，反向电流增加1倍。

2. 正向偏置时：

对Si的pn结， $V=0.6V$ ，室温附近，温度每增加10°C，电流增加1倍，电压变化率约为 $-2mV/^\circ C$ 。

§ 2.4 PN结的CV特性

- P-N结的电容可分为势垒电容及扩散电容，前者由势垒区中的空间电荷随外加电压变化而引起，后者由势垒区两边积累的非平衡少子电荷随外加电压变化所引起。
- P-N结的势垒区宽度随外加电压而变，因此所包含的空间电荷（电离杂质）量也随外加电压而变。即耗尽层内正负电荷量随外加电压改变，这种电压变化引起电荷量变化的电容效应称做P-N结耗尽层电容或势垒电容。

1、势垒电容（耗尽层电容）

- 设Q为单位面积耗尽区内正的（或负的）电荷量，则单位面积耗尽层电容的定义为：

$$C_j = \frac{dQ}{dV}$$

- 对于任意掺杂分布的PN结，单位面积耗尽层电容表达式：

$$C_j \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{\varepsilon_s}{W}$$

- 微分电容，只在小信号情形下成立。

(1) 突变结势垒电容

- 势垒电容为

$$C_j = \frac{dQ}{dV} = A \left[\frac{q\epsilon_s N_A N_D}{2(N_A + N_D)} \cdot \frac{1}{V_t} \right]^{1/2}$$

V_t 为结上总电压,即外加电压与接触电位的代数和。

$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{W}$$

(2) 线性缓变结势垒电容

- 势垒电容为

$$C_j = \frac{dQ}{dV} = A \cdot \left(\frac{qa_j \epsilon_s^2}{12V_t} \right)^{1/3}$$

- 上面的讨论都利用了耗尽近似，因此对反偏P-N结是适用的。但对接近零偏或正偏时，势垒区内自由载流子不能忽略，则上面的公式需进行修正，只要把电压项的 V_{bi} 换成 $(V_{bi} - 2kT/q)$ 即可。

P-N结势垒电容特性

- P-N结势垒电容类似于中间充满半导体介质的平板电容器。但两者之间也有重要的差异：
 - ①平板电容器的电荷集中在极板上。而P-N结的电荷分布在整個空间电荷区内，且电荷的变化只发生在势垒区边缘。
 - ②平板电容器极间距离一定，电容是一个常数，与电压无关，而P-N结势垒宽度随外压而变，故它是一个非线性电容，也称为微分电容。
 - ③平板电容器可用于隔直流，而P-N结却能允许直流通过。

势垒电容CV特性曲线

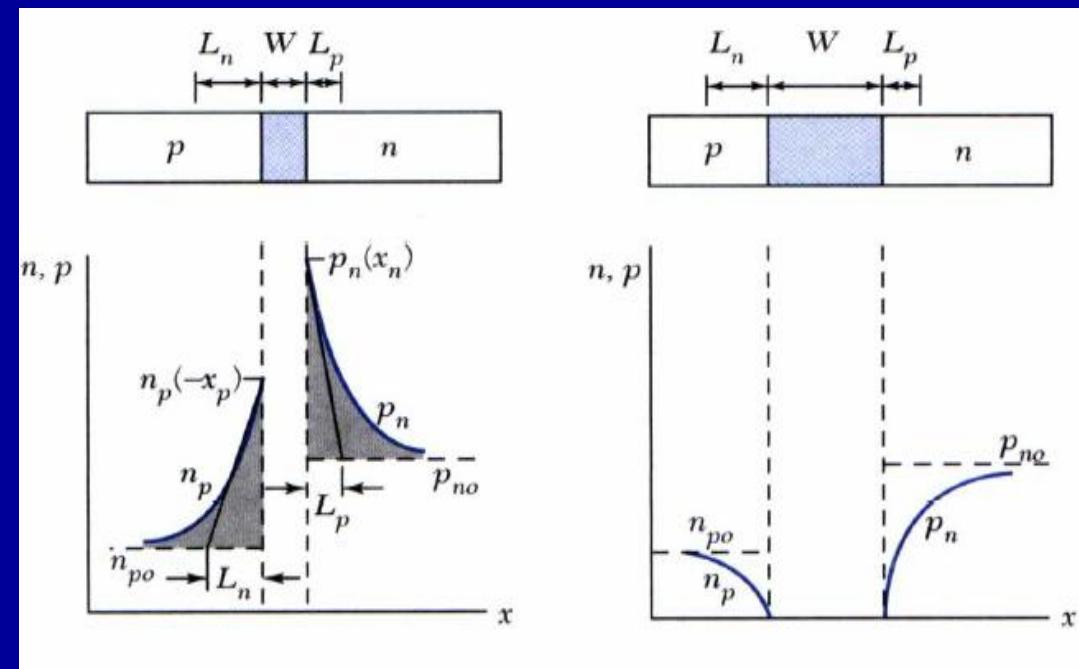
- 对于单边突变结， $\frac{1}{C_j^2} - V$ 是直线，斜率为 $\frac{-2}{q\epsilon_s N_B}$ 由此可以给出衬底的杂质浓度NB，截距为V_{bi}。因此可以用C-V特性估算任意杂质浓度的分布。
- 对于线性缓变结，作出pn结的 $\frac{1}{C_j^3} - V$ 曲线，由斜率和截距可得到杂质梯度a_j和内建电势V_{bi}。
- 反向偏置时耗尽层电容为，当V_R>>V_{bi}时，

$$C_j \propto V_R^{-n}$$

2、扩散电容

- 扩散区内存贮电荷量随电压而改变的现象称之为扩散电容。
- 当pn结正偏时，中性区存贮电荷的再分布对结电容有一项附加的重要贡献即为扩散电容 C_d ：

$$C_d \equiv A \frac{dQ_p}{dV}$$



Principle of Semiconductor Devices

少数载流子的存贮

- 少子存贮电荷 Q_p 依赖于扩散长度和耗尽区边界的电荷密度。
- 用注入电流来表示存贮电荷：

$$Q_p = \frac{L_p^2}{D_p} I_F = \tau_p I_F$$

$$I_F = \frac{qAD_p}{L_p} p_{n0} (e^{qV_F/kT} - 1) \quad L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$

即存贮电荷是注入电流和少子寿命的乘积。

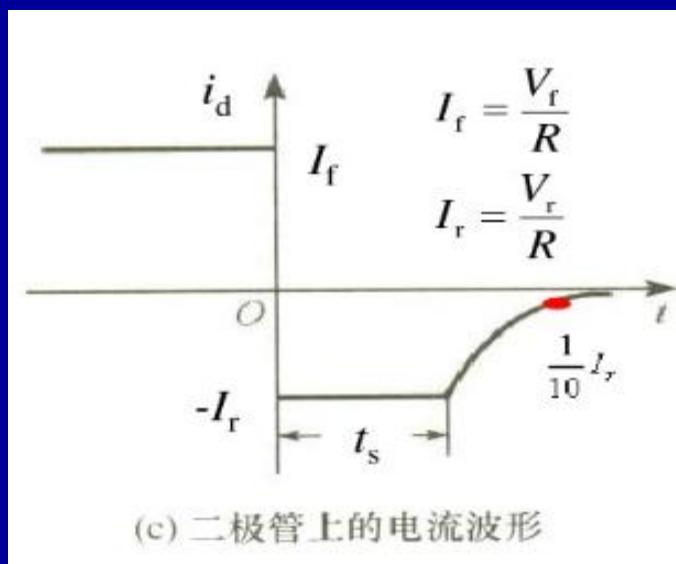
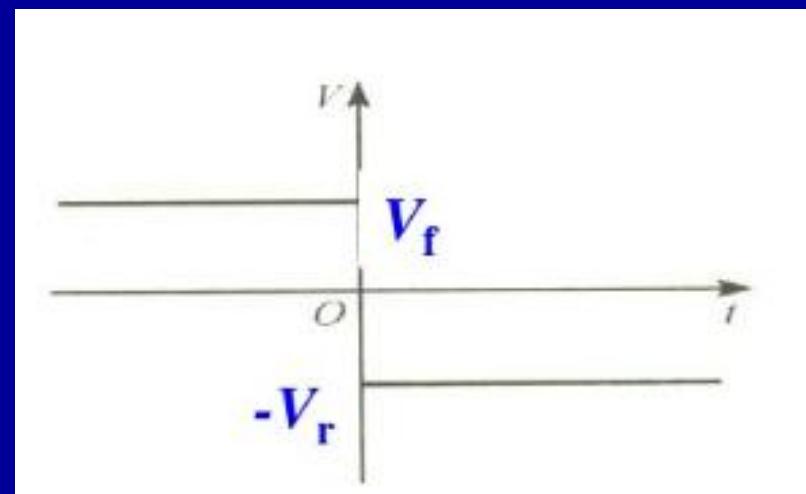
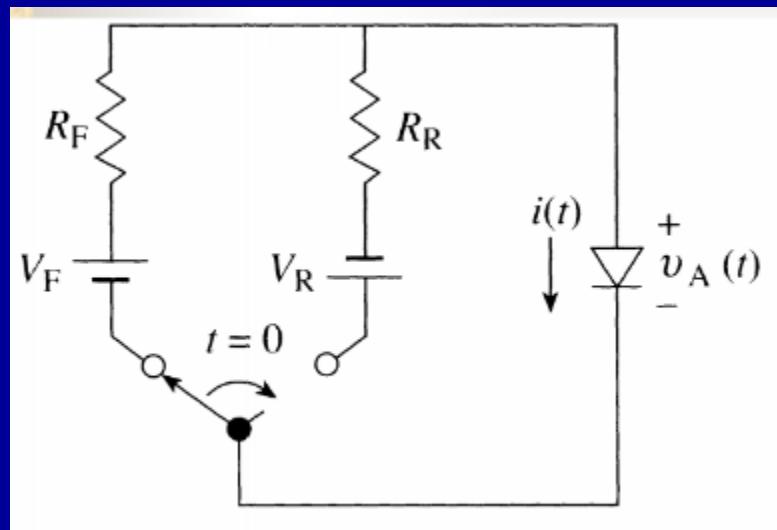
- PN结扩散电容考虑少子存贮对Cd的贡献：

$$C_d = \frac{Aq}{kT} \left(\frac{qL_p p_{n0}}{2} + \frac{qL_n n_{p0}}{2} \right) e^{qV_0/kT}$$

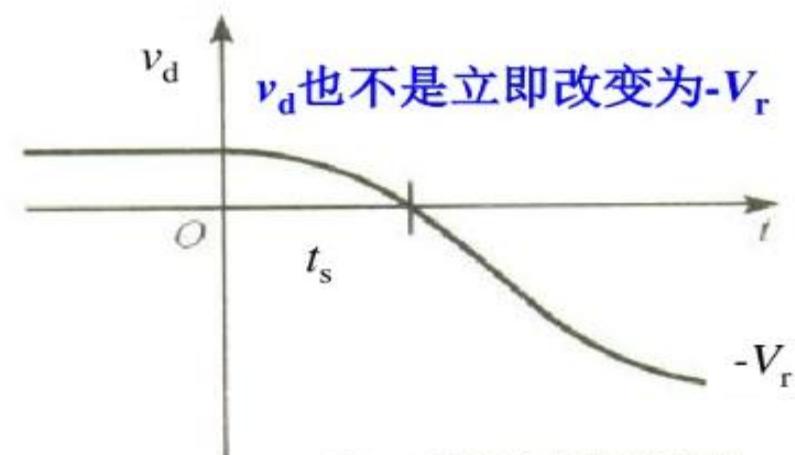
§ 2.5 PN结的瞬态特性

- 正向偏置时，电子从n区注入到p区，空穴从p区注入到n区，少子一旦注入，便和多子复合，最终形成非平衡载流子浓度随距离呈指数衰减的稳定分布，这些非平衡载流子导致pn结内的电荷积累，即等量的过剩电子电荷和过剩空穴电荷的贮存。
- 当结上外加偏压突然反向时，这些贮存电荷不能立即去除，需要经过一定时间，pn结才能达到反偏状态，这个时间称为反向恢复时间。
- 贮存电荷和电流等随时间的变化说明pn结的反向瞬态特性。

瞬态特性和反向恢复时间



(c) 二极管上的电流波形



(d) 二极管上的电压波形

瞬态特性和反向恢复时间

- PN结的反向瞬变过程可以分为电流恒定和电流衰减两个阶段，相应的瞬变时间分别以 t_s 和 t_f 表示。 t_s 称为存储时间， t_f 称为下降时间，定义为从 I_R 衰减到 $0.1I_R$ 所经过的时间。
- $t_{off} = t_s + t_f$ 即为反向恢复时间，比偏压从反向突变为正向的瞬变时间长的多。
- 采用电荷控制模型，对长p⁺n结近似计算瞬变时间。

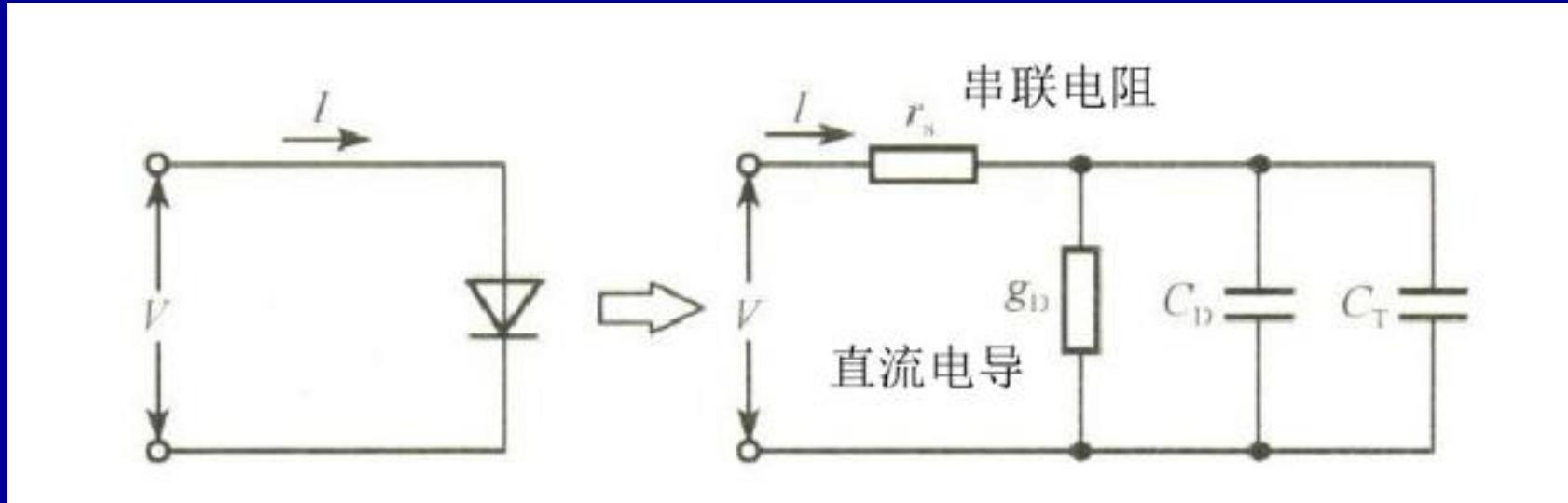
电荷控制模型

- 反偏刚开始时, $0 < t < t_S$, $I_R = V_R / R$
- 存贮电荷通过外电路流走 (反向抽取) 和自身复合减少,
$$-\frac{dQ}{dt} = I_R + \frac{Q}{\tau_p}$$
 $t=0$ 时, $Q = \tau_p I_F$
- 方程的解为
$$Q(t) = \tau_p (I_F + I_R) e^{-t/\tau_p} - \tau_p I_R$$
- 存储时间为 :
$$t_S = \tau_p \ln(1 + \frac{I_F}{I_R})$$

讨论

- 当 I_R/I_F 很小时，对于 n 型材料长度远大于扩散长度 ($W_n \gg L_p$) 的 p^+n 结：
 - 反向恢复时间可近似为：
- $$t_s + t_f \approx \frac{\tau_p}{2} \left(\frac{I_F}{I_R} \right)$$
- 对 $W_n \leq L_p$ 时，可近似为：
- $$t_s + t_f \approx \frac{W_n^2}{2D_p} \left(\frac{I_F}{I_R} \right)$$
- 对于高速开关器件，必须减小少子寿命。因此通常引进能级靠近禁带中央的复合中心，如硅中掺金，可以大大降低少子寿命。

PN结二极管等效电路模型



r_s 是串联电阻，是由中性区和接触电极上的电压降引起的；

g_D 是二极管直流电导；

C_D 是扩散电容；

C_T 是势垒电容。

§ 2.6 PN结的击穿特性

- 引起P-N结击穿的主要机构有三种：
热不稳定性，隧道效应和雪崩倍增
- 热击穿
发生热击穿的PN结，若未采取保护措施，会烧毁PN结。
- 隧道击穿
利用PN结击穿现象来稳定电路中的电压，作稳压管使用，在该电路中有保护电阻防止P-N结电流的无限增大。
- 雪崩倍增效应 (Avalanche Multiplication)
碰撞电离引起的雪崩倍增使大多数半导体器件的工作电压受到限制，同时可以用在产生微波功率和探测光信号等场合。

1、热不稳定性

由于在高反向电压作用下的反向电流引起热耗散，使结温升高。结温升高又反过来使反向电流增加，因为反向电流强烈地依赖温度：

$$I_R \sim T^3 \cdot e^{-Eg0/kT}$$

反向电流→热耗散→结温升高→反向电流增加

- 对禁带宽度较小，反向电流较大的P-N结（如锗），室温下的热不稳定性是重要的。
- 对于一般P-N结不那么重要。特别是在低温下，热不稳定性就变得更不重要了。

2、隧道击穿

当P-N结两区掺杂都很高时，势垒区变得很窄且电场很强。若反偏压增加到某一值，能带弯曲度的增大，将使载流子从势垒区电场中获得的附加静电势能达到甚至超过导带底电子的能量。此时，根据量子力学理论，电子有一定几率穿过禁带而进入导带，这就叫隧道效应。

电压越大，势垒区电场就越强，隧穿几率就越大。这就使反向电流猛增，于是发生了隧道击穿。

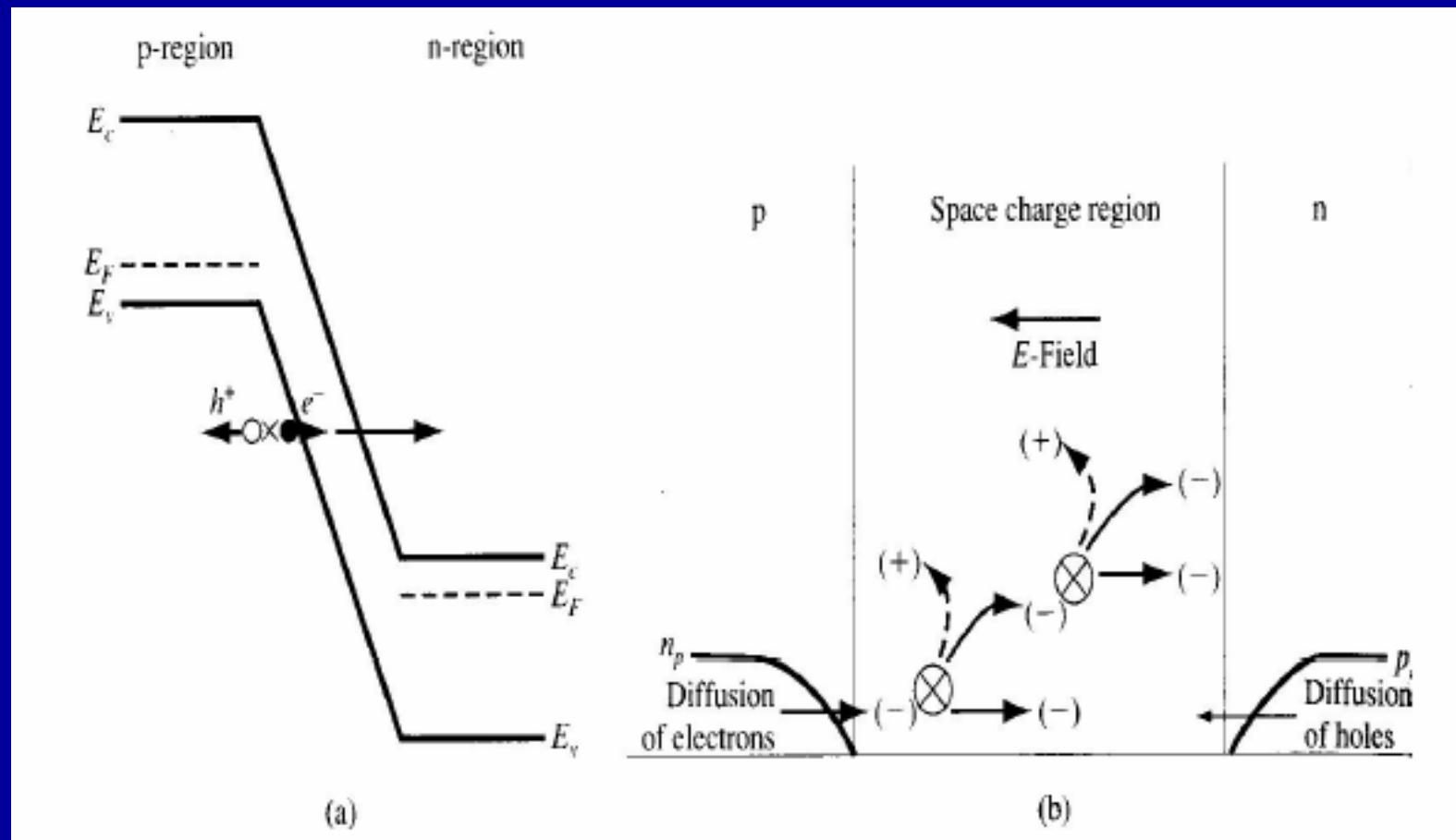
理论计算表明，隧道击穿只发生在重掺杂的P-N结中。隧道击穿的击穿电压主要决定于势垒区厚度 d ，而 d 又正比于 E_g 。而多数半导体的禁带宽度 E_g 随温度增加而减小，亦即随着温度升高，击穿电压降低，击穿电压的温度系数是负的。

3、雪崩击穿

雪崩击穿是最重要的P-N结击穿机构。它决定了大多数器件所加反向电压的上限。

- 雪崩击穿条件
$$\int_0^W \alpha dx = 1$$
- 雪崩击穿电压
$$V_B = \frac{1}{2} \epsilon_{mB} \cdot W$$
- 提高雪崩击穿电压的途径：
电场限制环、扩散环、台面结构等

- 雪崩击穿电压比隧道击穿电压高得多。
研究表明：
 $V_B < 4(Eg/q)$ 时主要是隧道击穿，
 $V_B > 6(Eg/q)$ 时主要是雪崩击穿，
击穿电压在 $4 \sim 6(Eg/q)$ 之间，则是两种机构的混合。
- 对硅来说， $Eg=1.12\text{eV}$ ，若 $V_B < 4.5\text{V}$ 为隧道击穿，
 $V_B > 6.7\text{V}$ 为雪崩击穿；
- 对锗， $Eg=0.66\text{eV}$ ， $V_B < 2.7\text{V}$ 的为隧道击穿，
 $V_B > 4.0\text{V}$ 的为雪崩击穿。

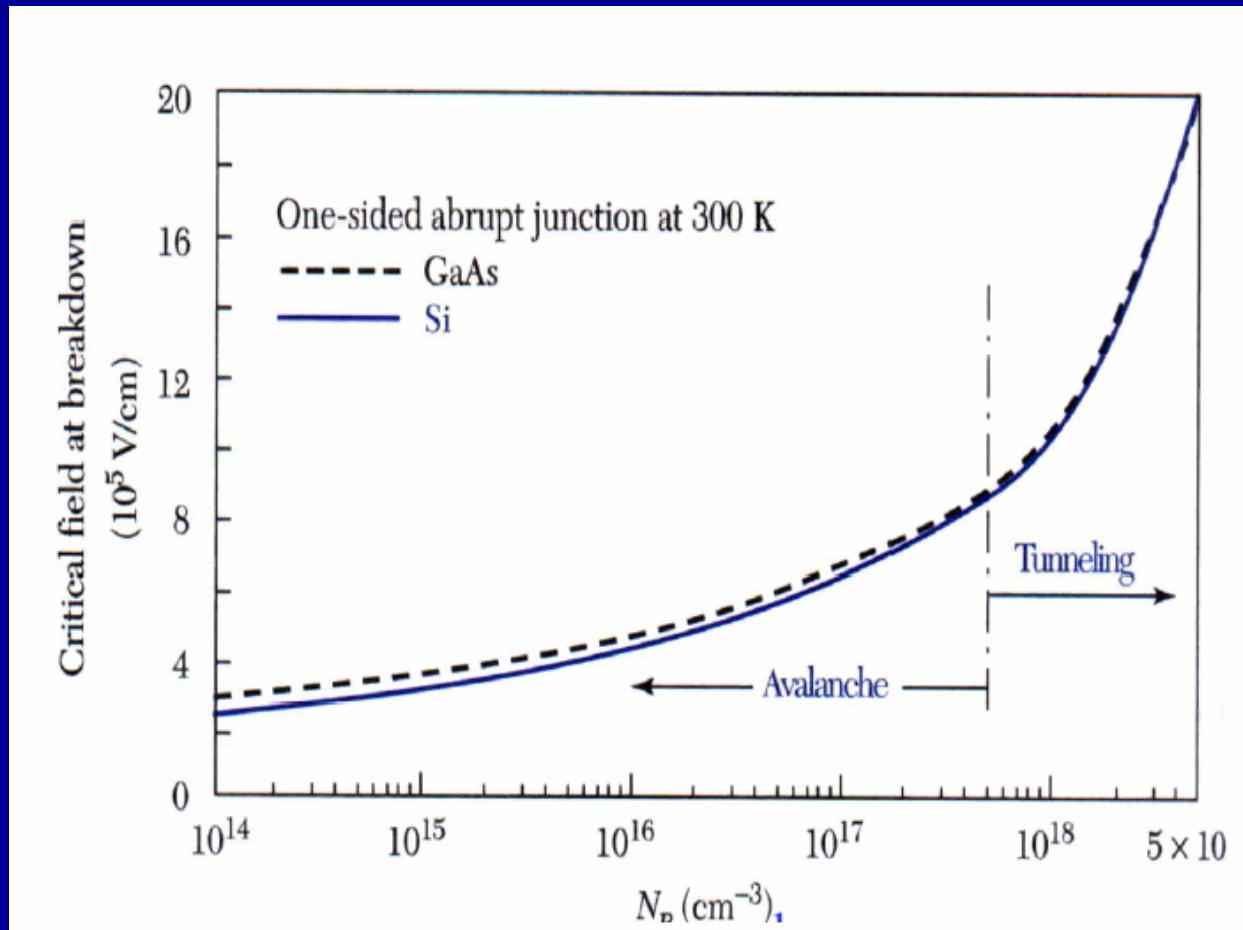


(a) 隧道击穿 (b) 雪崩击穿

隧道击穿与雪崩击穿的比较

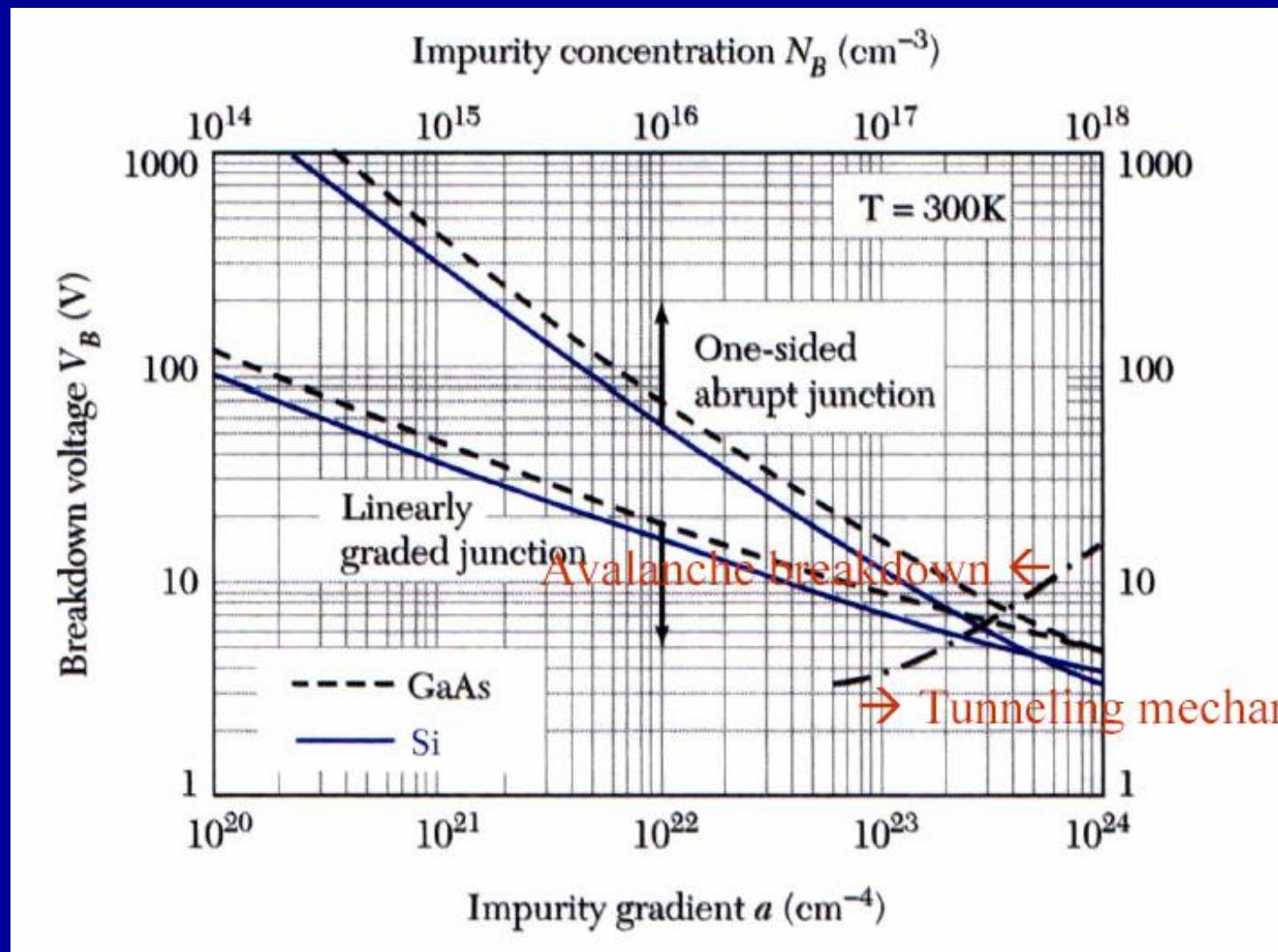
	齐纳击穿			雪崩击穿		
	单边突变结 N (cm ⁻³)	线性缓变 结 a(cm ⁻⁴)	击穿电压 VB (V)	单边突 变结 N(cm ⁻³)	线性缓 变结 a(cm ⁻⁴)	击穿电 压 VB(V)
Si	$>6 \times 10^{17}$	$>5 \times 10^{23}$	<4.5	$<3 \times 10^{17}$	$<1 \times 10^{23}$	>6.7
Ge	$>1 \times 10^{18}$	$>2 \times 10^{23}$	<2.7	$<1 \times 10^{17}$	$<4 \times 10^{22}$	>4.0
温度系数	负温度系数			正温度系数		

结击穿

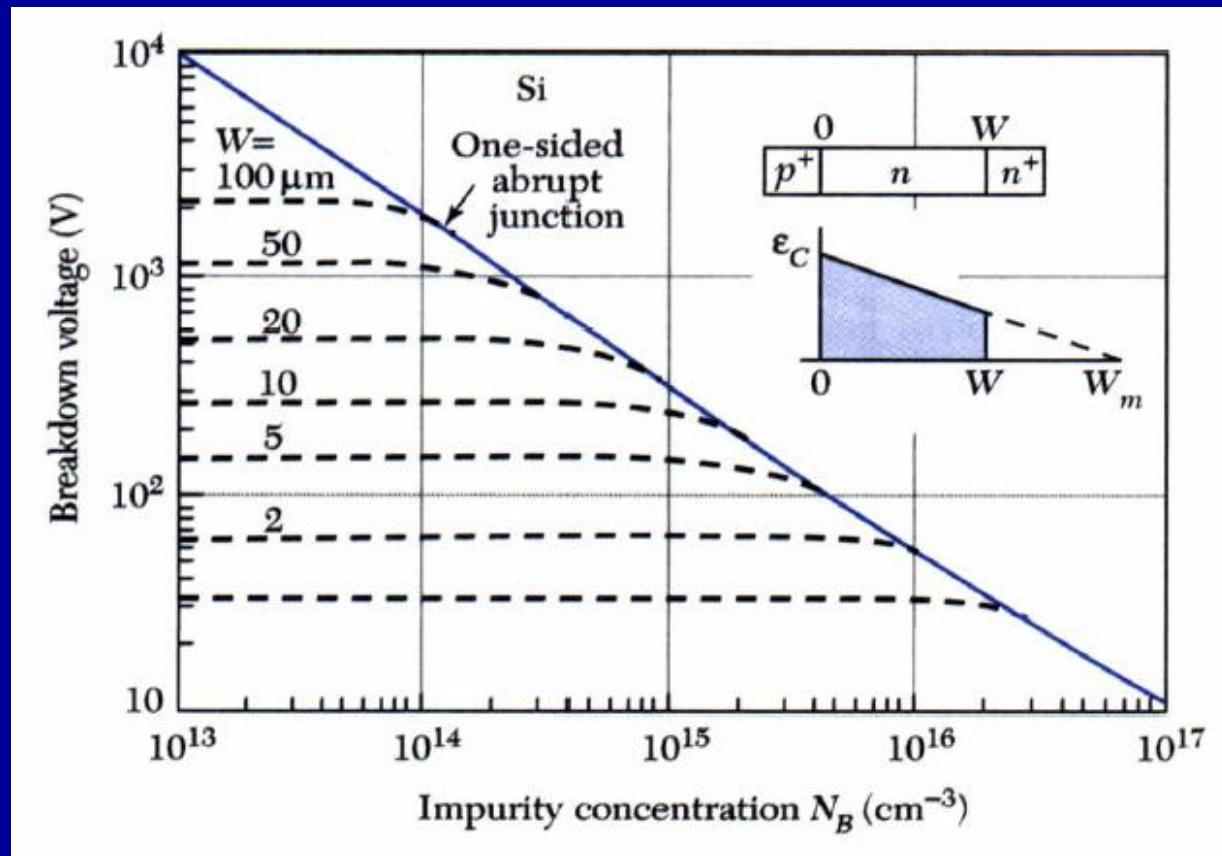


Si, GaAs单边突变结击穿临界电场和衬底掺杂浓度的关系

结击穿



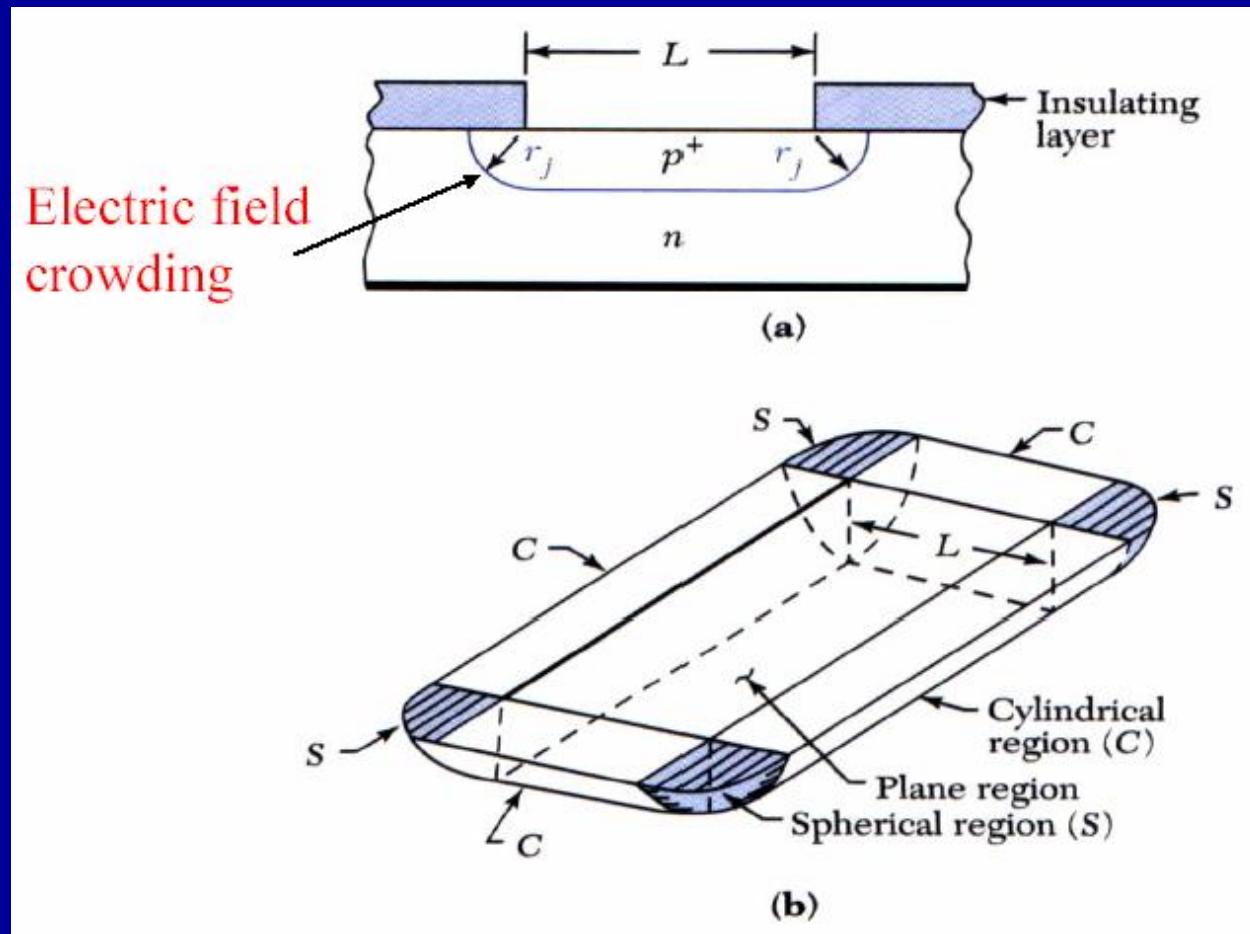
结击穿



$p^+ - \pi - n^+$ 或 $p^+ - \nu - n^+$ 结击穿电压与低掺杂浓度区厚度的关系
 π : p型轻掺杂

ν : n型轻掺杂

结击穿



- (a) 扩散掩膜的边缘结形成弯曲
- (b) 通过矩形掩膜扩散形成柱面区和球面区

§ 2.6 异质结与高低结

1. 高低结

- 发生在同一材料两个具有相同导电类型的半导体接触之间的结，由于结中一侧掺杂浓度很高，另一侧掺杂较低，所以称为高低结， N^+N 或 P^+P 。
- 高低结对任何方向的电流都不呈高阻，基本上也没有少子注入效应，具有欧姆接触的性质，对不希望有注入效应的情况非常有用，实际很多器件利用这种结完成欧姆接触。

以N⁺N为例分析：

- 处于平衡状态时，界面处要形成势垒，但 N+N 结与pn结不同的地方在于势垒高度qVD比较低，主要取决于轻掺杂N区的费米能级位置。因为N+N结势垒较低且不处于耗尽状态，所以结处没有高阻区。外加电压不像pn结那样主要发生在势垒区，而是主要降落在N区。
- 正偏时，N+区中电子向N区运动，N区中空穴向N+区运动，由于N+区电子浓度很高，N区的空穴浓度很低，因此正向电流主要是电子电流。
- 反偏时，N+区中空穴向N区运动，N区中电子向N+区运动，由于N+区空穴浓度很低，N区的电子浓度较高，因此反向电流主要是电子电流。

2. 异质结

- 两种不同质的材料构成的接触称为异质结。
- 制作方法：气相外延，液相外延，真空蒸发法，阴极溅射，分子束外延等
- 按组分转变情况分突变异质结和缓变异质结。
- 按构成异质结的材料分为同型异质结和异型异质结。
- 二十世纪五十年代开始提出异质结的设想，目前已经制成高效率的异质结光电池和发光管，双异质结的半导体激光器，超晶格结构等。

禁带宽度不同的两种单晶材料一起构成的晶体界面成为异质结，例如 $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{InP}/\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}\text{P}_y$ 异质结。

若异质结两边材料的导电类型相同，则成为同型异质结，如 $n\text{- GaAs}/N\text{- Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $p\text{- GaAs}/p\text{- Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。

若两种材料的导电类型不同，则为异型异质结，如 $n\text{- GaAs}/P\text{- Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ 。

在这些表达中，我们通常以小写的 n , p 表示窄带隙材料，以大写的 N , P 表示宽带隙材料。

• 半导体异质结的能带结构

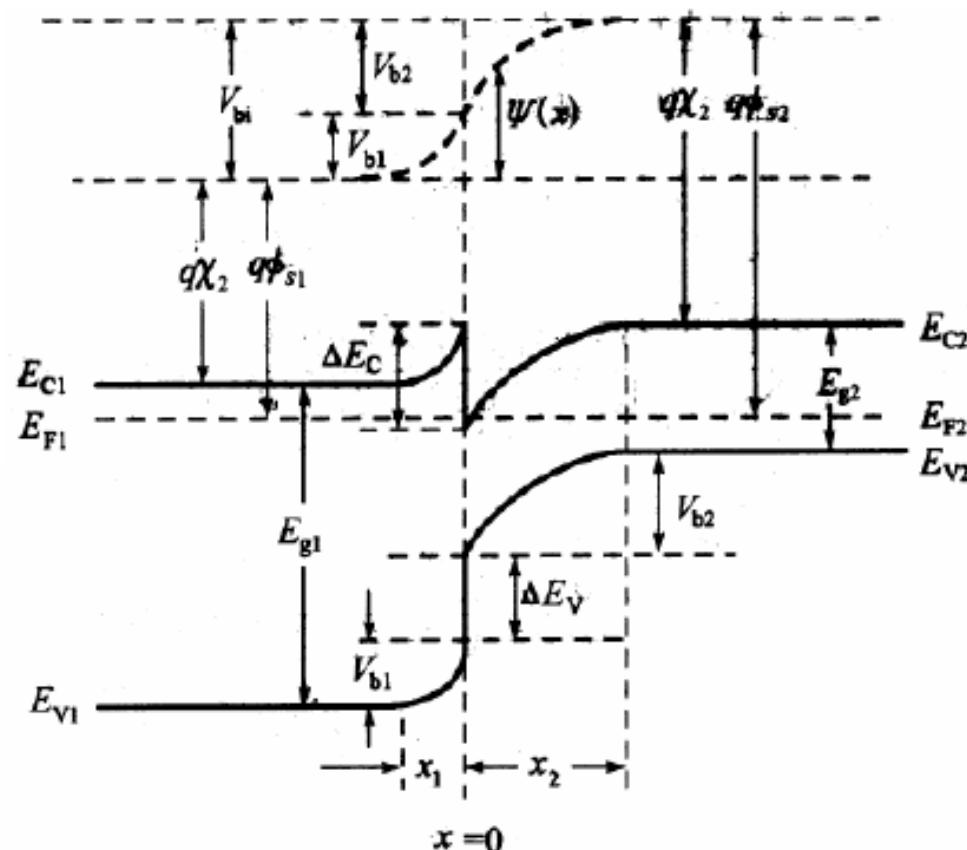
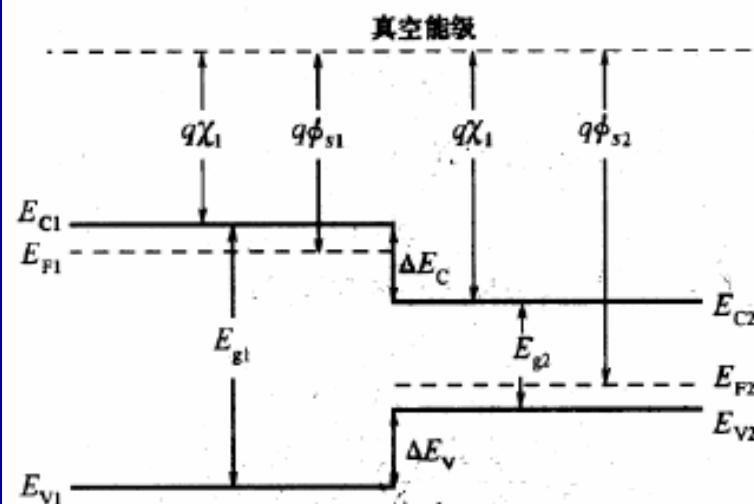
异质结的能带结构与构成异质结材料的禁带宽度、禁带失调有关。设构成异质结材料的禁带宽度分别为 $Eg1>Eg2$ 。

• 禁带的失调可能有三种情形：

- 1) $Eg2$ 包含在 $Eg1$ 之间，如**Ga_{1-x}Al_xAs**与**GaAs**；
- 2) $Eg1$ 与 $Eg2$ 禁带相互错开，如**Ga_{1-x}In_xAs**（下）和**GaAs_{1-x}Sb_x**（上）；
- 3) 二者没有共能量，如**InAs**（下）与**GaSb**（上）

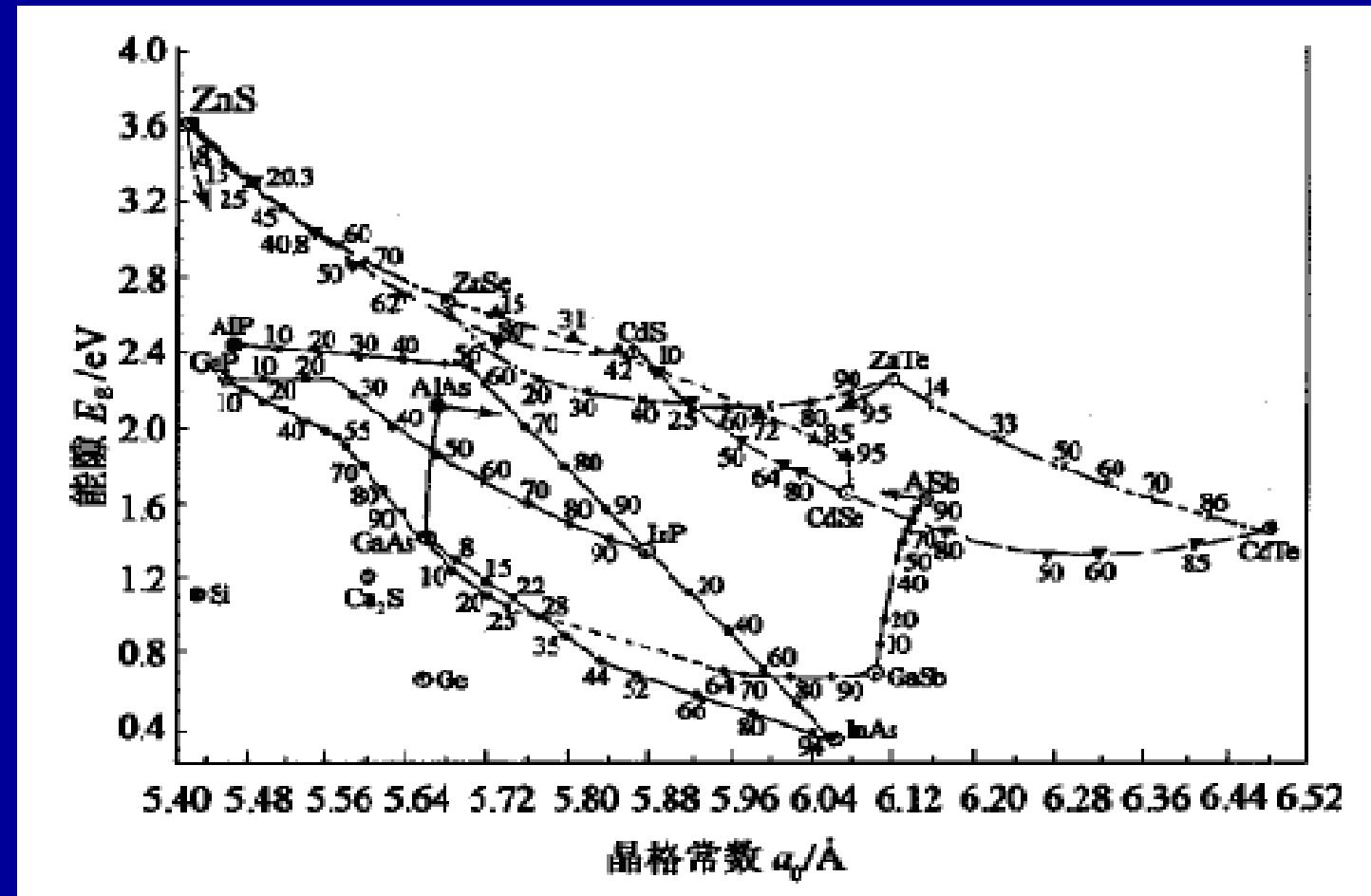
正确画出异质结的能带结构，需要给出禁带宽度差、导带或价带差，才能获得。这些值的取得，需要利用能带计算和实验的对比，才能获得。

可以假定：导带的失调由材料的亲和势或功函数的差决定，由此，在获得禁带宽度差的条件下，即可获得正确的能带结构。



为了解释N—P Ge—GaAs异质结的实验现象，Anderson在1962年提出一个异质结的理论模型。

- 安德森模型假定两种材料具有完全相同的晶体结构、晶格常数和热膨胀系数，这样可以把由这些差别而产生的悬键和界面态的影响忽略不计，凡晶格失配小于1%的异质结都成立。



$$\text{晶格失配} = \frac{\Delta a}{\bar{a}} = \frac{2|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2}$$

Principle of Semiconductor Devices

$$\varepsilon_1 E_1 = \varepsilon_2 E_2$$

$$x_1 = \left[\frac{2N_{A2}\varepsilon_1\varepsilon_2(V_{bi} - V)}{qN_{D1}(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})} \right]^{1/2}$$

$$x_2 = \left[\frac{2N_{D1}\varepsilon_1\varepsilon_2(V_{bi} - V)}{qN_{A2}(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})} \right]^{1/2}$$

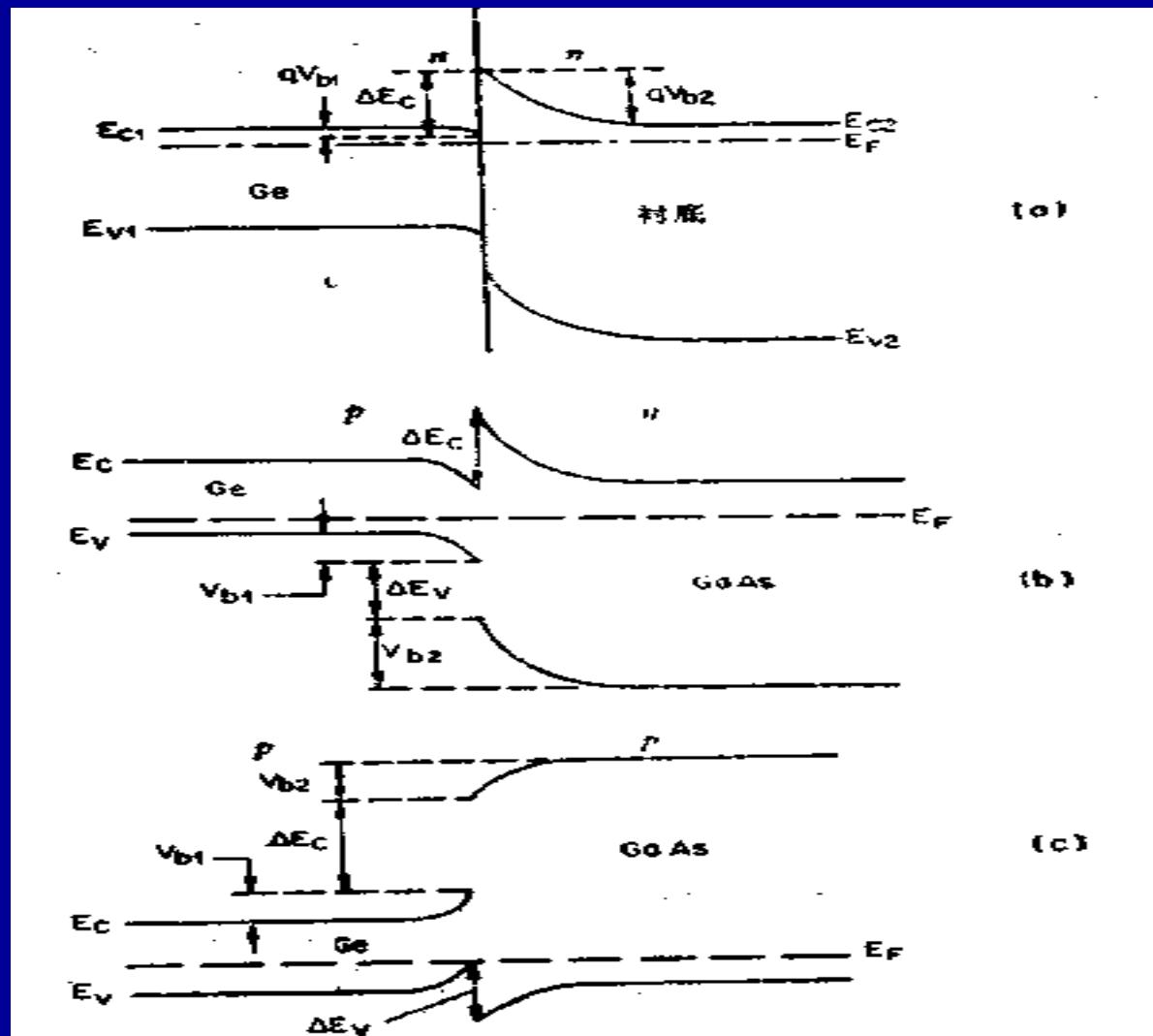
$$C = \left[\frac{qN_{D1}N_{A2}\varepsilon_1\varepsilon_2}{2(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})(V_{bi} - V)} \right]^{1/2}$$

$$x_m = x_2 + x_1 = \left[\frac{2\varepsilon_1\varepsilon_2V_D(N_{A2} + N_{D1})^2}{qN_{D1}N_{A2}(\varepsilon_1N_{D1} + \varepsilon_2N_{A2})} \right]^{\frac{1}{2}}$$

异质结的输运电流

$$I = A e^{-\frac{qV_{D2}}{kT}} [e^{\frac{qV_2}{kT}} - e^{-\frac{qV_1}{kT}}]$$

$$J = J_0 \left(1 - \frac{V}{V_{bi}} \right) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$
$$J_0 \equiv \frac{qA^*TV_{bi}}{k} \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{kT}\right)$$



- 异质结的较为重要的电流模型分为五种：
 - ①安德森模型 即热发射电流模型。
 - ②简单隧道模型 Rediker于1964年提出，在考虑热发射电流机构的同时，计入了尖峰势垒的隧道效应
 - ③隧道电流模型 伴随有界面复合作用在内的隧道复合过程。
 - ④界面态复合模型 Van Ruyven 1965年提出，考虑两种材料在界面态进行复合。
 - ⑤复合—隧道模型 隧道电流和热发射电流，且二者在界面态上汇合的复合隧道模型。
- 实际上，异质结往往同时存在多种电流机构，哪种机构为主将取决于界面上的能带不连续性和界面态参数情况。
- 主要用途：高效率的光电池、发光管和激光器等。

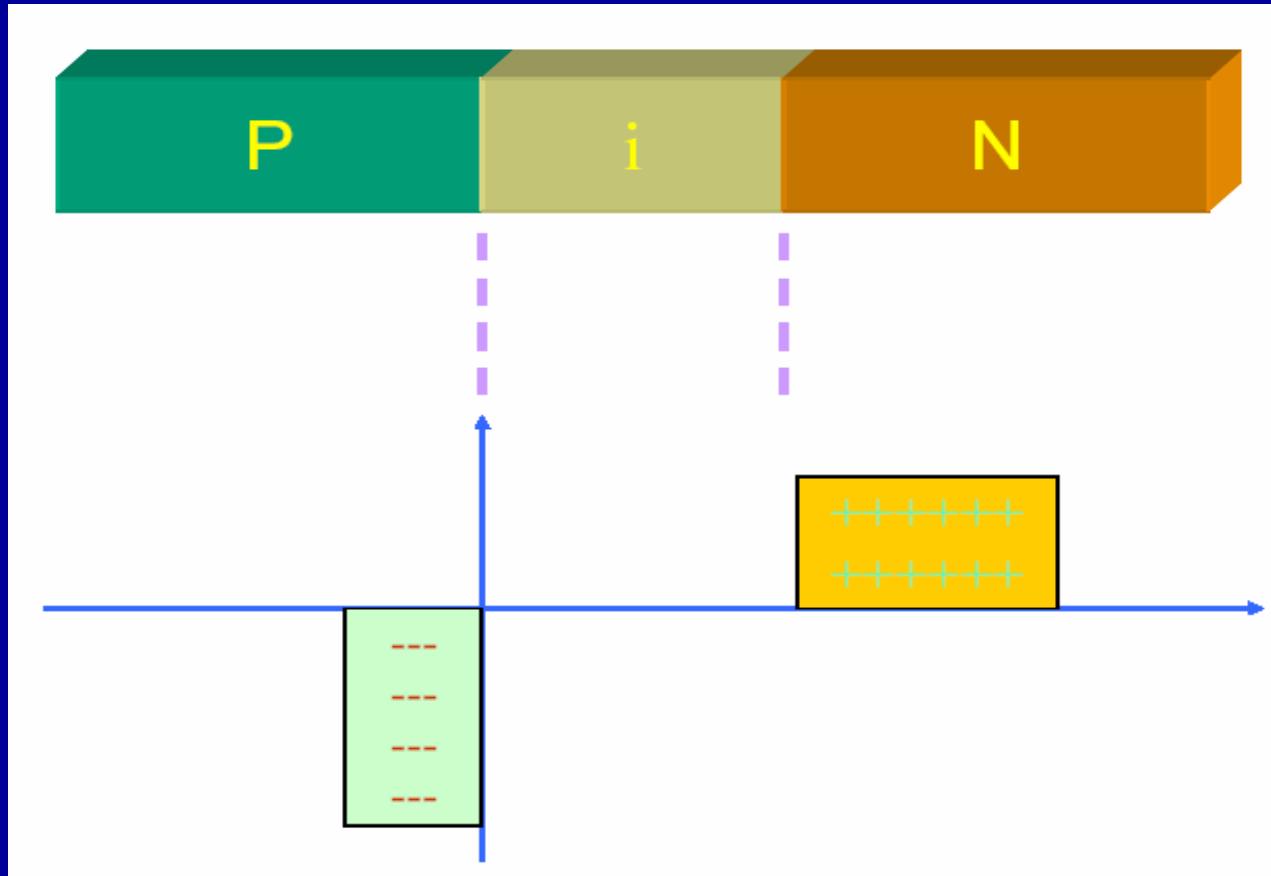
异质结的应用

- 异质结的主要应用之一是形成量子阱。它由两个异质结背对背相接形成的。
- 异质结的主要应用之二是形成超晶格。它由异质结交替周期生长形成。超晶格是**Esaki**和**Tsu**在1969年提出的。
- **Esaki**等提出的超晶格有两类：1) 同质调制掺杂；2) 异质材料交替生长。
- 超晶格或多量子阱间的共振隧穿效应

§ 2.7 几种典型二极管的应用

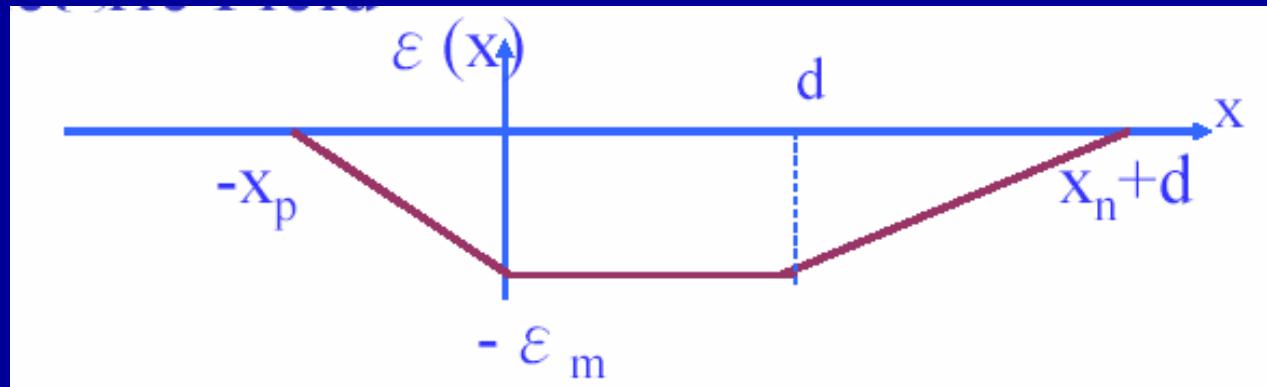
- (1) 开关整流二极管 (**pn**结整流效应)
- (2) 稳压二极管 (**pn**结击穿效应)
- (3) 变容二极管 (**pn**结微分电容效应)
- (4) **PIN**二极管 (**pn**结耗尽特性)
- (5) 隧道二极管 (**pn**结隧道效应)
- (6) 发光二极管 (**pn**结注入发光)
- (7) 激光二极管 (**pn**结正向注入)
- (8) 光电二极管 (光伏型光电探测器)
- (9) 碰撞电离雪崩渡越时间二极管碰撞
(**pn**结电离雪崩倍增效应)

(4) PIN二极管



PIN二极管

电场分布：



$$-\frac{d^2\Psi_i}{dx^2} = \frac{qN_d}{\epsilon_{si}} \quad d < x < x_n$$

$$-\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = 0 \quad 0 < x < d$$

$$-\frac{d^2\psi_i}{dx^2} = -\frac{qN_a}{\epsilon_{si}} \quad -x_p < x < 0$$

PIN二极管

电场和电势表达式：

$$\xi_m = \frac{qN_a x_p}{\epsilon_{si}} = \frac{qN_d (x_n - d)}{\epsilon_{si}}$$

$$\Psi_m = \frac{\xi_m (W_d + d)}{2}$$

对于同样的工作电压, p-i-n二极管可以减小耗尽区的最大电场强度。

(5) 隧道二极管

- ★ 隧道效应—能量低于势垒的粒子有一定的几率穿越势垒. 这是一种量子力学效应
- 隧穿几率与势垒的高度有关, 与势垒的厚度有关.
- 隧道二极管—利用量子隧穿现象的器件效应

- 隧道二极管— p-n结, 两边都是重掺杂(简并情况), 以至在p区, E_F 进入价带; 在n区, E_F 进入导带.
- 结果:
 - ① n区的导带底部与p区的价带顶部在能量上发生交叠
 - ② 势垒十分薄
- 电子可以隧道贯穿势垒区.

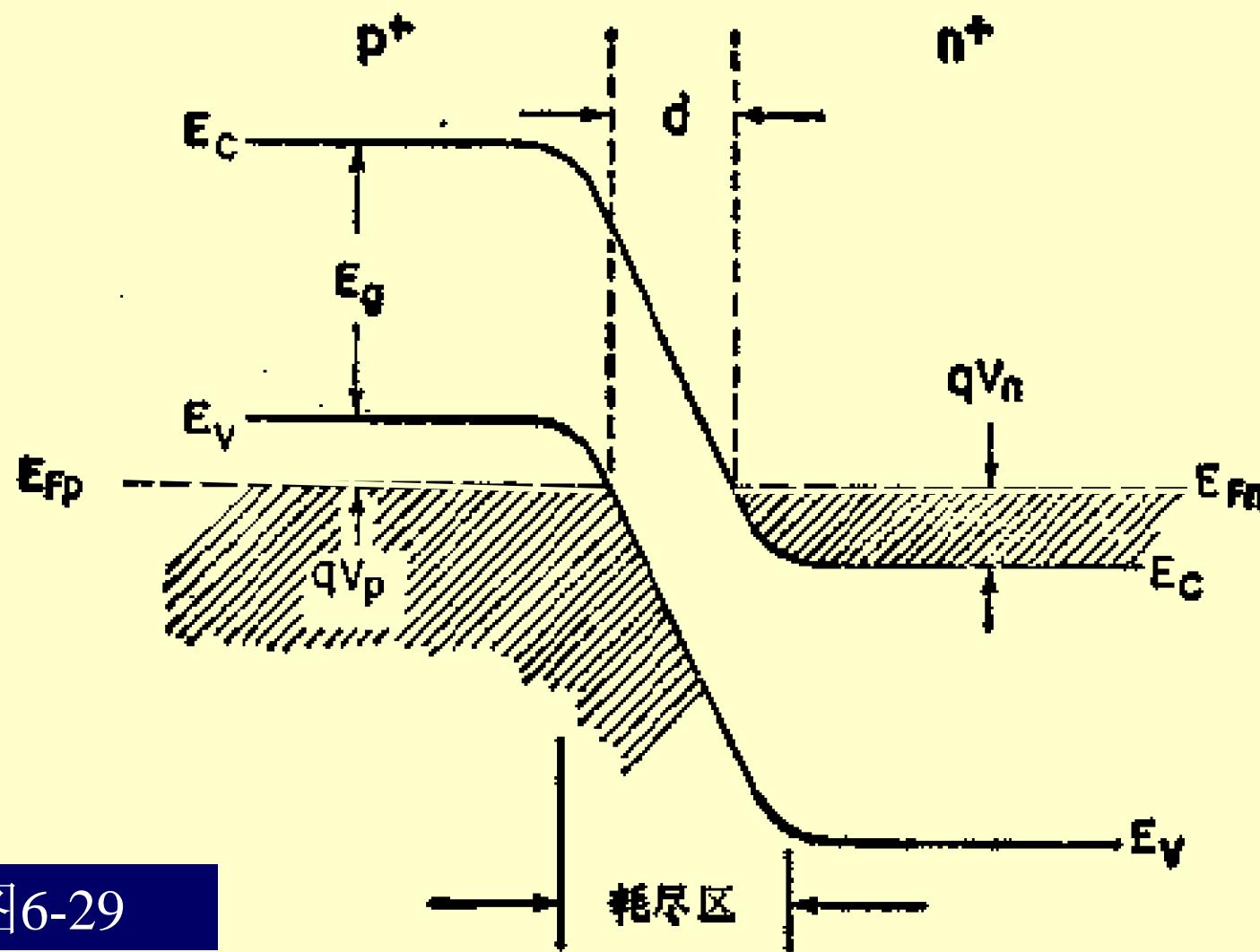
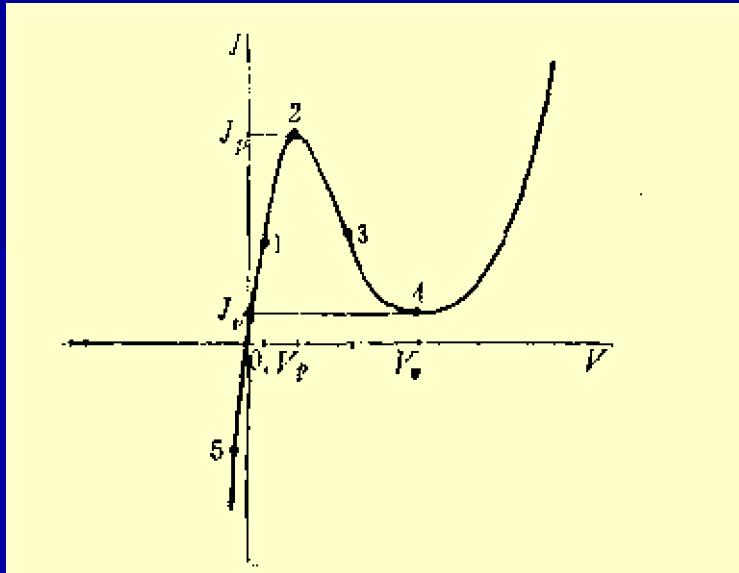
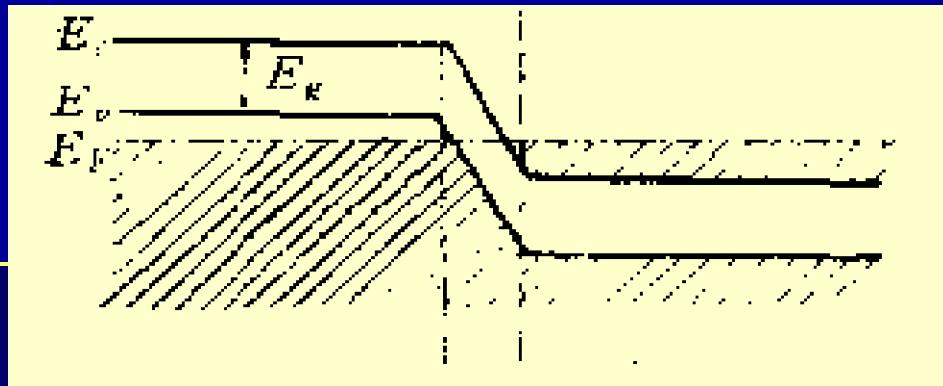


图6-29

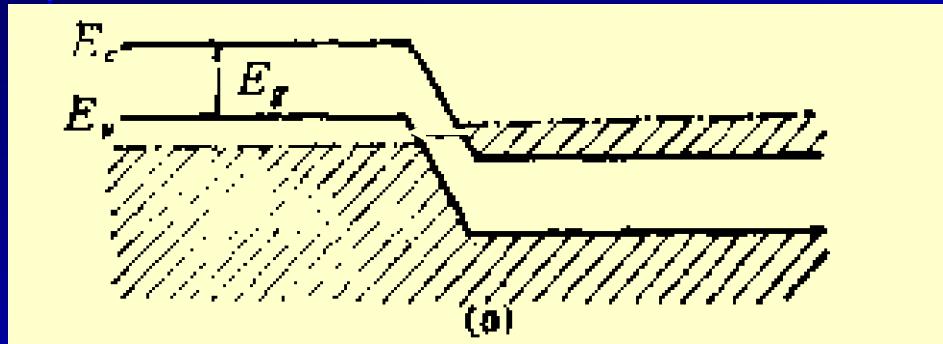
★ 隧道结的I-V特性



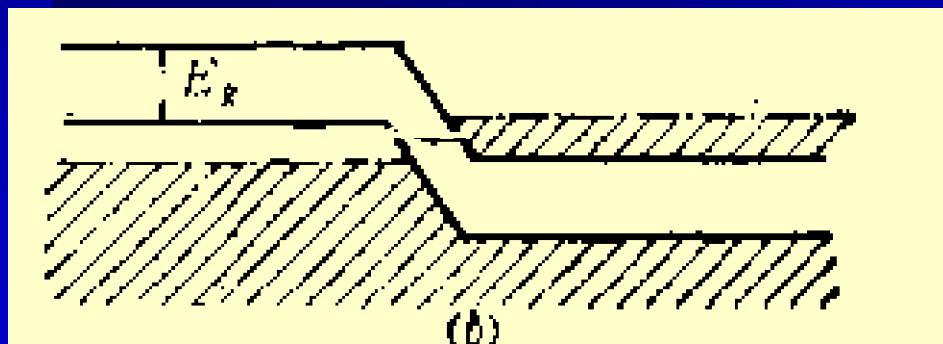
- 正向电流一开始就随正向电压的增加而迅速上升,达到一个极大,(峰值电流 I_p ,峰值电压 V_p)
- 随后,电压增加,电流反而减少,达到一个极小,(谷值电流 I_v ,谷值电压 V_v)
在 V_p 到 V_v 的电压范围内,出现负阻特性.
- 当电压大于谷值电压后,电流又随电压而上升



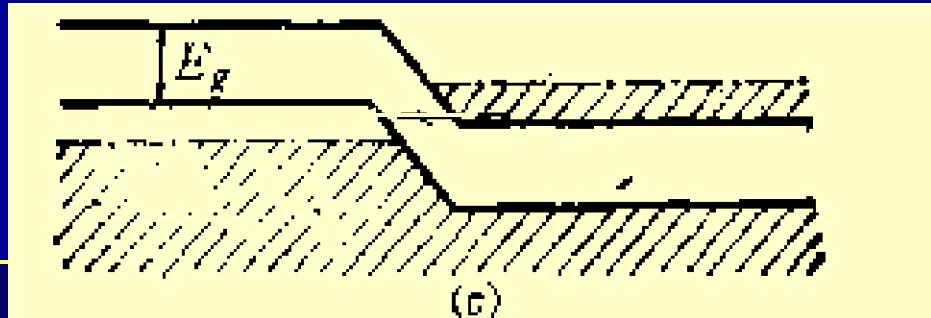
0点—平衡pn结



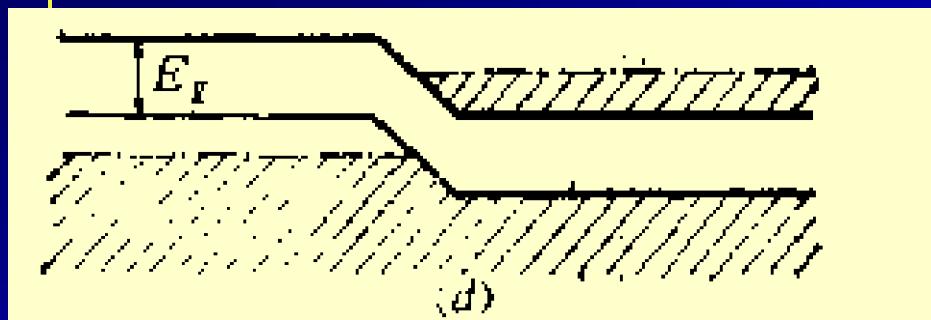
1点—正向电流迅速上升



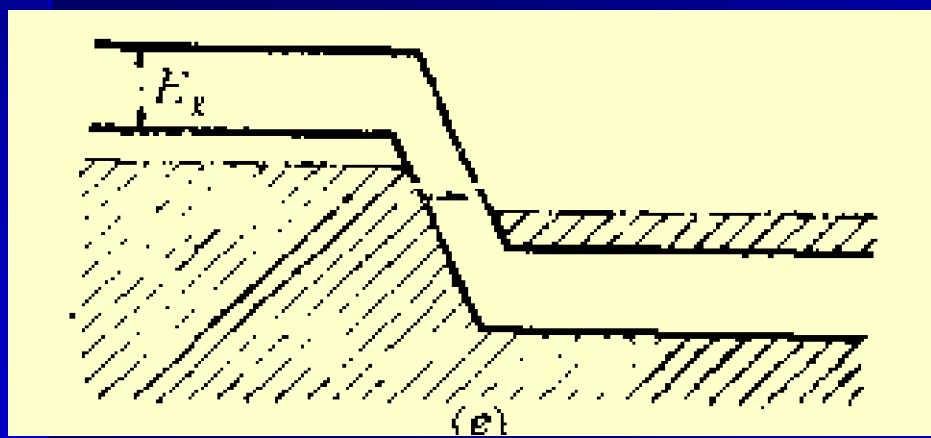
2点—电流达到峰值



3点—隧道电流
减少,出现负阻



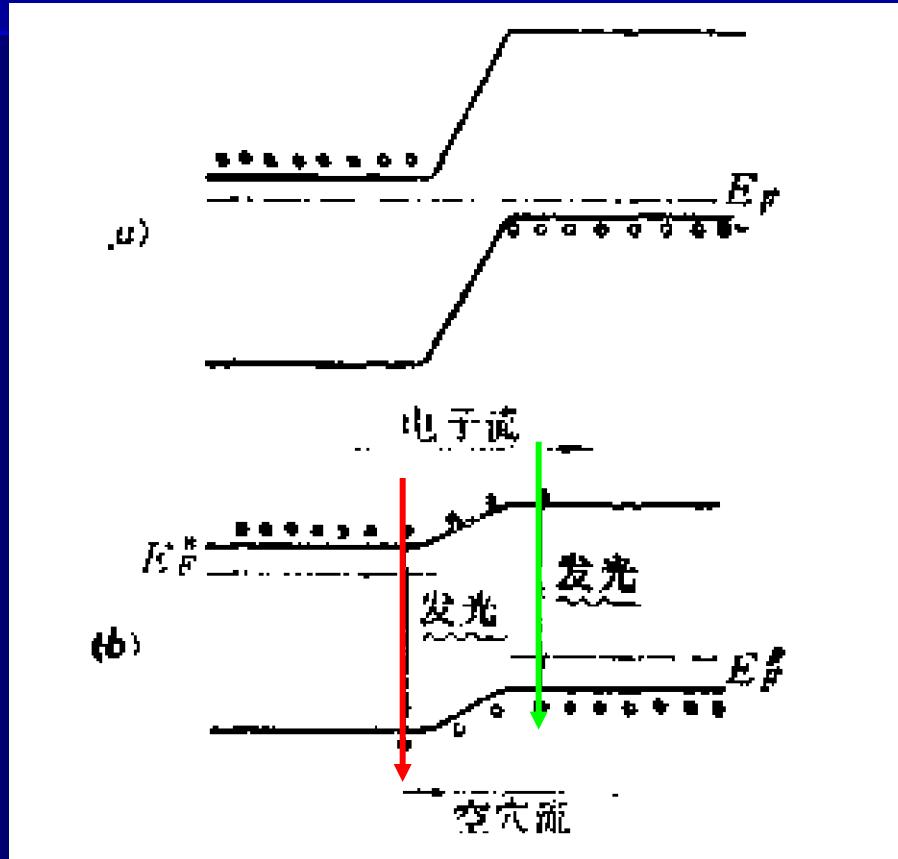
4点--隧道电流
等于0



5点—反向电流
随反向电压的
增加而迅速增
加

(6) 发光二极管 (pn结电致发光)

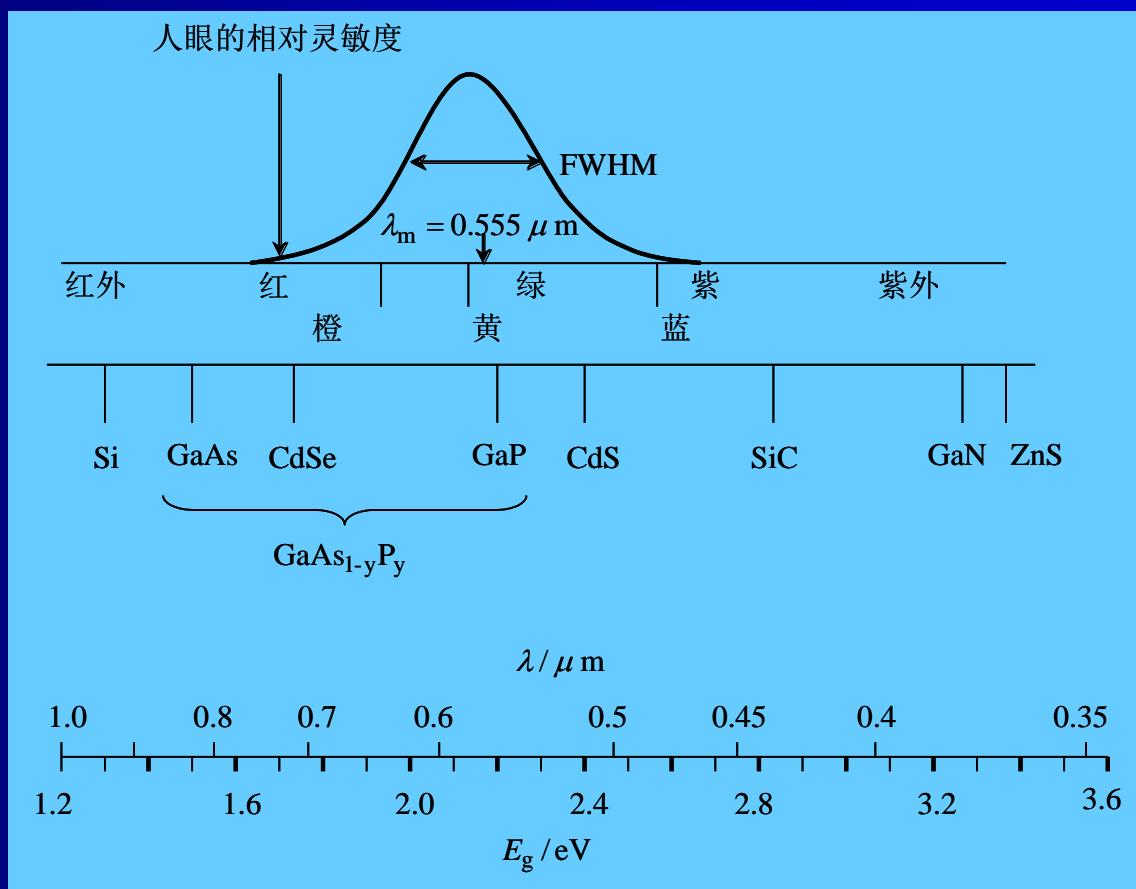
- **发光二极管(LED)**是一种**p-n**结，加正向偏压时，系统处于非平衡态--注入非平衡载流子，这些非平衡载流子因复合而产生光辐射。它能在紫外光、可见光或红外光区域辐射自发辐射光。可见光**LED**被大量用于各种电子仪器设备与使用者之间的信息传送。而红外光**LED**则应用于光隔离及光纤通讯方面。



Principle of Semiconductor Devices

可见光发光二极管

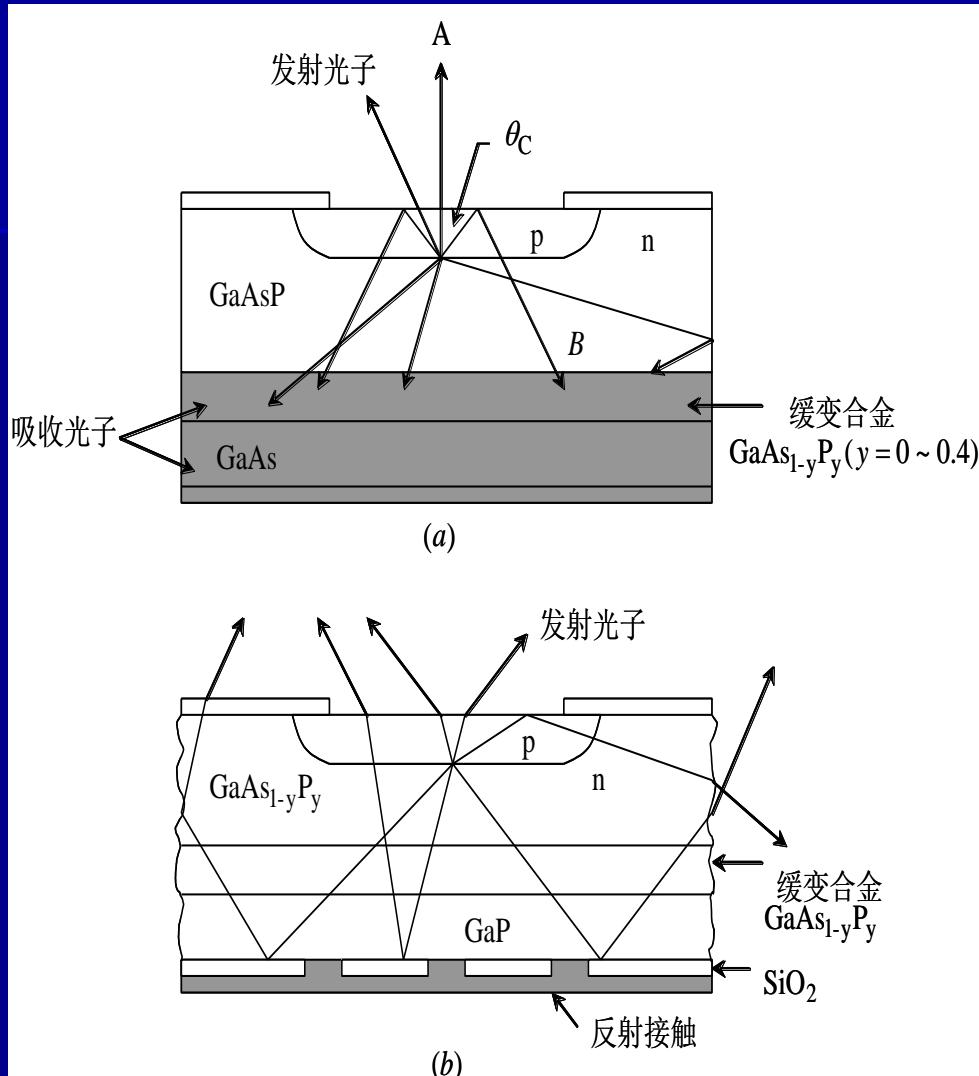
由于人眼只对光子能量 $h\nu$ 等于或大于 $1.8\text{eV}(\lambda \leqslant 0.7\mu\text{m})$ 的光线感光，因此所选择的半导体，其禁带宽度必须大于此极限值。右图标示了几种半导体的禁带宽度值。



平面二极管架构的可见光LED的基本结构图。

其中图(a)的截面图是以砷化镓为衬底制造的发红光的直接禁带LED。

图(b)则是以磷化镓为衬底制造的发橙、黄或绿光的间接带隙LED,用外延方法生长的缓变型 $\text{GaAs}_{1-y}\text{P}_y$ 合金层用来使界面间因晶格不匹配所导致的非辐射性中心减至最小。

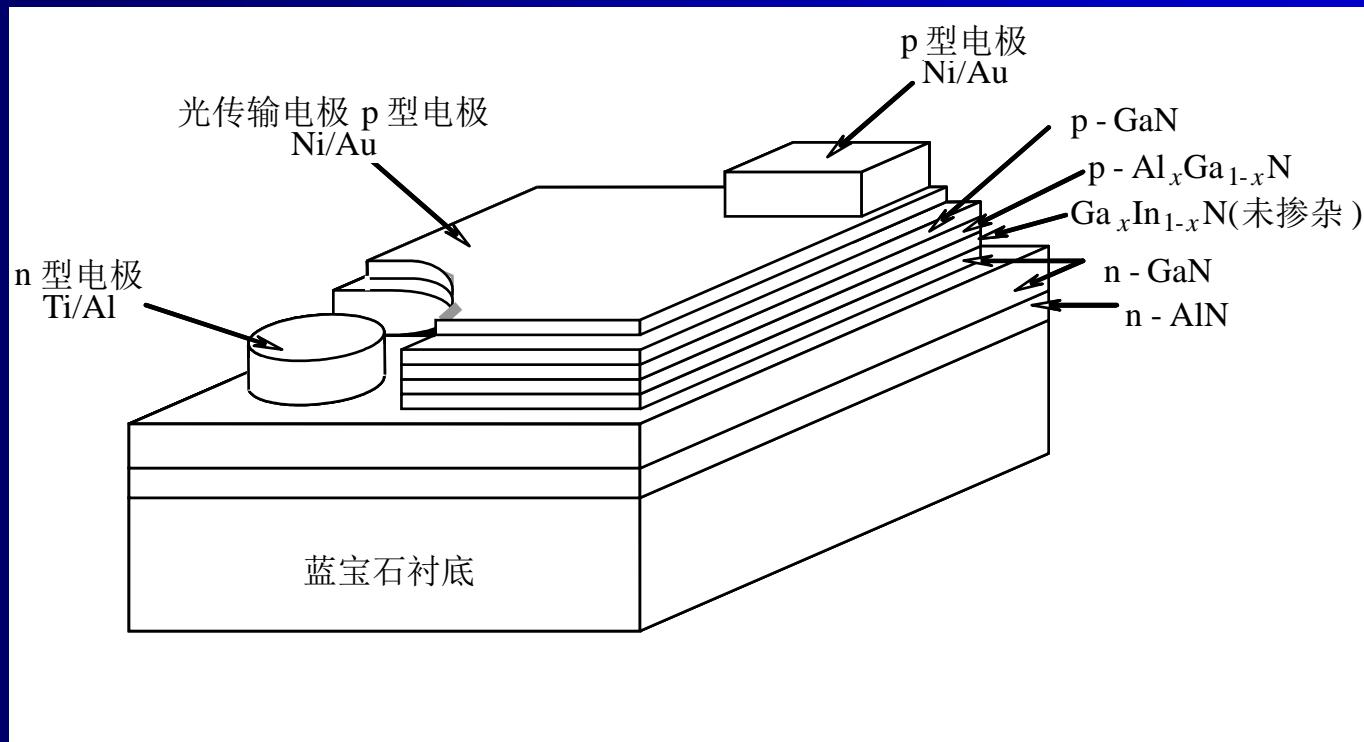


至于高亮度的蓝光LED(0.455ym-0.492Pm)方面，已经被研究的材料有：II-VI族化合物的硒化锌(ZnSe)，III-V族氮化物半导体的氮化镓(GaN)、IV-IV族化合物的碳化硅(SiC). 然而，II-VI的寿命太短，以致至今尚不能商品化；碳化硅也因其为间接禁带，致使其发出的蓝光亮度太低，也不具吸引力。

目前最有希望的材料是氮化镓($E_g=3.44\text{eV}$)和相关的III-V族氮化物半导体，如AlGaInN，其直接禁带范围由 1.95eV 至 6.2eV 。

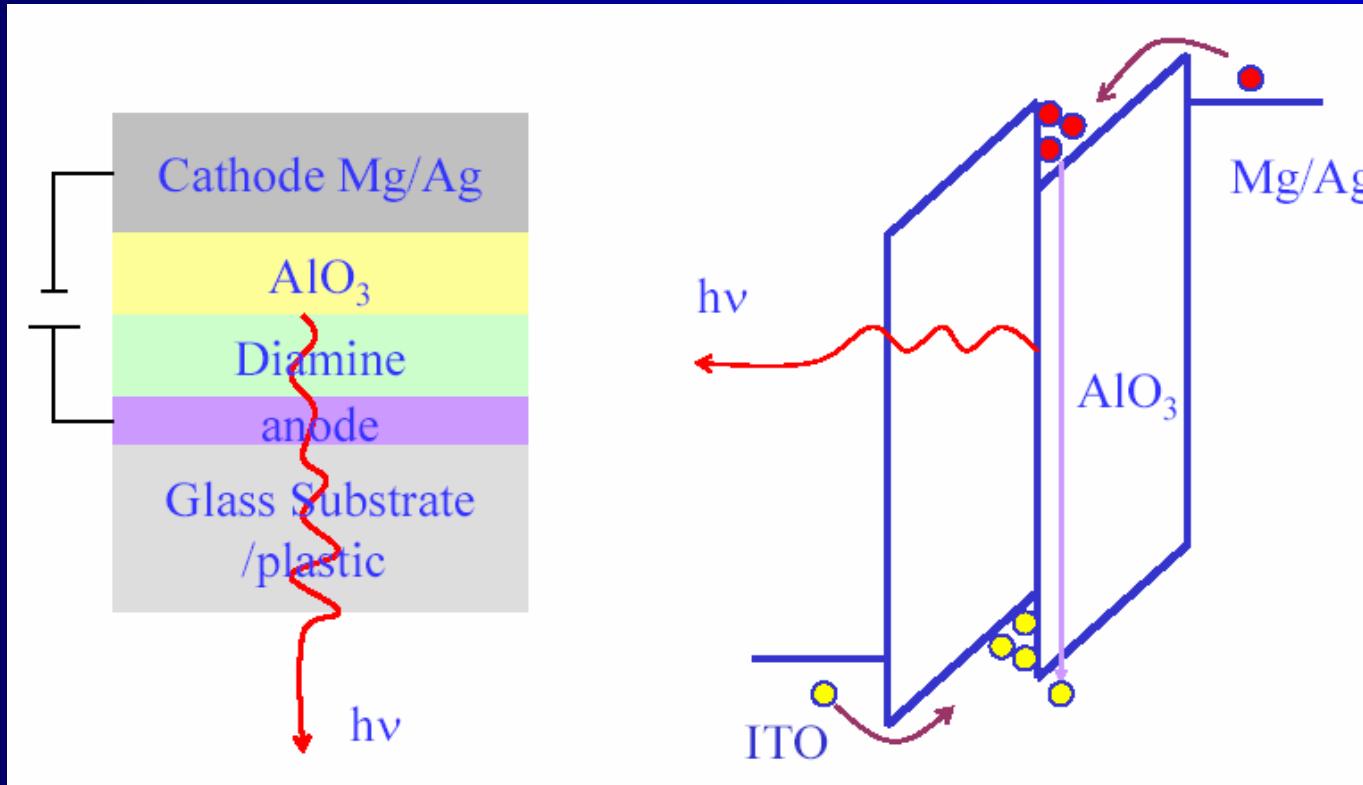
虽然没有晶格相匹配的衬底可供GaN生长，但是低温生长的AlN做缓冲层，即可在蓝宝石(Al_2O_3)上生长高品质的GaN。因为蓝宝石衬底是绝缘体，所以p型与n型的欧姆接触都必须形成在上表面。蓝光产生于 $\text{GaxIn}_{1-x}\text{N}$ 区域的辐射性复合作用，而 $\text{GaxIn}_{1-x}\text{N}$ 如三明治般被夹于两个较大禁带宽度的半导体之间：一个是p型的 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 层，一个是n型的GaN层。

生长在蓝宝石衬底上的III-V族氮化物LED



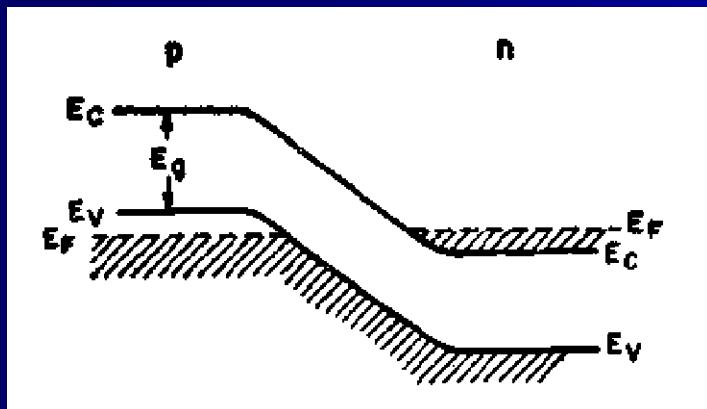
有机发光二极管

Organic Light-Emitting Diode

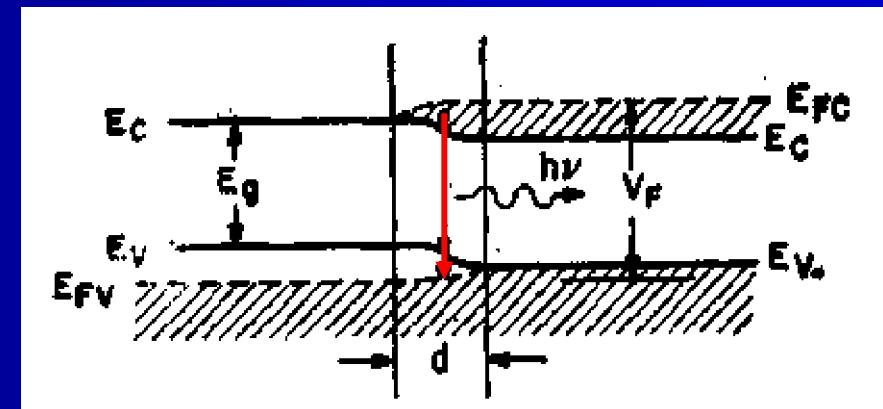


(7) 激光二极管 (pn结正向注入)

两边都为重掺杂的pn结。在正向偏压下，在结面附近，可实现($E_{fn} - E_{fp}$)>Eg，使这区域成为分布反转区--利用pn结正向注入实现粒子数的分布反转。



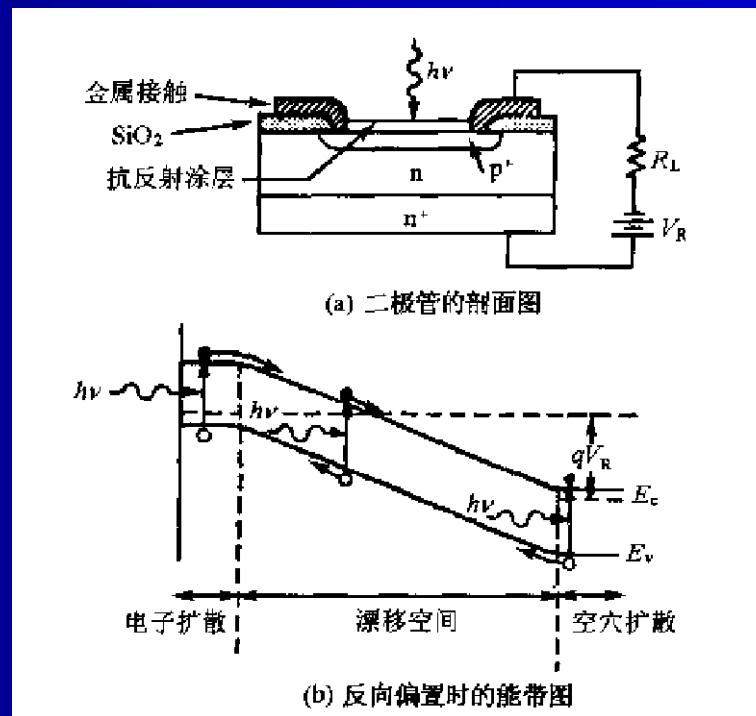
$$V_D > E_g$$



分布反转区
 $eV \geq E_g$

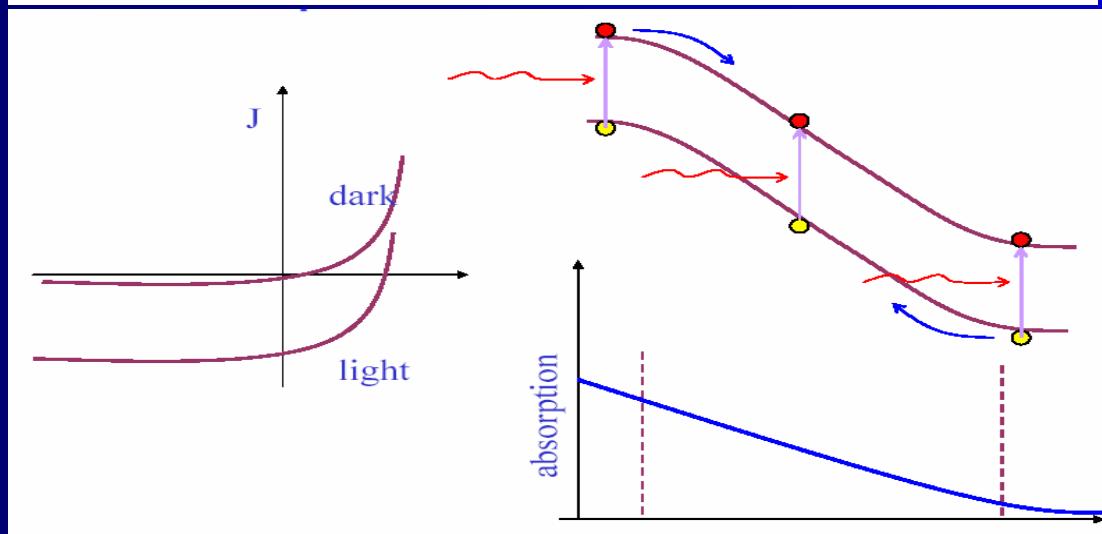
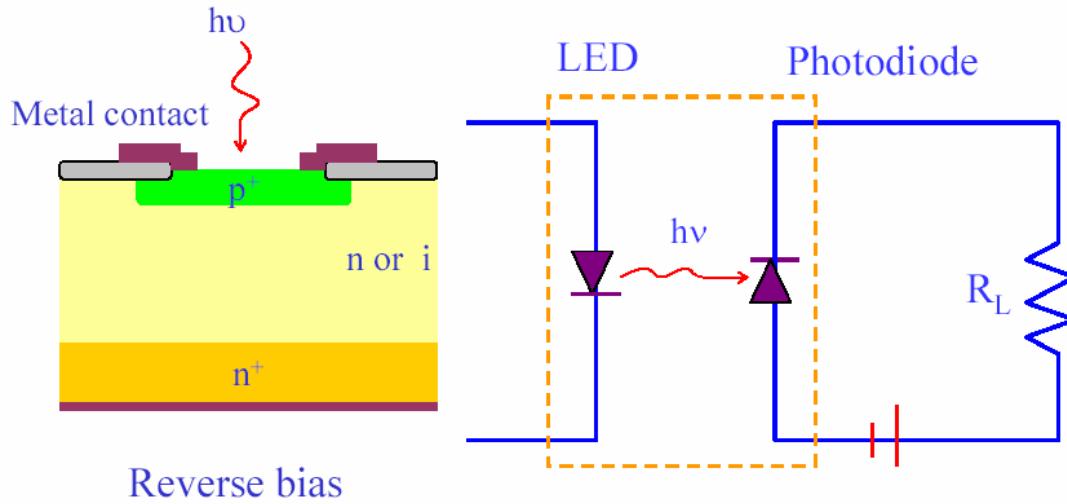
(8) 光电二极管（光伏型光电探测器）

与光电池一样，都是利用了p-n结的光生伏特效应。通常，工作时加反向偏压--将光信号转变成电信号。



光电探测二极管 Photodiode

- Opto-isolator



Principle of Semiconductor Devices

(9) 碰撞电离雪崩渡越时间二极管IMPACT

- (1) 碰撞电离雪崩倍增效应
- (2) 微波固态功率特性，毫米波段
- (3) 里德(Read)二极管