

PN 结电容 (Capacitance of p-n Junctions)

PN 结直流伏安特性表明:

- 1 具有单向导电性
- 2 具有可变电阻性

PN 结的交流特性表明:

PN 结还具有可变电容的性质

在高频运用时, 电容效应更为显著

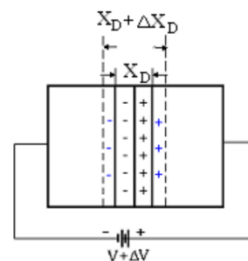
PN 结包括势垒电容和扩散电容两部分

(1) 势垒电容 C_T (结电容)

(1) 势垒电容 C_T

$$\Delta V \rightarrow \Delta X_D \rightarrow \Delta Q$$

由于势垒区电荷的变化
表现出来的电容效应—**势垒电容**



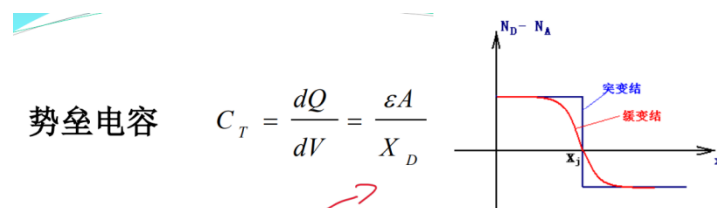
也称结电容 (Junction capacitance)

$$C_T = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon A}{X_D}$$

加反向偏压 $X_D \uparrow$ $C_T \downarrow$
降低反向偏压 $X_D \downarrow$ $C_T \uparrow$

加了反向电压, 会导致空间电荷区扩大, 这样就会相对于原来的 X_D 的电荷量, 会增大 dQ , 其也可以表现在空间电荷区的宽度 dx 增大上, (C_T 减小)

降低反向电压, 会导致 dx 减少, 也就是 C_T 会增大



势垒电容 $C_T = \frac{dQ}{dV} = \frac{\epsilon A}{X_D}$

对于突变结 $X_D = \left[(V_D - V) \frac{2 \epsilon_r \epsilon_0}{q} \times \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right]^{1/2}$

对于线性缓变结 $X_D = \left[\frac{12 \epsilon_r \epsilon_0 (V_D - V)}{q \alpha_j} \right]^{1/3}$

这是从前面计算得出的 X_D , 代入到 C_T 表达式中

N_A, N_D 影响: 提供相同电量 X_0 要更小

对于突变结

$$C_T = A \left[\frac{\epsilon q}{2} \times \frac{1}{V_D - V} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

影响 X_0

* 耗尽层近似条件成立

正偏下: { 小偏压下, 与 V 有关
大偏压下, C 很大 (空间电荷很小, 耗尽层很薄)

$$C_T = 4C_T(0) = 4A \left[\frac{\epsilon q}{2} \times \frac{1}{V_D} \times \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \right]^{1/2}$$

不加电压时

经验公式

这里的 V 是通用的 V , 所以反向电压是负的, 所以这里的 V 是负的; 反向电压增大, 也就是说 $V_D - V$ 会增大, $1/(V_D - V)$ 会减小, 也就是说势垒电容会减小。与 X_D 的方法分析一致

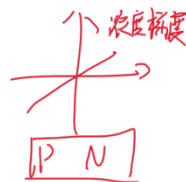
对于线性缓变结

$$\therefore C_T = A \left[\frac{q \alpha \epsilon^2}{12 (V_D - V)} \right]^{1/3}$$

杂质浓度梯度

其中:

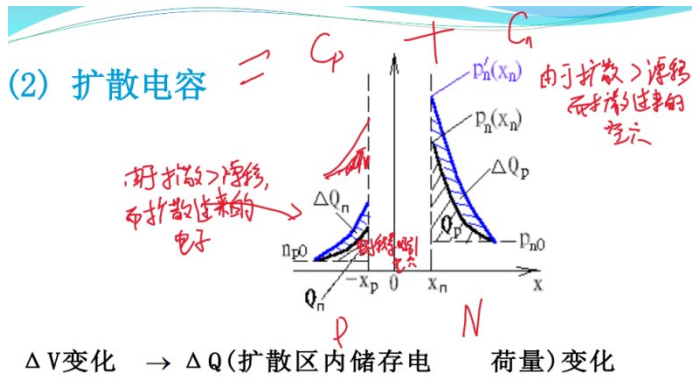
α_j - 杂质浓度梯度



梯度大
梯度小

即浓度大, 提供相同电量, X_0 更小, 即 C_T 会增大

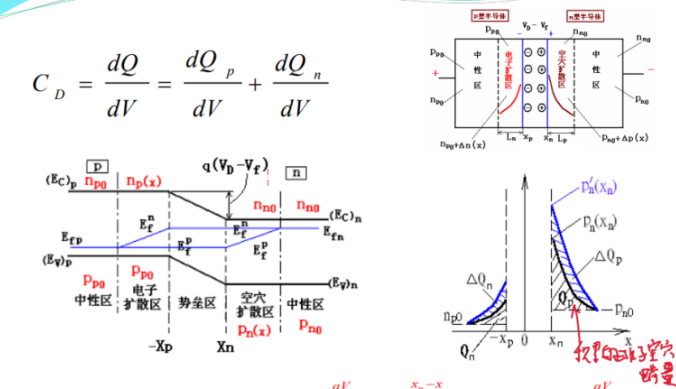
(2) 扩散电容 (电荷存储电容) (charge storage capacitance)



——扩散电容

也称电荷存储电容
(charge storage capacitance)

首先呢, 要明确这是在正向偏置电压的条件下, 也就是说他的扩散区是 Δ 的
其次, 要明确非子是由电场激发而来的 (由于电中性要吸引互补载流子), 这里形成的电荷变化时由非子吸引过来的空穴或电子的电荷量变化, 从而形成的电容



$$C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_p}{dV} + \frac{dQ_n}{dV}$$

电荷量: $\Delta p(x) = (n_p)_0 e^{-\frac{x}{L_p}}$
扩散区 x_n $\Delta p(x) = (n_p)_0 e^{-\frac{x-x_n}{L_p}}$

扩散电容是由于非子变化, 引起互补的载流子变化, 从而产生的电容;

同理: $Q_n = \int_{x_n}^{+\infty} q \Delta n(x) dx = q L_n n_{p0} (e^{\frac{qV}{kT}} - 1)$

那么 $C_D = \frac{dQ}{dV} = \frac{dQ_p}{dV} + \frac{dQ_n}{dV}$

$$C_D = C_{Dp} + C_{Dn}$$

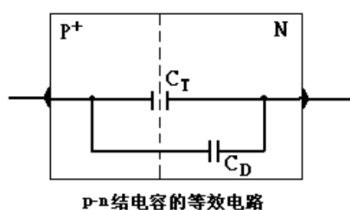
$$= \frac{A q^2}{kT} (L_p p_{n0} + L_n n_{p0}) e^{\frac{qV}{kT}}$$

显然, C_T 与 C_D 都与 p-n 结的面积 A 成正比, 且随外加电压而变化

PN 结总电容

(3) 总电容

p-n结的总电容为两者之和: $C_j = C_T + C_D$



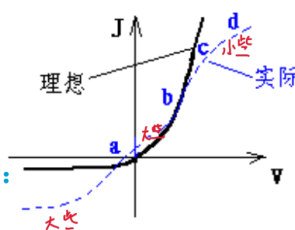
大正向偏置p-n结时, 以 C_D 为主, $C_j \approx C_D$
小正向偏置或反向偏置p-n结时, 以 C_T 为主,
 $C_j \approx C_T$

PN 结的异常特性:

p-n结的异常特性

1. p-n结I-V特性的非理想因素

影响p-n结伏-安特性的主要因素:



产生偏差的原因:

- (1) 正向小电压时忽略了势垒区的复合; 正向大电压时忽略了扩散区的漂移电流和体电阻上的压降
- (2) 在反向偏置时忽略了势垒区的产生电流

异常体现在: 小正向电压偏置时, 实际电流会比理想的大些 (忽略了势垒区的复合)
大正向电压偏置时, 实际电流会比理想的小些 (忽略了扩散区的压降和体电阻压降)
反向偏置时, 实际电流会比理想电流大些且不饱和 (忽略了势垒区的产生电流)

下面来讨论空间电荷区的复合电流 (正向的, 解释小正向的偏差问题)

发光二极管在扩散区的复合区域，因此N型的电流增大了

空间电荷区的复合电流（正向）

$$J = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{n_{n0} L_p} \right) e^{\frac{qV}{k_0 T}}$$

$$J_r = q \int_0^{x_D} U dx \approx \frac{qn_i X_D}{2\tau} e^{\frac{qV}{2k_0 T}}$$

$$U = \frac{N_i C (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i ch \left(\frac{E_i - E_i}{k_0 T} \right)} \xrightarrow{E_i = E_i} U_{\max} = \frac{N_i C (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i}$$

加宽了 J_r 的宽度
取 U_{\max} 的 J_r 最大

$$U_{\max} = \frac{N_i C (n^2 - n_i^2)}{2(n + n_i)} \xrightarrow{n = p} U_{\max} = \frac{N_i C n_i (e^{\frac{qV}{2k_0 T}} - 1)}{2}$$

可见 J_r

$$\left. \begin{array}{l} n = p \\ np = n_i^2 e^{\frac{qV}{k_0 T}} \end{array} \right\}$$

$$\eta = n_i e^{\frac{qV}{2k_0 T}}$$

$$J_{\text{总}} = J_{\text{扩散}} + J_r$$

$$\frac{J_{\text{总}}}{J_r} \propto e^{\frac{qV}{2k_0 T}} \left\{ \begin{array}{l} \downarrow J_r \text{ 显著} \\ \uparrow J_r \text{ 微小} \end{array} \right.$$

既然是复合，首先要从复合触发，即要计算复合率

为了方面体现复合电流，要先知道复合率的最大值

当 $n=p$ （最有效的复合中心，复合中心位于禁带中央）

还要解决一个问题：

就是为什么要加上复合电流？

首先来想，中部复合会导致流向扩散区的非子减少，非子减少就会加大扩散区的多子电流，从而提升总电流

空间电荷区产生电流（反向，解释反向偏置电压下电流增大且不饱和的原因）

① 不饱和
② 偏大

空间电荷区的产生电流（反向）

$$J_{RD} = qn_i^2 \left(\frac{D_p}{n_{n0} L_p} \right)$$

$$J_G = qGX_D \approx \frac{qn_i X_D}{2\tau}$$

$$U = \frac{N_i C (np - n_i^2)}{n + p + 2n_i ch \left(\frac{E_i - E_i}{k_0 T} \right)} \xrightarrow{E_i = E_i} U = -\frac{n_i}{2\tau}$$

最好复合中心
 $n_i \gg n, p$ 很小，很小，可忽略

$$G = \frac{n_i}{2\tau} \left\{ \begin{array}{l} U > 0 \text{ 复合率} \\ U < 0 \text{ 产生率} \end{array} \right. \quad \tau = \frac{1}{N_i C}$$

$E_g \uparrow \eta_i \downarrow$
 $\eta_i \downarrow$
 $n_i \downarrow$

1、禁带宽度大，产生电流比反向扩散电流大

2、产生电流随反向偏压增加而缓慢增加，不饱和（ X_D ）

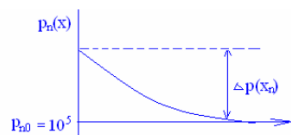
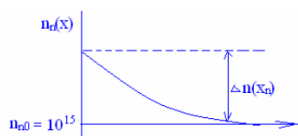
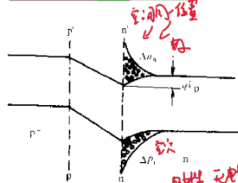
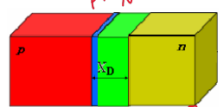
X_D 会增大

首先想，产生率是什么？如果复合率为负数，不就是指产生率了嘛

还是假设是最有效的复合中心，其中 $n_i \gg n, p$ （即使是在反向电压理想条件下， n 和 p 也是很很小很小）

大注入（正向，解决大正向偏置电压下的电流减小问题）

大注入（正向）



扩散区产生内建电场 扩散系数 $D \rightarrow 2D$

注入 p^+-n 结的 n 侧的空穴及其所造成的电子分布

削弱了空间电荷区的外加电场强度

以及耗尽区有压降

空穴扩散区中空穴从左往右扩散，但扩散之前吸引了相同分布的电子，空穴可以源源不断地补充，吸引过来的电子却不能，所以电子会从左往右扩散，这样就会在扩散区形成从左往右的内建电场，并且电场方向与外加电压方向一致。

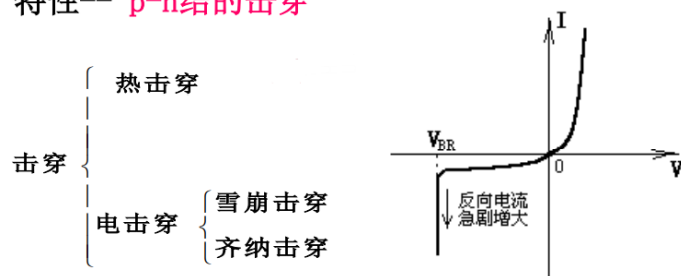
这样会削弱外加电场对空间电荷区的影响，所以电流会减小

同样，中性区会有体电阻的存在，也会削弱外加电场对空间电荷区的影响，电流会减小

PN 结的击穿：

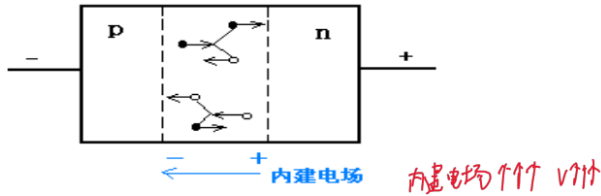
2. $p-n$ 结的击穿 (Breakdown)

在反向偏置下，当反向电压很大时， $p-n$ 结的反向电流突然增加，从而破坏了 $p-n$ 结的整流特性—— $p-n$ 结的击穿



(1) 雪崩击穿 (Avalanche breakdown)

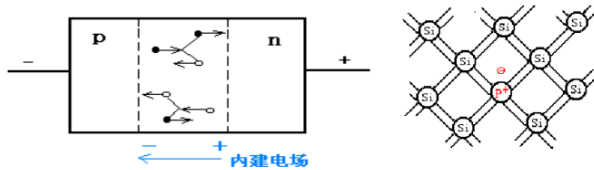
(1) 雪崩击穿 (Avalanche breakdown)



p-n结中的电场随着反向电压的增加而增加，少数载流子通过反向扩散进入势垒区时获得的动能也就越来越大，当载流子的动能大到一定数值后，当它与中性原子碰撞时，可以把中性原子的价电子激发到导带，形成电子-空穴对——碰撞电离

1 → 2
电子 电子空穴对

连锁反应，使载流子的数量倍增式的急剧增多，因而p-n结的反向电流也急剧增大，形成了雪崩击穿。
足够大电场



影响雪崩击穿电压的主要因素：

1. 掺杂浓度：掺杂浓度大，击穿电压小。*掺杂浓度*

杂质浓度高—接触电势差大—载流子能够获得更大动能—利于雪崩倍增

但，杂质浓度很高—势垒区宽度小—不易完成载流子加速过程—不利于雪崩倍增

2. 禁带宽度：禁带宽度越宽，击穿电压越大。

禁带宽度大—碰撞电离产生电子-空穴对所需能量大—不利于雪崩倍增

3. 温度：温度升高，击穿电压增大。正温度系数 *↑↑ V ↑*

温度升高—晶格振动散射增加—电子、空穴获得的能量易损失—不利于雪崩倍增效应

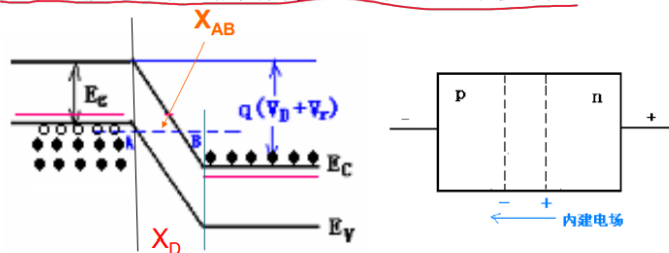
$$V_D = \frac{k_0 T}{q} \ln \frac{N_D N_A}{n_i^2}$$

接触电势差：

(2) 齐纳击穿

(2) 齐纳击穿 (Zener breakdown) 或隧道击穿

^{很高但不那么高}
掺杂浓度较高的非简并p-n结中的击穿机制



根据量子力学的观点, 当势垒宽度 X_{AB} 足够窄时, 将有p区电子穿透禁带. 当外加反向电压很大时, 能带倾斜严重, 势垒宽度 X_{AB} 变得更窄. 造成很大的反向电流. 使p-n结击穿

^{也就是低能型的价带电子.}
^{不是价带电子 N型的导带电子}

影响势垒宽度 X_{ab} 的因素:

- 1 外加反向电压很大, 总宽度变窄, 能带严重倾斜, 势垒宽度变窄
- 2 禁带宽度增大, 下部分往下平移, 会导致 X_{ab} 增大

影响齐纳击穿电压的主要因素:

1. 掺杂浓度: ^{越高所需}掺杂浓度大, 击穿电压小.

杂质浓度高—势垒区宽度窄—隧道长度短—易发生隧道击穿

2. 禁带宽度: 禁带宽度越宽, 击穿电压越大.

禁带宽度大—势垒区宽度大—隧道长度变长—不易隧道击穿

3. 温度: 温度升高, 击穿电压下降。 负温度系数 ^{T↑ V↓}

温度升高—禁带宽度变窄—势垒区宽度变小—隧道长度变短

AsGa

结 论

齐纳击穿电压具有负的温度系数, 而雪崩击穿电压具有正的温度系数, 这种温度效应是区分两种击穿机构的重要方法.

掺杂浓度高, 反向偏压不高的情况下, 易发生齐纳击穿

掺杂浓度不高, 反向偏压较高的情况下, 易发生雪崩击穿.

例, Si、Ge: $V_{BR} < 4E_g / q$ 齐纳击穿 (隧道击穿)

$V_{BR} > 6E_g / q$ 雪崩击穿

$4E_g / q < V_{BR} < 6E_g / q$ 两者均存在

热击穿:

(3) 热击穿

禁带宽度较窄的半导体易发生这种击穿