第十七讲 p-n结

10月11，2002

内容：

1. 理想的p-n结在平衡时

2. 理想的p-n结在非平衡时

阅读作业

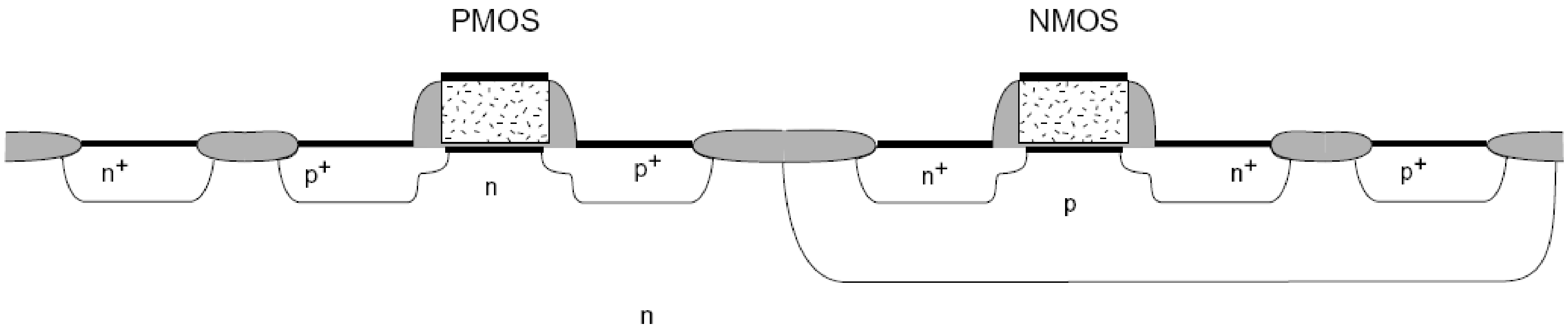
del Alamo Ch. 7，§§7.1 （7.2.1-7.2.3）

主要问题

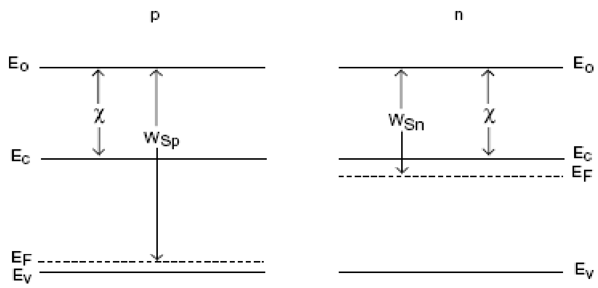
- 如果一个n型区和一个p型区紧密接触会发生什么？
- 如果在一个p-n结上加一个偏压，静电特性会有什么变化？
- 在偏压下一个p-n结电流的主要物理机制是什么？
- 成为p-n结整流行为的基础是什么？

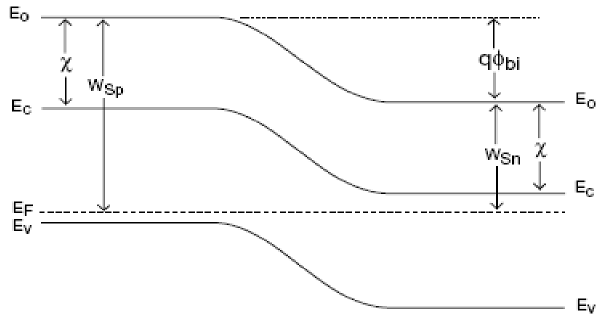
动机： p-n无处不在！

例子：CMOS



1. 理想的p-n结在平衡时

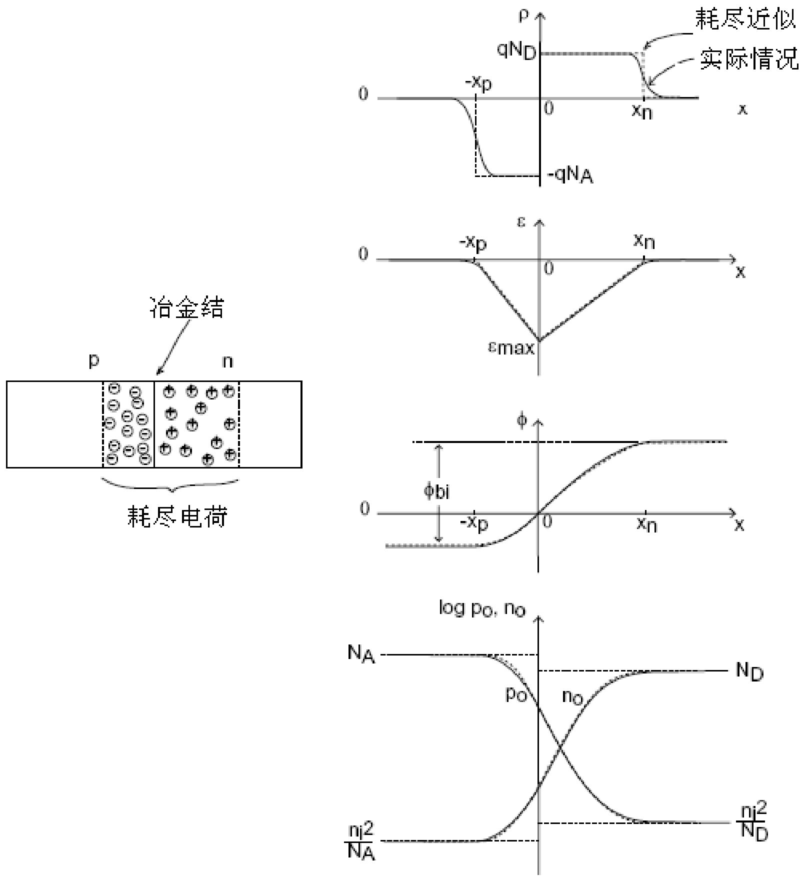




$$q\phi_{bi} = W_{Sp} - W_{Sn} = \left(E_C - E_F \right)\Big|_{x=0} - \left(E_C - E_F \right)\Big|_{x?\ 0} = kT \ln \frac{n_0\left(x ?\ 0 \right)}{n_0\left(x = 0 \right)}$$

那么：

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


冶金结
p
n
耗尽电荷
ρ
耗尽近似
实际情况
qND
-xp
0
xn
x
-qNA
ε
εmax
φ
φbi
log po, no
NA
ND
po
no
ni2/NA
ni2/ND

做耗尽近似：

□ 在体电荷密度：

$\rho(x) ; 0$ 在p-$QNR: x < -x_p$时

$\rho(x) ; -qN_A$ 在$SCR: -x_p < x < 0$时

$\rho(x) ; -qN_D$ 在$SCR: 0 < x < x_n$时

$\rho(x) ; 0$ 在n-$QNR: x_n < x$时

□ 电场：

$\varepsilon(x) ; 0$ 在p-$QNR: x < -x_p$时

$\varepsilon(x) ; -\frac{qN_A}{}(x + x_p)$ 在$SCR: -x_p < x < 0$时

$\varepsilon(x) ; \frac{qN_D}{}(x - x_n)$ 在$SCR: 0 < x < x_n$时

$\varepsilon(x) ; 0$ 在n-$QNR: x_n < x$时

□ 静电势[选择$\phi(x = 0) = 0$]：

$\phi(x) ; -\frac{qN_A x_p^2}{2}$ 在p-$QNR: x < -x_p$时

$\phi(x) ; -\frac{qN_A}{2}(x^2 + 2x_p x)$ 在$SCR: -x_p < x < 0$时

$\phi(x) ; -\frac{qN_D}{2}(x^2 - 2x_n x)$ 在$SCR: 0 < x < x_n$时

$$\phi\left(x\right) ; \frac{qN_D x_n^2}{2} 0 \qquad \text{在n-}QNR: x_n < x\text{时}$$

两个未知数：x_n和x_p

- 要求总的电荷保持电中性：

$$qN_A x_p = qN_D x_n$$

- 这个结构的电势差为ϕ_{bi}：

$$\phi\left(x_n\right) - \phi\left(x_p\right) = \frac{qN_D x_n^2}{2} - \frac{qN_A x_p^2}{2} = \phi_{bi}$$

解出x_n和x_p：

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon N_A \phi_{bi}}{qN_D(N_D + N_A)}} \qquad x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon N_D \phi_{bi}}{qN_A(N_D + N_A)}}$$

总的SCR宽度：

$$x_{SCR} = \sqrt{\frac{2\epsilon(N_D + N_A)\phi_{bi}}{qN_A N_D}}$$

最大电场：

$$|\mathcal{E}_{max}| = \sqrt{\frac{2qN_AN_D\phi_{bi}}{\epsilon(N_D+N_A)}}$$

- 对称的结：$N_A = N_D$：

$$x_p = x_n$$

$$\left|\phi\left(-x_p\right)\right| = \phi\left(x_n\right)$$

- 非对称的结：也就是. $N_A > N_D$

$$x_p < x_n$$

$$\left|\phi\left(-x_p\right)\right| < \phi\left(x_n\right)$$

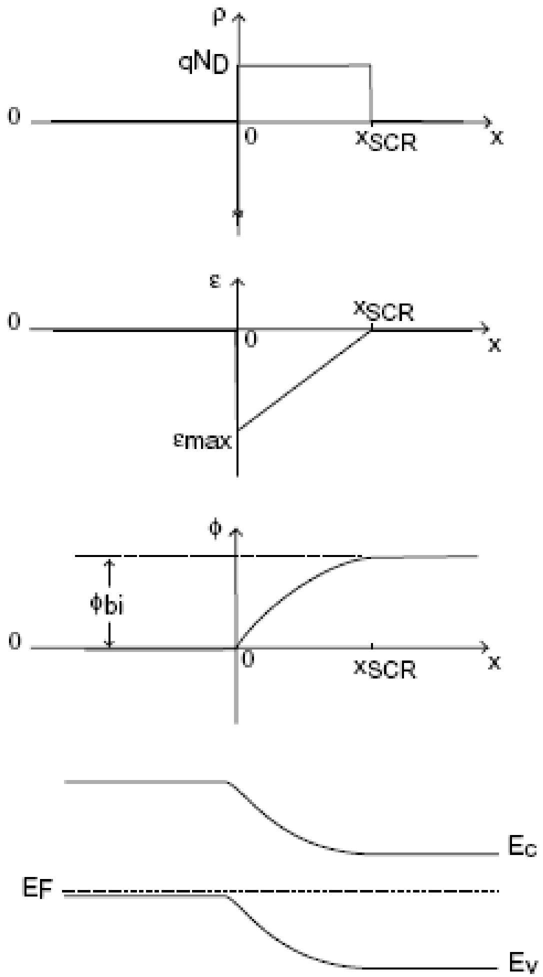
- 强非对称结：也就是$p^+ - n$结N_A ? N_D

$$x_p = x_n\ ;\ x_{SCR}\ ;\ \sqrt{\frac{2\quad\phi_{bi}}{qN_D}}$$

$$\left|\varepsilon_{\max}\right|\ ;\ \sqrt{\frac{2qN_D\phi_{bi}}{}}$$

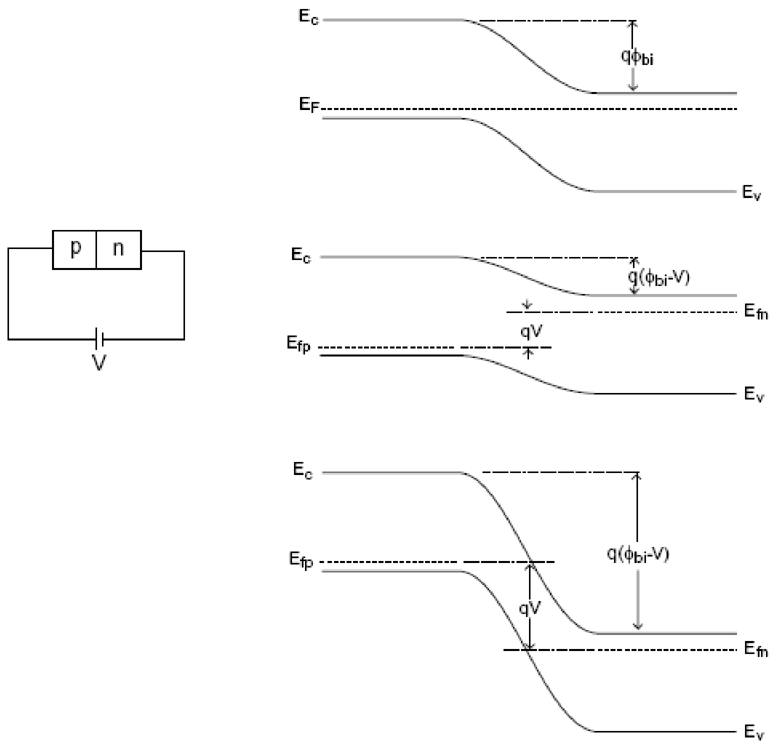
都由底掺杂一侧决定

$$\left|\phi\left(-x_p\right)\right| = \phi\left(x_n\right) ; \phi_{bi}$$


ρ
qND
0
0
xSCR
x
ε
0
xSCR
0
x
εmax
φ
φbi
0
0
xSCR
x
Ec
EF
Ev

2. 理想的p-n结在非平衡时

□ 静电态：



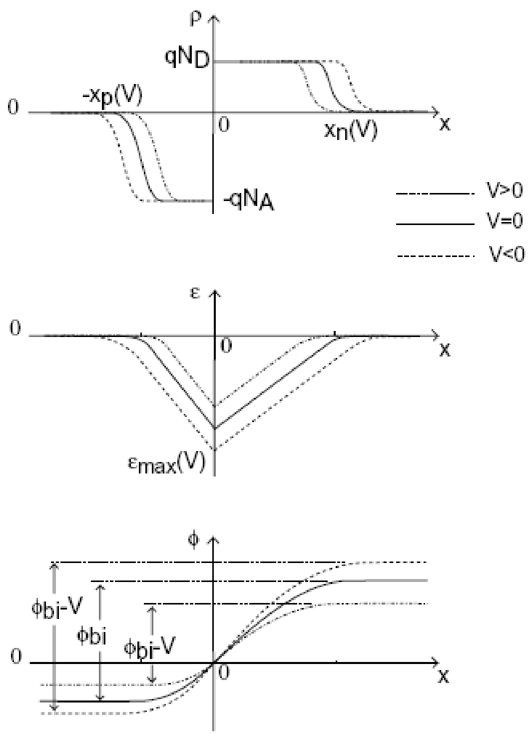
在正向和反向：

ϕ_{bi} ϕ_{bi} V

定量地讲，静电态没有变化到平衡之外→使用平衡方程：

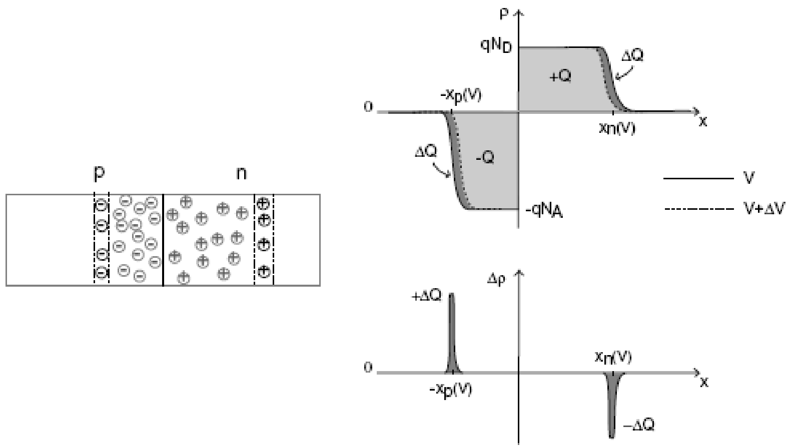
$$x_{SCR}(V) = \sqrt{\frac{2-\left(N_D \quad N_A\right)\left(\phi_{bi} \quad V\right)}{qN_A N_D}} = x_{SCR}(V=0)\sqrt{1-\frac{V}{\phi_{bi}}}$$

$$\left|\varepsilon_{\max}(V)\right| = \sqrt{\frac{2qN_A N_D\left(\phi_{bi}-V\right)}{\left(N_D \quad N_A\right)}} = \left|\varepsilon_{\max}(V=0)\right|\sqrt{1-\frac{V}{\phi_{bi}}}$$



□ 耗尽电容：

换一种方法考虑：



$$C(V) = \frac{\epsilon}{x_{SCR}(V)}$$

那么：

$$C(V) = \sqrt{\frac{\epsilon q N_A N_D}{2(N_D + N_A)(\phi_{bi} - V)}} = \frac{C(V=0)}{\sqrt{1 - \frac{V}{\phi_{bi}}}}$$

$$C(V) = \sqrt{\frac{\epsilon q N_A N_D}{2(N_D + N_A)(\phi_{bi} - V)}} = \frac{C(V=0)}{\sqrt{1 - \frac{V}{\phi_{bi}}}}$$

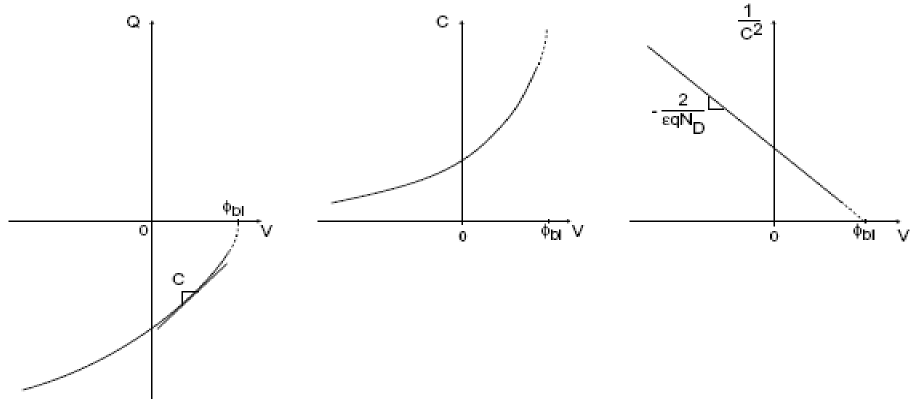
对 $p^+ - n$ 结：

$$C(V) = \sqrt{\frac{\epsilon q N_D}{2(\phi_{bi} - V)}}$$

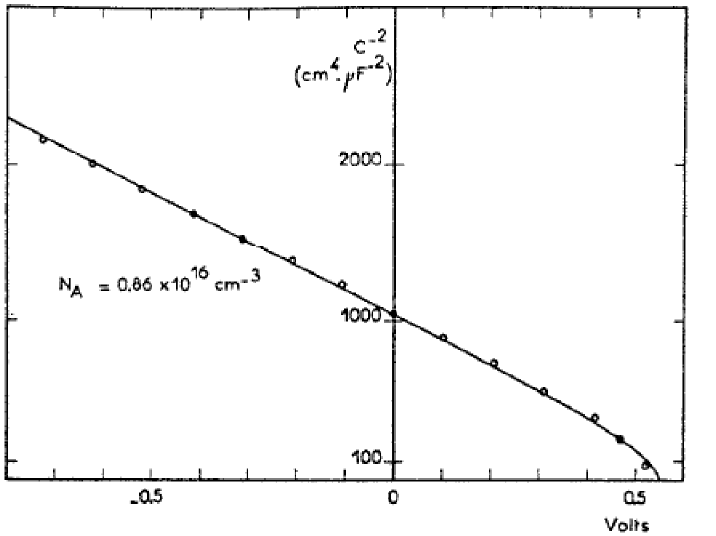
电容由低掺杂一侧决定

提取ϕ_{bi}和N_{low}的技术：

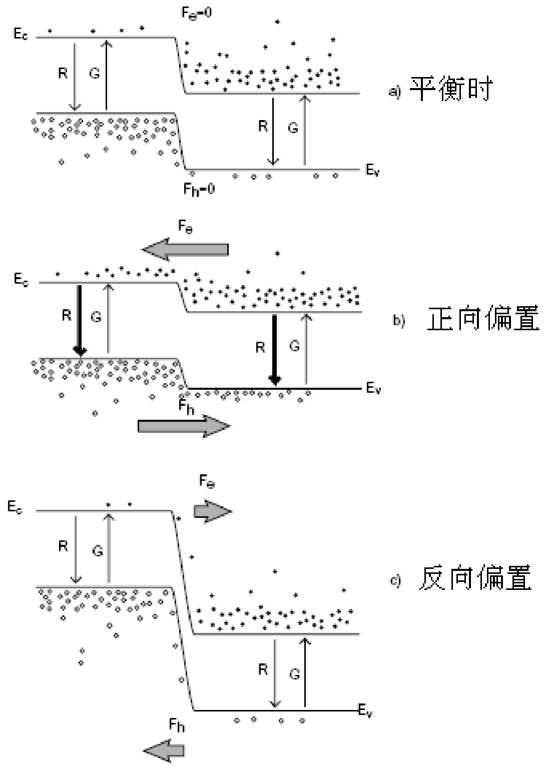
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(\phi_{bi} - V)}{\epsilon q N_D}$$



试验验证：



□ **I-V特性：**



在TE时：

- 通过SCR的电子和空穴流是平衡的

- 在QNR’s时G和R是平衡的

- I=0

* 在正向偏置：

- 少数载流子的势垒能量减小
- 少数载流子注入

- 在QNR’s时R>G

- $I \sim e^{qV/kT}$

* 在反向偏置：

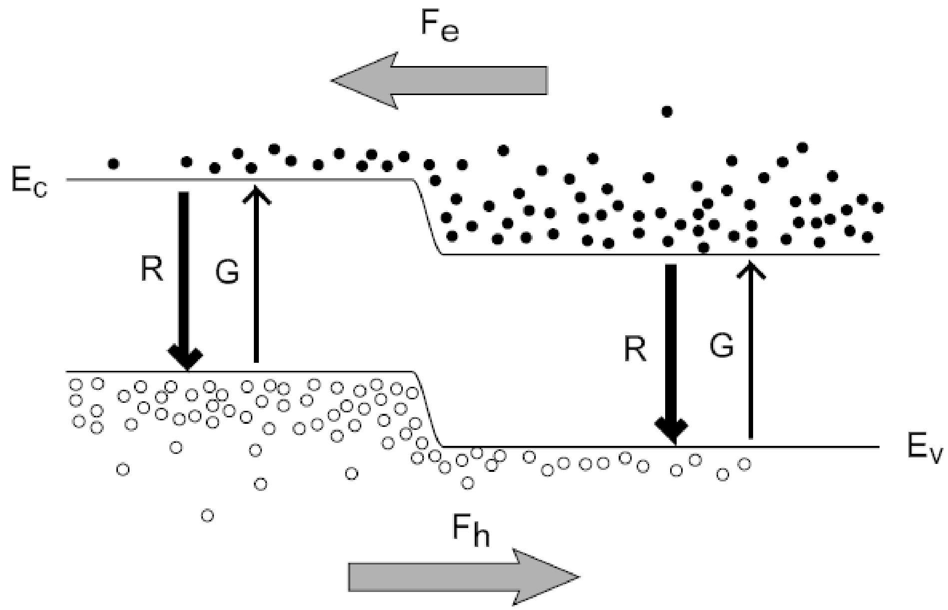
- 少数载流子的势垒能量增加
- 少数载流子抽取

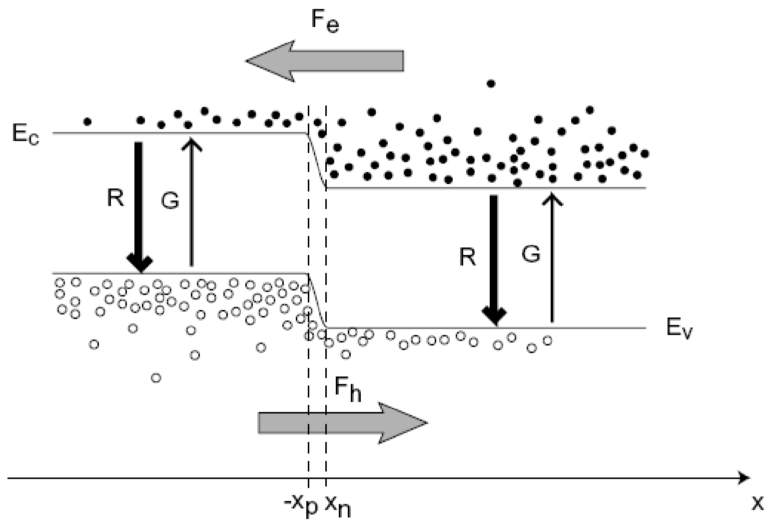
- 在QNR’s时G>R

- I饱和到一个极小值

对I－V特性主要考虑的构造模型：

- 结电压要设置的使载流子浓度具有足够的被注入的能量；
- 载流子注入率由少数载流子传输和准中性区G/R率来设置；
- SCR是在准中性态。


F_e
E_c
R
G
R
G
E_v
F_h



推导一阶I－V特性模型的方法：

- 计算二极管的电流密度如下： $J = J_e\left(-x_p\right) + J_h\left(x_n\right)$
- 计算每种载流子对电流的贡献： $J_e\left(-x_p\right) = -qn'\left(-x_p\right)\upsilon_e\left(-x_p\right)$

$$J_h\left(x_n\right) = -qp'\left(x_n\right)\upsilon_h\left(x_n\right)$$

- 用表达式$\upsilon_e\left(-x_p\right)$和$\upsilon_h\left(x_n\right)$推导在Ch. 5中类似的少数载流子问题。
- 推导$n'\left(-x_p\right)$和$p'\left(x_n\right)$的表达式，假定在空间电荷区处于准平衡态。

- 对正向和反向结果是一致的。

主要结论

- P－N结的内建势：

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

- 耗尽近似：两个准中性区被在TE时要求详细的平衡，即各处 $J_e = J_h = 0$。一个空间电荷区分开。

- 在强非对称结静电态的特性由低掺杂水平区域决定；也就是说，对 $p^+ - n$ 结：

$$x_{SCR} \; ; \; \sqrt{\frac{2 \quad \phi_{bi}}{qN_D}} \qquad |\varepsilon_{\max}| \; ; \; \sqrt{2qN_D\phi_{bi}}$$

- 平衡之外的静电态和在TE时一样，只要 ϕ_{bi} ϕ_{bi} V。

- 由于SCR宽度调整的耗尽层电容：

$$C(V) = \frac{}{x_{SCR}(V)}$$

- 正向偏压：结势垒↓ 载流子注入 在QNR’s时复合 $I : e^{qV/kT}$。

- 反向偏压：结势垒↑　载流子抽取　在QNR’s时产生　在反向V时I饱和