第一章 PN 结

内容提要

- ❑ 什么是 PN 结
- ❑ 平衡态能带图
- ❑ 外加电压

PN 结是其他微电子器件的基础。

PN 结的常见应用有：太阳能电池，GaAs / GaN 激光器，有机发光二极管，雪崩光电二极管，CMOS 图像传感器。OLED 是有机半导体的显示材料，怕水，寿命有限。

1.1 PN 结的形成

PN 结最早是通过热扩散，目前有沉积、扩散、激光掺杂等工艺。

一般掺杂得到的是二维的器件，电流方向不是直线，难以求解。若是得到的是一个很窄的器件，可以简化为一个一维问题，对第二个维度的依赖性会变低，只需考虑第一维度的运动情况。

两种半导体直接相连是不能得到 PN 结的，因为断面上的原子不能形成化学键。对 N 型半导体，费米能级靠近导带，对于 P 型半导体，靠近价带。在两个体区中，N 型中很多的施主杂质电离的正离子（无法移动），但是有等量的电子（可以移动，$n = N_D$）；类似的 P 型存在可以移动的空穴（$p = N_A$）。浓度差造成了扩散，那么 N 型靠近结区的部分电子被中和，整体带正电，P 型对应部分带负电，这就是耗尽区。由于扩散的存在，出现 $n \cdot p > n_i^2$ 的瞬态。

电流分为两部分，漂移电流以及扩散电流。之前考虑的是扩散电流，因为此时还没有出现两部分的电势差。由于扩散后出现了静电荷，形成了电场，开始考虑漂移电流。电场逐渐增大，受到的阻力也越来越大，直到扩散电流与漂移电流相互抵消，进入稳态，即完成形成过程。

可以分为两个体区以及耗尽区（空间电荷区），耗尽区中没有自由移动的电荷，N 型一侧有 $n \ll n_0$，另一侧有 $p \ll p_0$ 。

$E_c(x)$ 如图 1.1

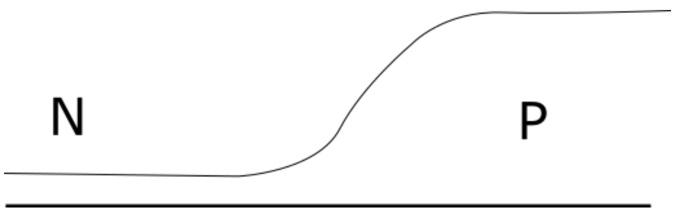

图 1.1: $E_c(x)$ 变化

$n(x)$ 满足

$$n(x) = N_c \exp(-\frac{E_c(x) - E_F}{kT})$$

其中，$E_c - E_F \approx 0.06eV$，$kT \approx 26meV$。
依靠本式，得到，空间电荷区几乎没有自由电荷。最后的分布如**图** 1.2

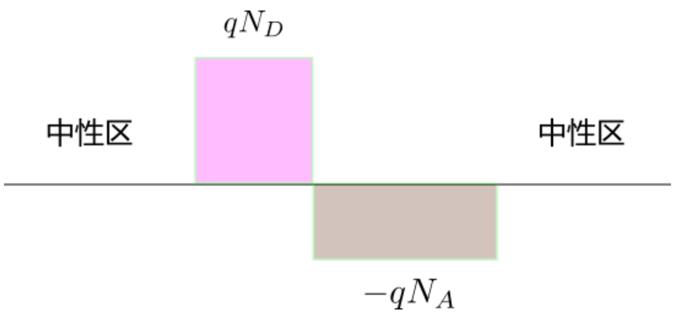

图 1.2: PN 结区域

形成的电场为均匀变化，最大值为

$$E_{max} = \frac{q}{K_s\epsilon_0} x_p N_A = \frac{q}{K_s\epsilon_0} x_n N_D$$

可以得到对应的电势以及能带图。

1.2 平衡态能带图

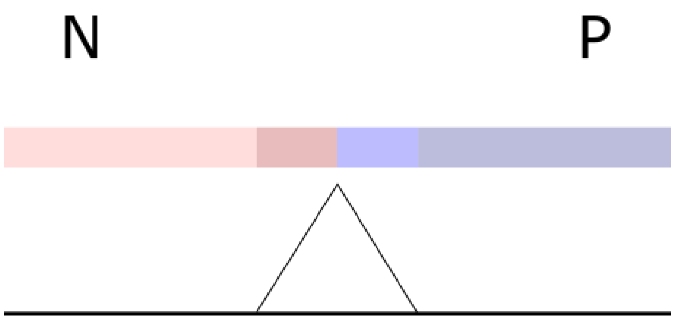

图 1.3: 电场 E 变化

分析空间电荷区电势在施主区的能级：

$$N_D = n = N_C \exp(\frac{E_i - E_C}{kT})$$

解得

$$\log(\frac{n}{N_C}) = -\frac{E_C - E_i}{kT}$$

那么

$$E_C = -kT\log(\frac{n}{N_C}) + E_i$$

同理

$$N_A = p = N_V \exp(-\frac{E_i - E_V}{kT})$$

$$E_V = E_i + kT \log(\frac{p}{N_V})$$

带隙为

$$E_g = E_C - E_V = -kT \log(\frac{n_i^2}{N_C N_V})$$

而

$$np = N_C N_V \exp(-\frac{E_g}{kT})$$

$$E_g = -kT \log(\frac{np}{N_C N_V})$$

内建电势满足

$$V_{bi} = E_g - (E_F - E_V) - (E_{C,otherside} - E_F)$$

$$V_{bi} == V_g + kT \log(\frac{N_C}{N_D}) + kT \log(\frac{N_V}{N_A}) = \frac{kT}{q} \log(\frac{N_A N_D}{n_i^2})$$

1.3 耗尽近似：泊松方程解析解

泊松方程是静电变量的出发点，适用于三维的公式为

$$\nabla \cdot E = \frac{\rho}{K_S \epsilon_0}$$

杂质分布为，其中 $\rho = q(p - n + N_D - N_A)$

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} = -\frac{\rho}{\epsilon_r} = \frac{\rho}{K_s \epsilon_0}$$

那么

$$\begin{aligned} E(x) &= \int -\frac{qN_D}{\epsilon_r} \mathrm{d}x \\ &= -\frac{qN_D}{\epsilon_r} x \end{aligned}$$

多次掺杂需要浓度的提升。

1.4 耗尽区的长度

在突变近似以及耗尽近似下，

$$\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x}=\begin{cases}-qN_A/K_S\epsilon_0, & -x_p\le x\le 0\\ qN_D/K_S\epsilon_0, & 0\le x\le x_n\\ 0, & else\end{cases}$$

得到

$$E(x)=\begin{cases}-\frac{qN_A}{K_S\epsilon_0}(x_p+x), & -x_p\le x\le 0\\ -\frac{qN_D}{K_S\epsilon_0}(x_n-x), & 0\le x\le x_n\end{cases}$$

为了满足 $x=0$ 的电场连续性，得到

$$N_Ax_p=N_Dx_n$$

求解电势，电势满足 $E=-\mathrm{d}V/\mathrm{d}x$

设置 p 型区边缘的电势为参考电势 0，那么在 n 型区边缘的电势为 V_{bi}，那么交界处的电势一致：

$$V_{bi}-\frac{qN_D}{2K_S\epsilon_0}x_n^2=\frac{qN_A}{2K_S\epsilon_0}x_p^2$$

得到

$$x_p=\left[\frac{2K_S\epsilon_0}{1}\left(\frac{N_D}{N_A(N_A+N_D)}\right)\right]$$

$$x_p=\left[\frac{2K_S\epsilon_0}{1}\left(\frac{N_A}{N_D(N_A+N_D)}\right)\right]$$

$$W=x_n+x_p=\left[\frac{2K_S\epsilon_0}{1}\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)\right]^{1/2}$$

1.5 外加电压

正向偏置是指的增加正向电压，使得正电压一端中性区费米能级下降，引起导带价带下降，这样也引起了 V_{bi} 的下降（平移）。费米能级下降的幅度为外加电压的大小。

$$V_{bi}'=V_{bi}-V_A$$

对原有的耗尽宽度的改进可以直接将 V_{bi} 替换为 V_{bi}'。

若是反向，在 n 型区使得费米能级降低，内建电势 V_{bi} 会上升，其峰值电场强度会明显增强。

反向偏置的 PN 结可以作为电容。

PN 结的连续性方程：

$$
\begin{aligned}
\nabla \cdot E &= q\,(p - n + N_D^+ - N_A^- \\
\frac{\partial n}{\partial t} &= \frac{1}{q}\nabla \bullet \mathrm{J}_N - r_N + g_N \\
\mathbf{J}_N &= qn\mu_N E + qD_N \nabla n \\
\frac{\partial p}{\partial t} &= \frac{1}{q}\nabla \cdot \mathbf{J}_p - r_P + g_P \\
\mathbf{J}_P &= qp\mu_P E - qD_P \nabla p
\end{aligned}
$$

添加外场后（正向），如 **图** 1.4。由于结区较短，产生复合未达到平衡，因此不满足 $np = n_i^2$，但是电子 / 空穴内部达到平衡，因此产生一种**准费米能级**，分别描述两种粒子的状态。[1] 平衡时，电子空穴的准费米能级是重合的。**图** 1.5。

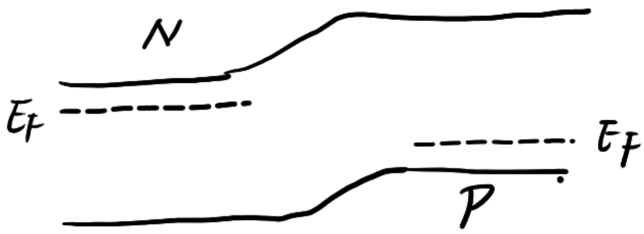

图 1.4: 外加电压后的能级图

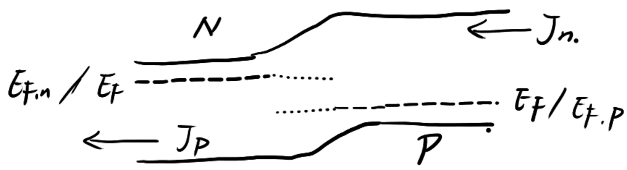

图 1.5: 外加电压后的准费米能级图

假设外加直流电压，在中性区中没有产生与复合，且 n 为常数，因此 $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ 。

对于 N 区空穴来说，浓度极低，只需考虑 $J_P = -qD_p\nabla p$ ，需要注意 p 的梯度，也就是只有扩散电流。而电流处处相等，另一区的总电流总是和这一侧的扩散相等的。

那么总电流

$$I = J_{P(N)} + J_{N(N)} = J_{P(n),D} + J_{N(n),D,D} = J_{P(n),D} + J_{N(p),D}$$

假设电流是常数，那么 $\nabla \cdot J = 0$：

又

$$J_N = qD_N \nabla \cdot n, \text{ where } n = n_0 + \Delta n$$

$$\nabla^2 \cdot \Delta n = 0$$

[1] 子系统平衡时间为 ps，整体平衡为 μs - ms 的量级

因此

$$\Delta n = A \cdot x + B$$

由边界条件，坐标系如**图** 1.6

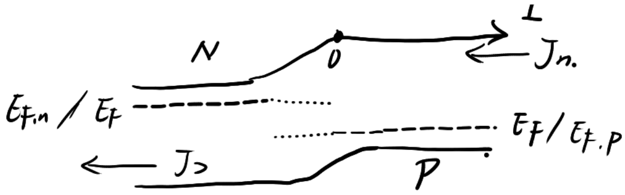

图 1.6: 坐标系建立

$$\Delta n = A(x - L)$$

$$n(0) = N_C \exp(-\frac{E_C(0) - E_F}{kT}), \text{ where } E_C(0) = E_C + V_{bi} - V_A$$

那么

$$n(0) = N_C \exp(-\frac{E_C - E_F}{kT}) \exp(-\frac{V_{bi}}{kT}) \exp(\frac{V_A}{kT}) = \frac{n_i^2}{p} \exp(\frac{V_A}{kT}) = n_{0,p} \exp(\frac{V_A}{kT})$$

那么

$$\Delta n = n_{0,p}(\exp(\frac{V_A}{kT}) - 1)$$

V_{bi} 推导

由于

$$n = N_C \exp(-\frac{E_C - E_F}{kT})$$

对于 E_C 最低处为 n_1 另一侧为 n_2，那么

$$\begin{aligned} n_1 &= N_D \\ n_2 &= \frac{n_i^2}{N_A} \\ \frac{n_1}{n_2} &= \exp(\frac{E_{C,2} - E_{C,1}}{kT}) \\ \log(N_A N_D / n_i^2) &= \frac{V_{bo}}{kT} \end{aligned}$$