



半导体物理与器件基础

张 帅

常州大学材料科学与工程学院

慕课视频片段

视频名称：6.1.5 pn结的载流子分布 MP4.mp4



温馨提示：此视频框在点击“上传手机课件”时会进行转换，用手机进行观看时则会变为可点击的视频。此视频框可被拖动移位和修改大小

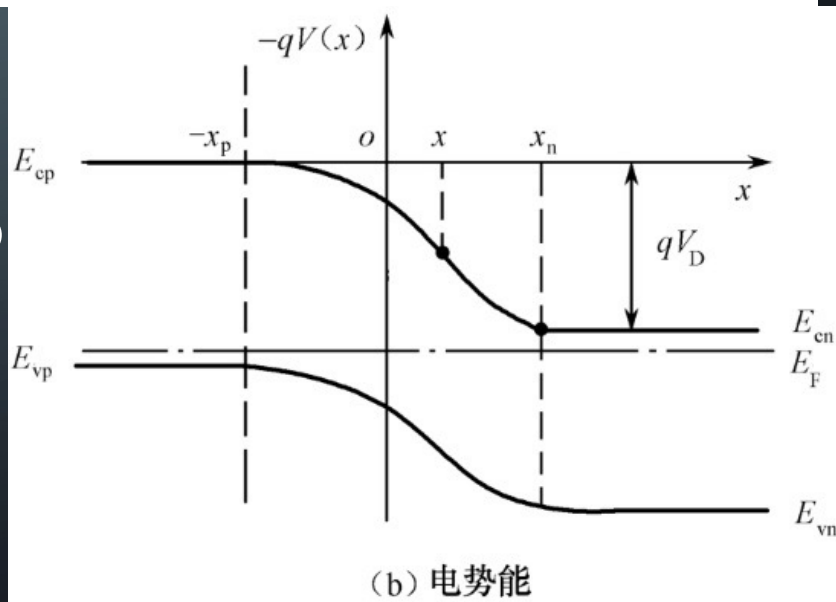
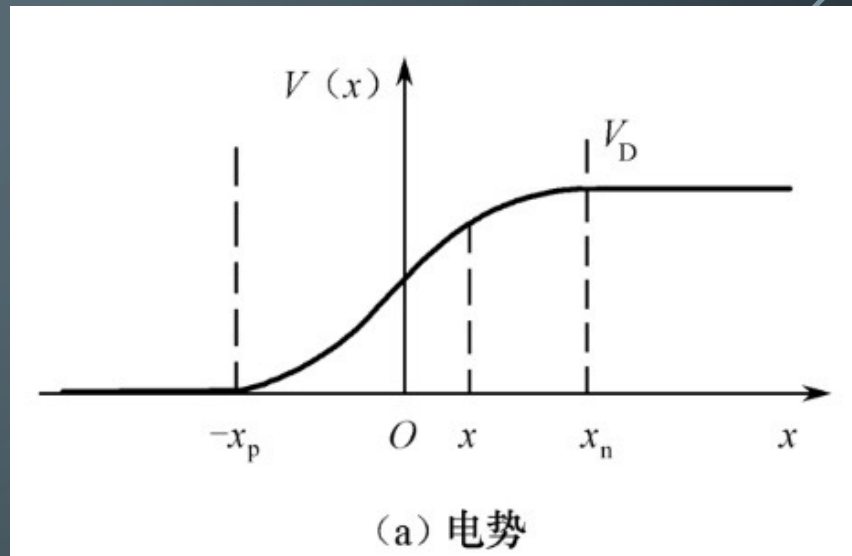
6.1.5 pn结的载流子分布

电势和电势能

令p区电势为0，由于内建电场为n区指向p区，因此n区电势更高，比p区高 V_D

电子从n区导带到p区导带，电势能升高
p区电势能比n区高 qV_D （如右图，针对电子）

$$E(x_n) = -qV_D$$
$$E(-x_p) = 0$$
$$E(x) = -qV(x)$$



6.1.5 pn结的载流子分布

载流子的统计分布

根据热平衡状态下非简并半导体的导带电子浓度计算

$$n_0 = \int_{E_c}^{E_c'} \frac{1}{2\pi^2} \frac{(2m_n^*)^{3/2}}{\hbar^3} \exp\left(-\frac{E - E_F}{k_0 T}\right) (E - E_c)^{1/2} dE$$

x 处电子浓度

$$n(x) = \int_{E(x)}^{\infty} \frac{1}{2\pi^2} \frac{(2m_{dn})^{3/2}}{\hbar^3} \exp\left(\frac{E_F - E}{k_0 T}\right) [E - E(x)]^{1/2} dE$$

计算可以得到

$$n(x) = N_c \exp\left[\frac{E_F - E(x)}{k_0 T}\right] \quad (6-12)$$

6.1.5 pn结的载流子分布

载流子的统计分布

$$\text{因为 } E(x) = -qV(x), \quad n_{n0} = N_c \exp\left(\frac{E_F - E_{cn}}{k_0T}\right)$$

其中 E_{cn} 为 n 型半导体的导带底能级

$$E_{cn} = E(x_n) = -qV_D$$

所以,

$$n(x) = n_{n0} \exp\left[\frac{E_{cn} - E(x)}{k_0T}\right] = n_{n0} \exp\left[\frac{qV(x) - qV_D}{k_0T}\right] \quad (6-13)$$

隐去 E_F 、 N_c 等, 便于讨论

6.1.5 pn结的载流子分布

载流子的统计分布

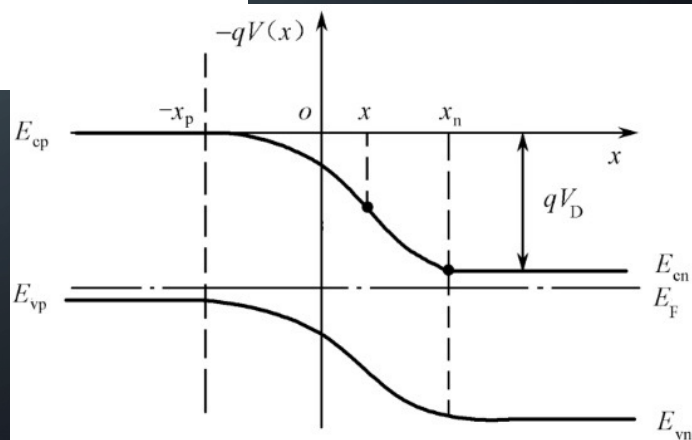
当 $x = x_n$ 时, $V(x_n) = V_D$, 所以 $n(x_n) = n_{n0}$;

当 $x = -x_p$ 时, $V(-x_p) = 0$, 则 $n(-x_p) = n_{n0} \exp(-\frac{qV_D}{k_0T})$

$n(-x_p)$ 就是 p 区中平衡少数载流子—电子的浓度

n_{p0} , 所以

$$n_{p0} = n(-x_p) = n_{n0} \exp(-\frac{qV_D}{k_0T}) \quad (6-14)$$



(b) 电势能

6.1.5 pn结的载流子分布

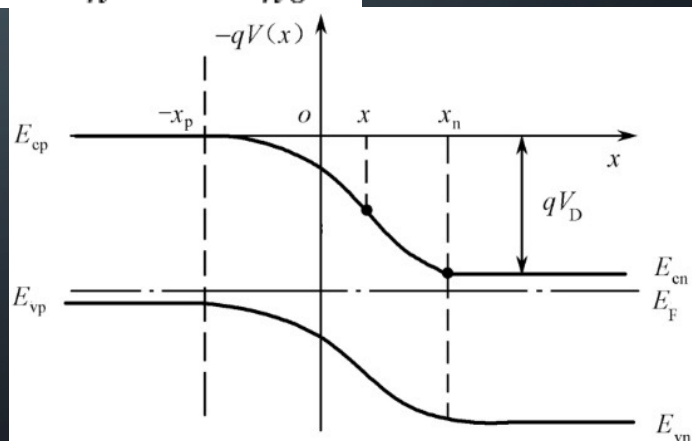
载流子的统计分布

类似地，可以得到点 x 处的空穴浓度 $p(x)$ 为

$$p(x) = p_{n0} \exp\left[\frac{qV_D - qV(x)}{k_0T}\right] \quad (6-15)$$

p_{n0} 是 n 区平衡少数载流子——空穴浓度。

当 $x = x_n$ 时， $V(x) = V_D$ ，所以 $p(x_n) = p_{n0}$ ；



(b) 电势能

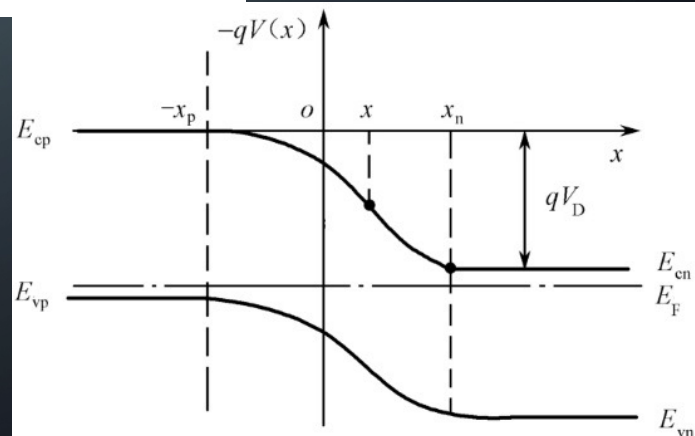
6.1.5 pn结的载流子分布

载流子的统计分布

当 $x = -x_p$ 时, $V(x) = 0$, 则 $p(-x_p) = p_{n0} \exp\left[\frac{qV_D}{k_0T}\right]$

$p(-x_p)$ 就是 p 区中平衡多数载流子 p_{p0}

所以 $p_{p0} = p(-x_p) = p_{n0} \exp\left[\frac{qV_D}{k_0T}\right]$ (6-16)



(b) 电势能

6.1.5 pn结的载流子分布

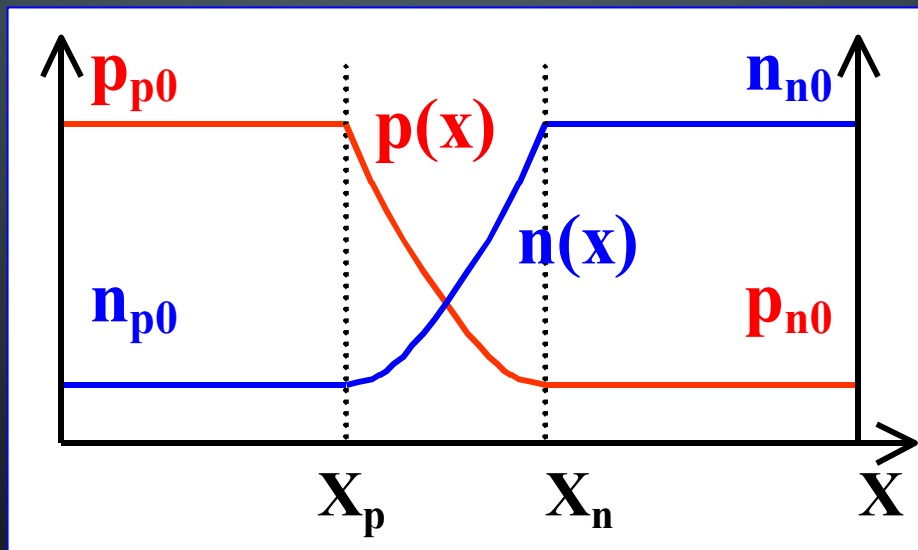
载流子的统计分布

根据

$$n(x) = n_{n0} \exp\left[\frac{qV(x) - qV_D}{k_0T}\right] \quad (6-13)$$

$$p(x) = p_{p0} \exp\left[\frac{qV_D - qV(x)}{k_0T}\right] \quad (6-15)$$

可得载流子在平衡pn结中的分布



6.1.5 pn结的载流子分布

载流子的统计分布

根据

$$n(x) = n_{n0} \exp\left[\frac{qV(x) - qV_D}{k_0T}\right] \quad (6-13)$$

$$p(x) = p_{p0} \exp\left[\frac{qV_D - qV(x)}{k_0T}\right] \quad (6-15)$$

可估算势垒区中的载流子浓度

势垒区内电势能比 n 区导带底 E_{cn} 高0.1 eV的点 x 处的电子载流子浓度估算

$$n(x) = n_{n0} \exp\left(-\frac{0.1}{0.026}\right) \approx \frac{n_{n0}}{50} \approx \frac{N_D}{50}$$

6.1.5 pn结的载流子分布

载流子的统计分布

设势垒高度为0.7 eV，则该处空穴浓度为

$$\begin{aligned} p(x) &= p_{n0} \exp\left[\frac{qV_D - qV(x)}{k_0T}\right] \\ &= p_{p0} \exp\left[-\frac{qV(x)}{k_0T}\right] \\ &= p_{p0} \exp\left[-\frac{0.6}{0.026}\right] \approx 10^{-10} p_{p0} \approx 10^{-10} N_A \end{aligned}$$

室温附近，一般对绝大多数势垒区，杂质都已电离，但载流子浓度比起n、p区的多数载流子浓度小得多，好像耗尽了。因此，势垒区又称为耗尽层。