

课程信息

- 期末考试：4月27日（周二）下午7,8节 (15:20-17:00)

地点：B101, B102, B105

范围：课上内容 + 作业内容

难度：不高于往年试题

题型：满分100分，基础知识占80分以上

可自带一张A4纸，总结知识点（限手写，禁止）

不允许携带电子设备（计算器、手机等）

§ 7.5 非平衡载流子

N型半导体 —— 主要载流子是电子，也有少量的空穴载流子

电子 —— 多数载流子 —— 多子

空穴 —— 少数载流子 —— 少子

P型半导体 —— 主要载流子是空穴，也有少量的电子载流子

空穴 —— 多数载流子 —— 多子

电子 —— 少数载流子 —— 少子

热平衡下电子和空穴的浓度

半导体中的杂质电子，或价带中的电子通过吸收热能，激发到导带中 —— 载流子的产生

电子回落到价带中和空穴发生复合 —— 载流子的复合

—— 达到平衡时，载流子的产生率和复合率相等
电子和空穴的浓度有了一定的分布

电子和空穴的浓度满足 $n_0 p_0 = N_- N_+ e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$

—— 热平衡条件

在外界的影响作用下，电子和空穴浓度可能偏离平衡值

—— 本征光吸收产生电子 — 空穴对

即有 $\Delta n = n - n_0$

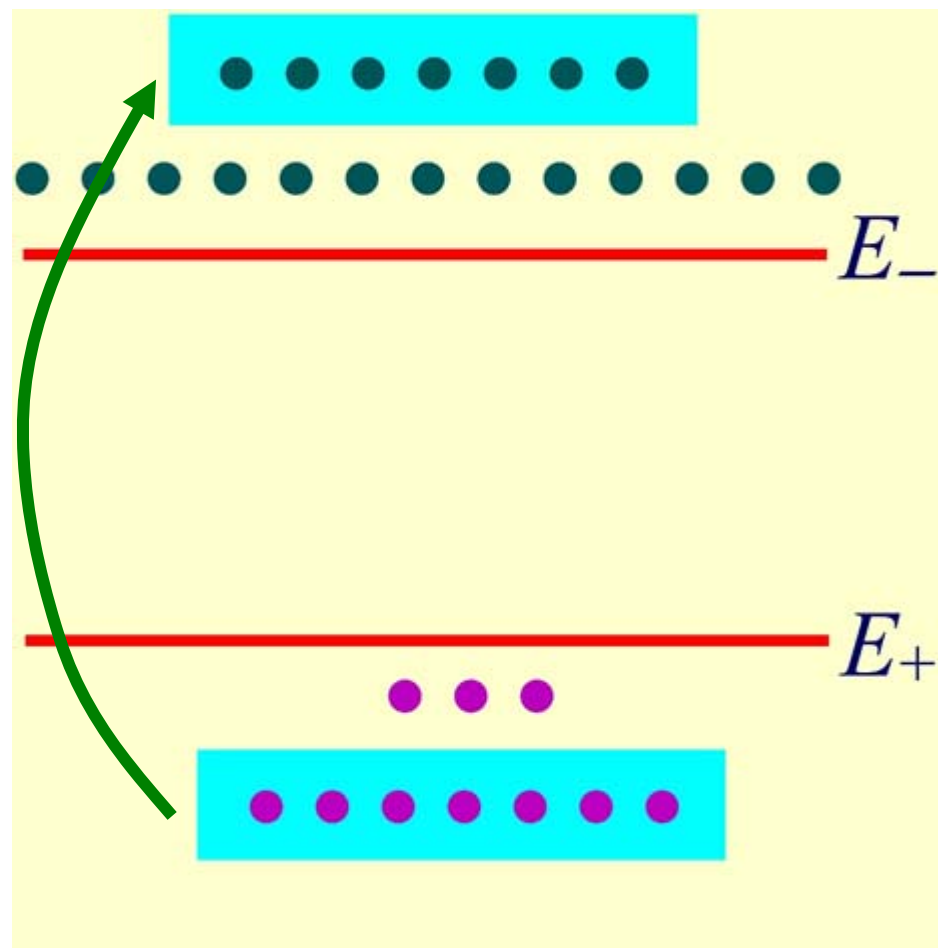
$$\Delta p = p - p_0$$

—— 非平衡载流子

非平衡电子和非平衡空穴
的浓度相同

$$\Delta n = \Delta p$$

—— 如本征光吸收



非平衡载流子对多子和少子的影响

多子的数目很大 —— 非平衡载流子对多子的影响不明显

—— 对少子将产生很大影响

—— 在讨论非平衡载流子的问题时
主要关心的是非平衡少数载流子

1. 非平衡载流子的复合和寿命

在热平衡下，载流子的浓度具有稳定值

非平衡载流子 —— 光照可以产生载流子

—— **开始光照**，载流子的产生率增大，同时复合率也增大
载流子的浓度偏离热平衡时的浓度

一段时间的光照后，非平衡载流子的浓度具有确定的数目

$$(n_0, p_0) \Big|_T \xrightarrow{\text{Light irradiation}} [n_0 + (\Delta n)_0, p_0 + (\Delta p)_0] \Big|_T$$

—— 载流子的**产生率和复合率相等**
载流子的浓度到达一个新的平衡

—— **撤去光照**，载流子复合率大于产生率，经过一段时间后
载流子的浓度又恢复到热平衡下的数值

$$[n_0 + (\Delta n)_0, p_0 + (\Delta p)_0] \Big|_T \xrightarrow{\text{No Light irradiation}} (n_0, p_0) \Big|_T$$

——载流子的复合是以固定概率发生的

$$\text{非平衡载流子的复合率} = \frac{\Delta n}{\tau}$$

——单位时间、单位体积复合的载流子数目

—— τ 为非平衡载流子的寿命

撤去光照后，非平衡载流子浓度随时间的变化关系

$$\frac{d(\Delta n)}{dt} = -\frac{\Delta n}{\tau} \quad \Delta n = (\Delta n)_0 e^{-t/\tau}$$

$(\Delta n)_0$ ——光照稳定时的非平衡载流子浓度

$$\Delta n = (\Delta n)_0 e^{-t/\tau}$$

非平衡载流子的寿命 τ 的意义

1) 光照使半导体的导电率明显增加 —— 光电导效应

—— τ 决定着变化的光照时，光电导反应的快慢

—— 两个光信号的间隔 $\Delta t > \tau$ ，可以分辨出相应的电流信号变化，才可以分辨出两个光信号

$$\Delta n = (\Delta n)_0 e^{-t/\tau}$$

非平衡载流子的寿命 τ 的意义

2) 非平衡载流子的寿命 τ 越大，光电导效应越明显

- 非平衡载流子的浓度减小为平衡值的 $1/e$ 所需要的时间是 τ ，显然 τ 越大，非平衡载流子浓度减小得越慢
- 一个非平衡载流子只在 τ 时间里起到增加电导的作用， τ 越大，产生一个非平衡载流子对增加的电导作用越大

$$\Delta n = (\Delta n)_0 e^{-t/\tau}$$

非平衡载流子的寿命 τ 的意义

- 3) 非平衡载流子的寿命 τ 对光电导效应有着重要的意义，通过测量光电导的衰减，可以确定非平衡载流子的寿命
- 4) 寿命 τ 与半导体材料所含的杂质与缺陷有关
 - 深能级杂质的材料，电子先由导带落回一个空的杂质深能级，然后由杂质深能级落回到价带中空能级
 - 深能级起着复合作用，降低了非平衡载流子的寿命
 - 非平衡载流子的寿命的测量可以鉴定半导体材料晶体质量的常规手段

2. 非平衡载流子的扩散

金属和一般的半导体中，载流子在外场作用下的定向运动
——形成**漂移电流**

半导体中载流子浓度的不均匀而形成扩散运动
——产生**扩散电流**

——多数载流子，漂移电流是主要的

——非平衡少数载流子产生明显的扩散电流

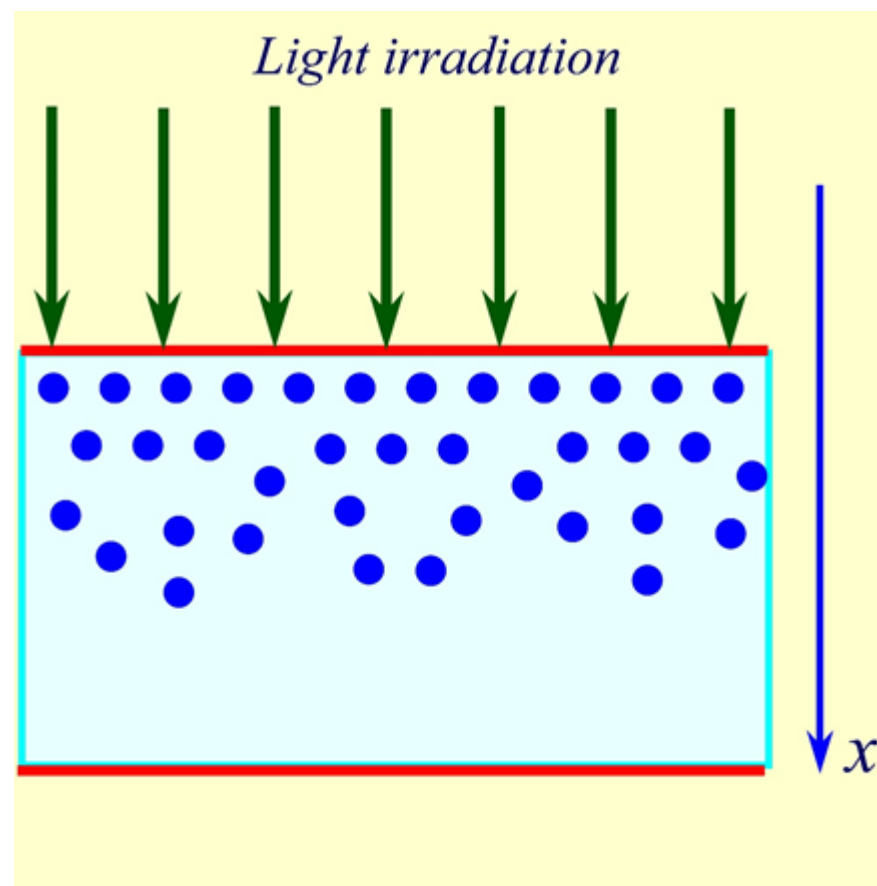
一维扩散电流的讨论

均匀光照射半导体表面 —— 光在表面很薄的一层内被吸收

光照产生非平衡少数载流子

—— 向体内运动，一边扩散
一边复合

—— 在稳定光照射下，在半
导体中建立起稳定的非
平衡载流子分布



非平衡载流子的扩散是热运动的结果

非平衡少数载流子一边扩散一边复合，形成稳定分布

浓度满足连续方程

$$\frac{d}{dx} \left(-D \frac{dN}{dx} \right) - \frac{N}{\tau} = 0$$

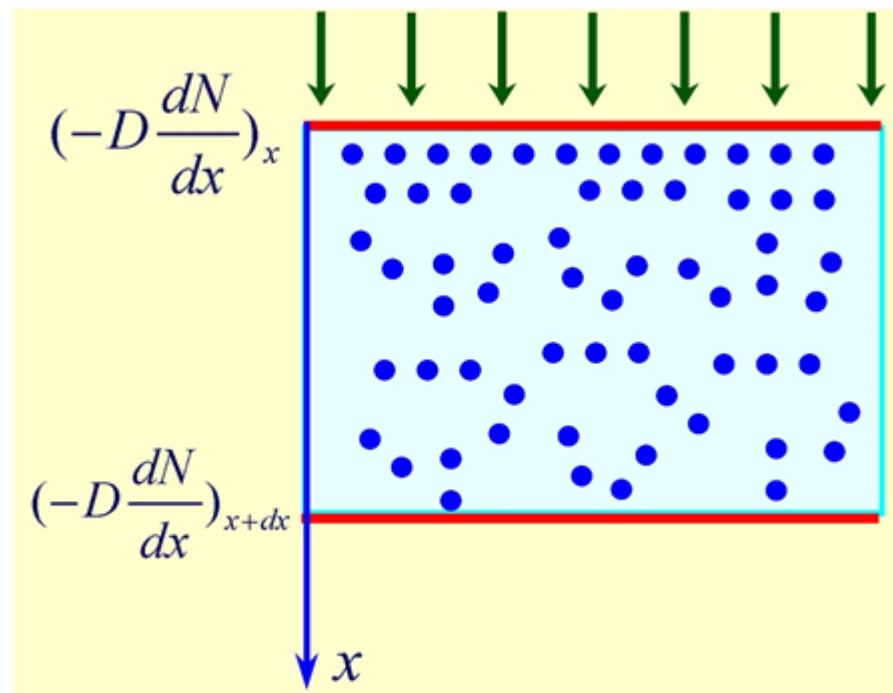
$$-D \frac{dN}{dx}$$

—— 单位时间、通过单位横截面积载流子数目

—— 扩散流密度

$$N / \tau$$

—— 载流子的复合率

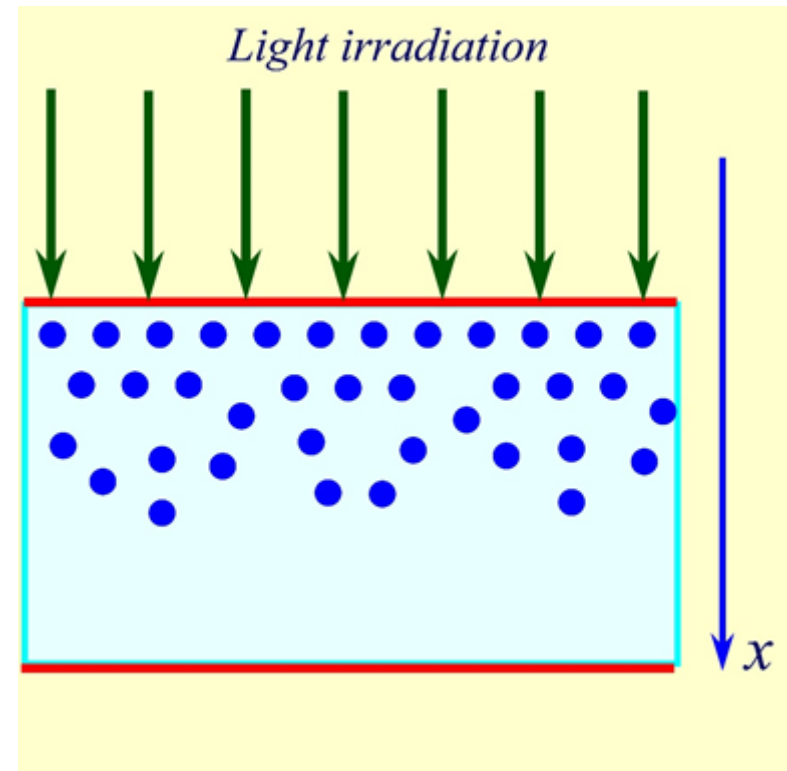


$$\frac{d}{dx} \left(-D \frac{dN}{dx} \right) - \frac{N}{\tau} = 0$$

方程的通解 $N = Ae^{-x/L} + Be^{x/L}$

边界条件 $\begin{cases} x=0 \\ N=N_0 \end{cases} \quad \begin{cases} x \Rightarrow \infty \\ N \Rightarrow 0 \end{cases}$

$\Rightarrow N = N_0 e^{-x/L}$



深入样品的平均距离 $L = \sqrt{D\tau}$ —— 扩散长度

扩散流密度 $-D \frac{dN}{dx} = N_0 \frac{D}{L} e^{-x/L}$

§ 7.6 PN 结

PN结的构成

一部分是N型半导体材料

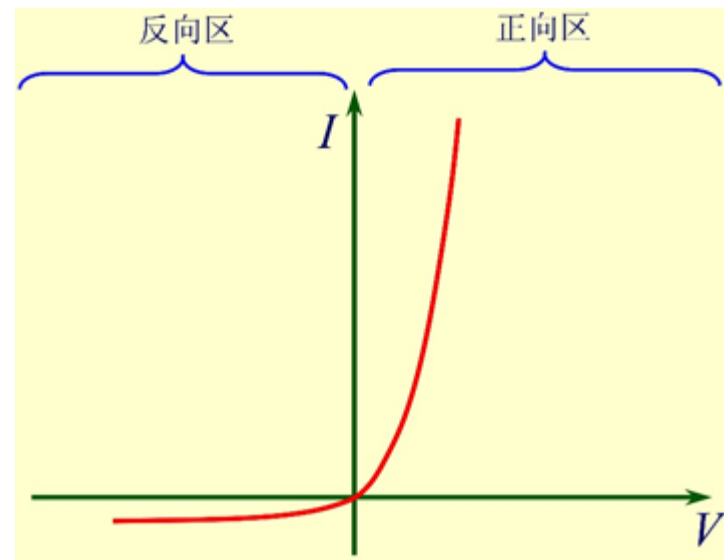
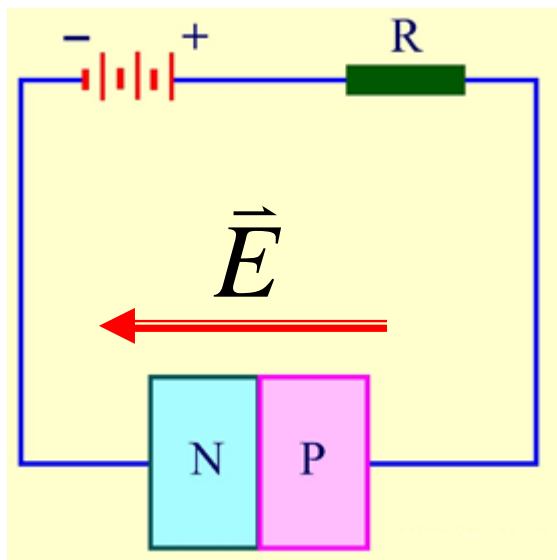
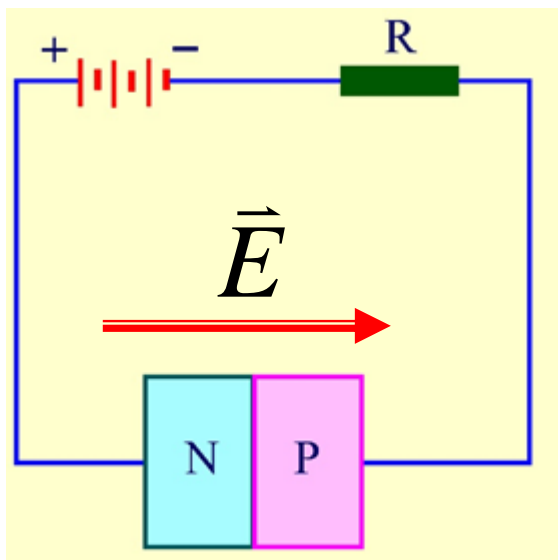
一部分是P型半导体材料

PN结的性质 —— 单向导电性

反向状态

正向状态

电流随电压变化特性



1. 平衡PN结势垒

$$\text{电子浓度 } n = N_- e^{-\frac{E_- - E_F}{k_B T}}$$

$$\text{空穴浓度 } p = N_+ e^{-\frac{E_F - E_+}{k_B T}}$$

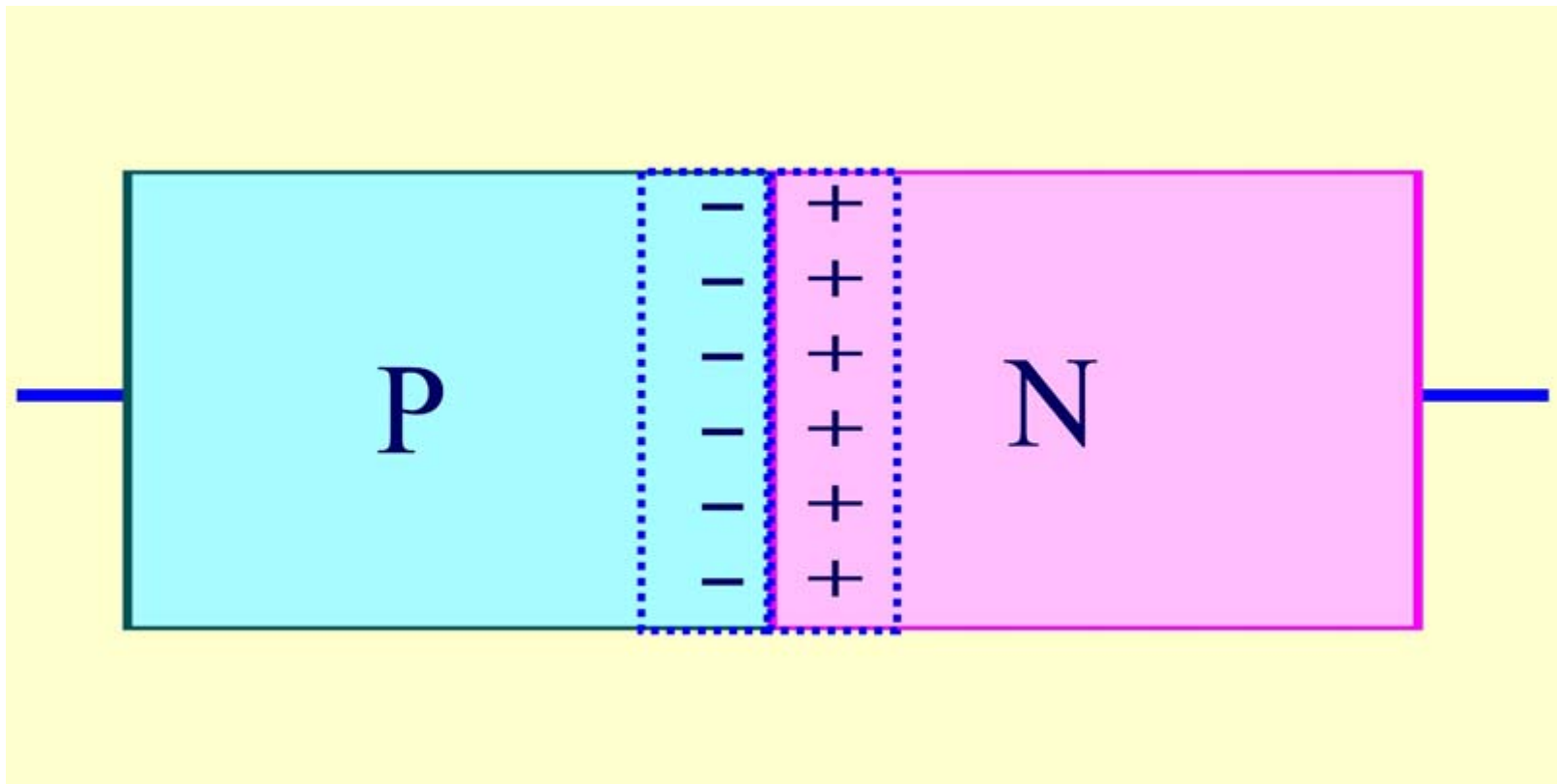
—— 掺杂的**N型半导体材料**，在杂质激发的载流子范围，电子的浓度远远大于空穴的浓度，费米能级在带隙的上半部，接近导带

P型半导体材料中，费米能级在带隙的下半部，接近价带

N型和**P型**材料分别形成两个区 —— **N区**和**P区**

N区和P区的费米能级不相等，在PN结处产生电荷的积累
—— 稳定后形成一定的电势差

P区相对于N区具有电势差 —— $-V_D$



PN结势垒作用

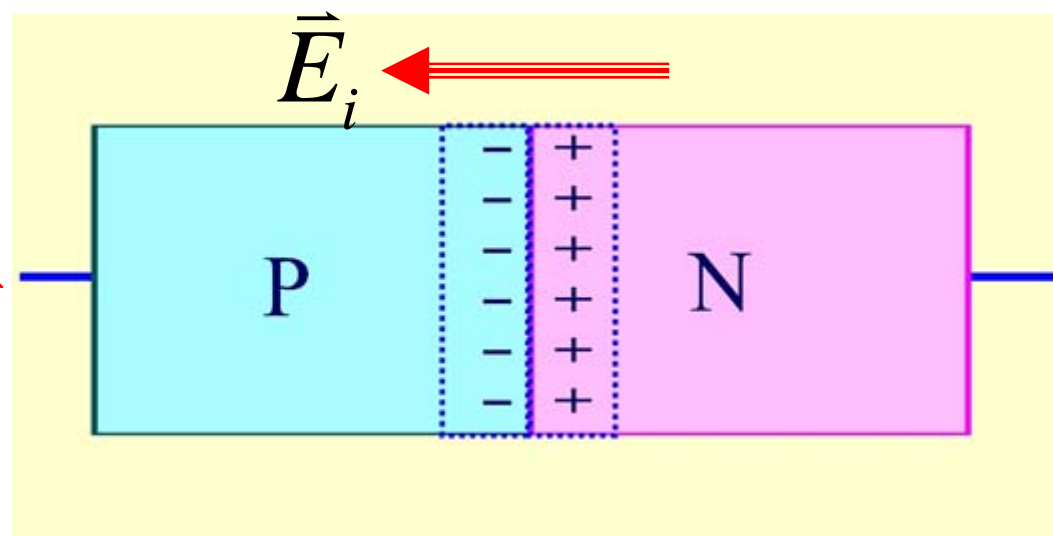
正负载流子在PN结处聚集，在PN结内部形成电场——自建场

——电场对于N区的电子和P区的空穴是一个势垒

——势垒阻止N区大浓度的电子向P区扩散

——势垒阻止P区大浓度的空穴向N区扩散

平衡PN结 —— 载流子的扩散和漂移运动的相对平衡



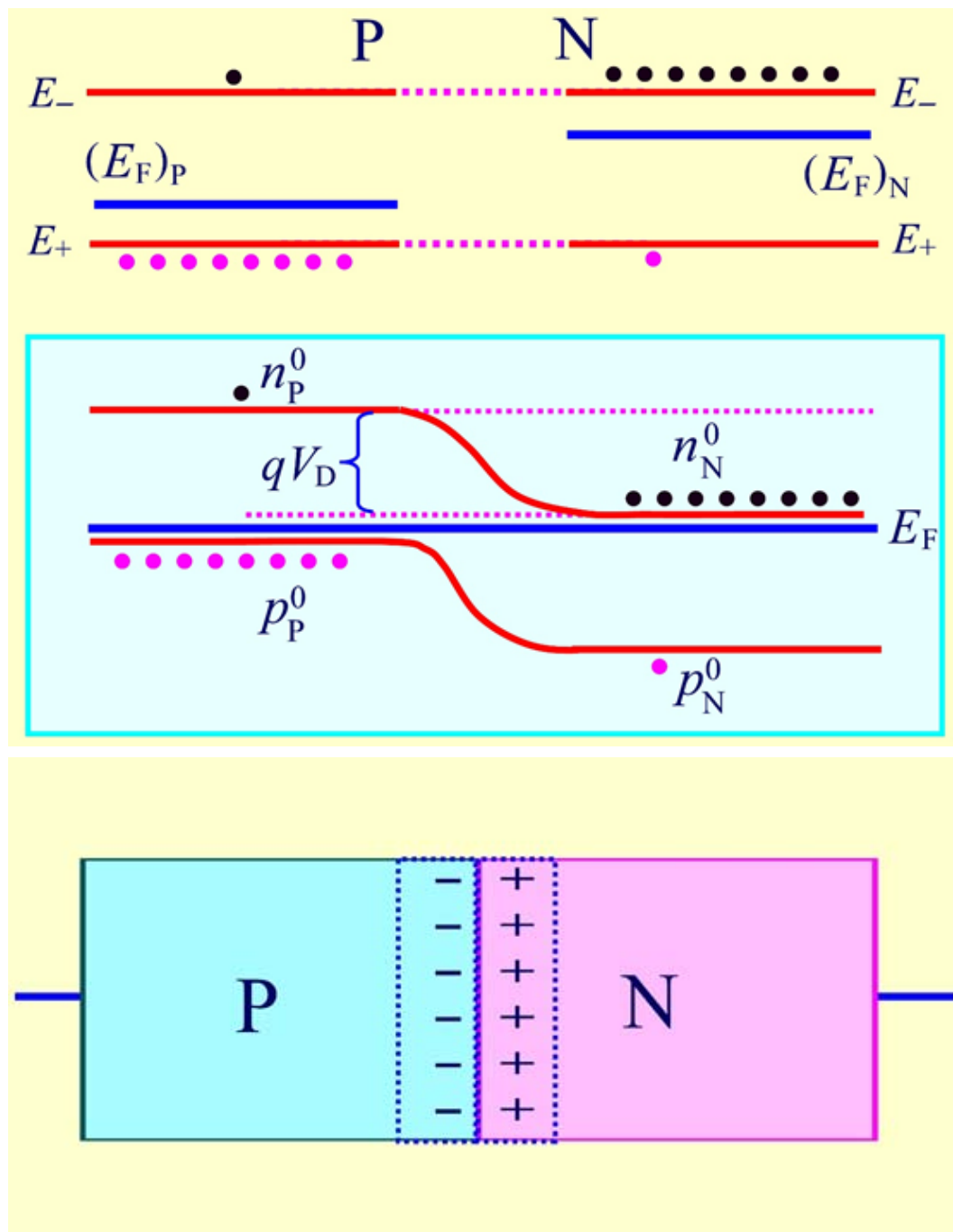
P区电子的能量向上移动

—— 抵消原来**P**区和**N**区电子费密能级的差别
且有

$$qV_D = (E_F)_N - (E_F)_P$$

—— 半导体中载流子浓度远远低于金属

—— **PN**结处形成的电荷空间分布区域约在微米数量级



扩散和漂移形成平衡电荷分布，满足玻耳兹曼统计规律

热平衡下N区和P区电子浓度

$$n_N^0 = N_- e^{-\frac{E_- - E_F}{k_B T}}$$

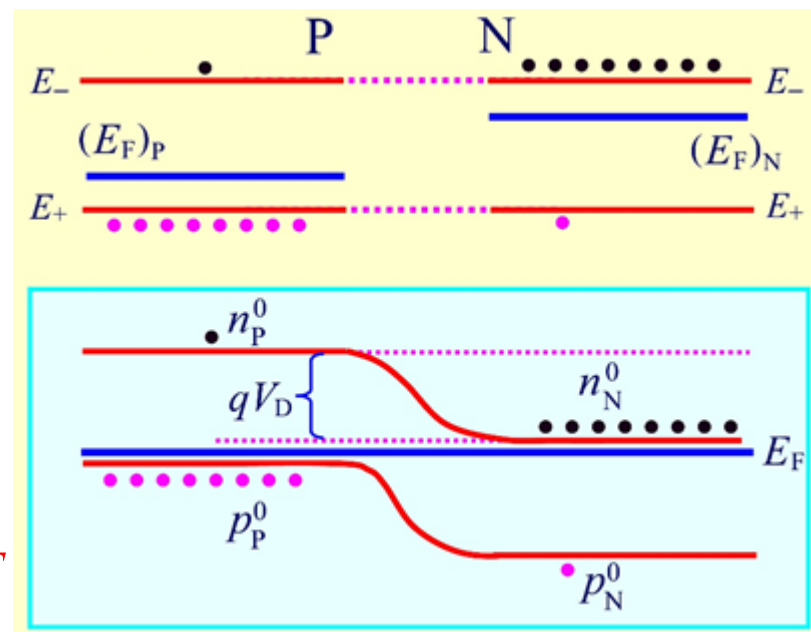
$$n_P^0 = N_- e^{-\frac{(E_- + qV_D) - E_F}{k_B T}}$$

—— P区和N区电子浓度之比

$$\frac{n_P^0}{n_N^0} = e^{-qV_D/k_B T} \quad n_P^0 = n_N^0 e^{-qV_D/k_B T}$$

—— N区和P区空穴浓度之比

$$\frac{p_N^0}{p_P^0} = e^{-qV_D/k_B T} \quad p_N^0 = p_P^0 e^{-qV_D/k_B T}$$



2. PN结的正向注入

当PN结加有正向偏压 —— **P区为正电压**

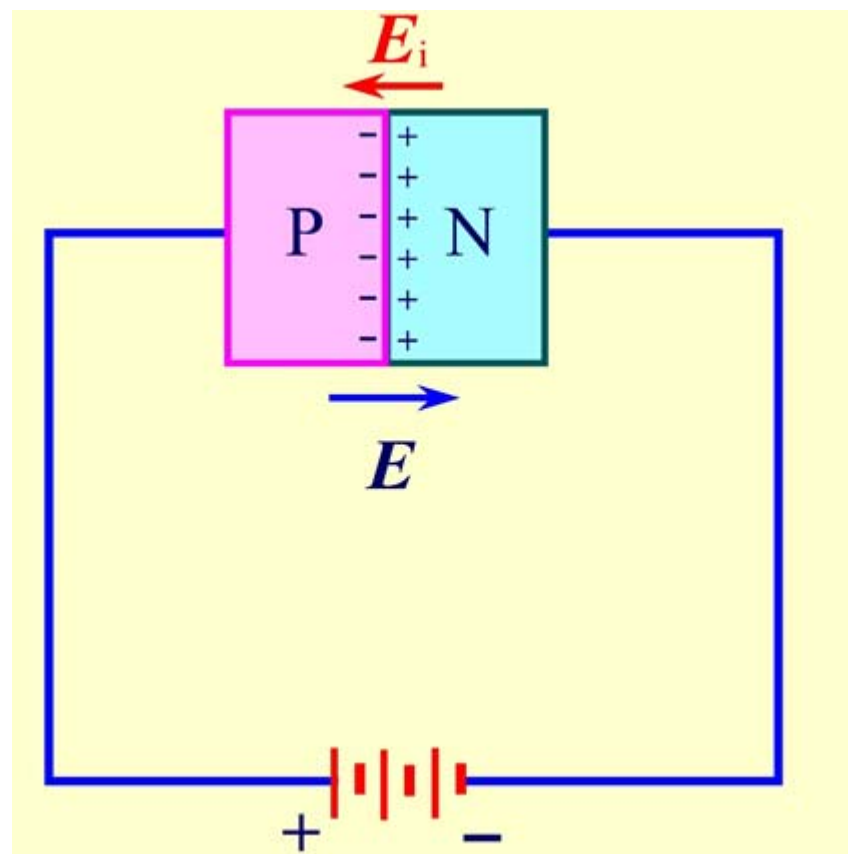
外电场与自建场方向相反，外电场减弱PN结区的电场，使原有的载流子平衡受到破坏

电子 → N区**扩散到P区**

空穴 → P区**扩散到N区**

—— 非平衡载流子

—— PN结的正向注入



电子扩散电流密度

正向注入，P区边界
电子的浓度变为

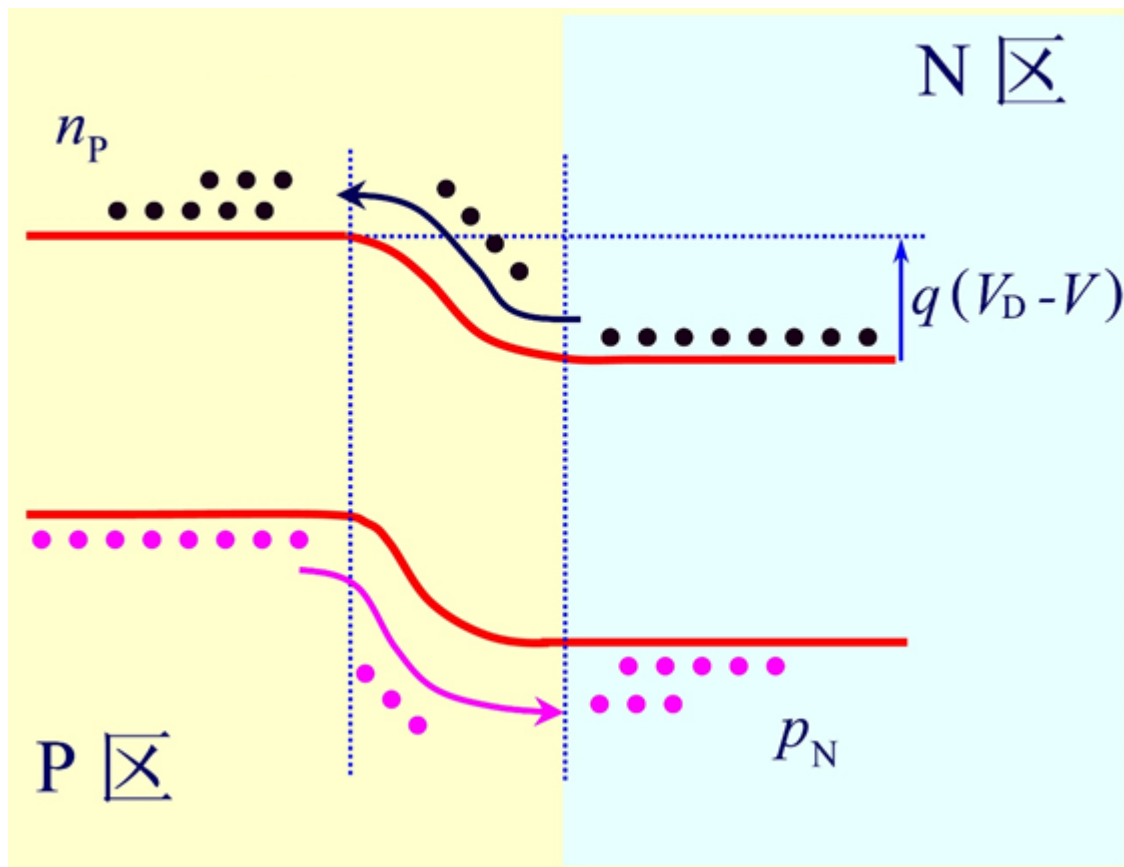
$$n_P = n_N^0 e^{-q(V_D - V)/k_B T}$$

$$\text{和 } n_P^0 = n_N^0 e^{-qV_D/k_B T}$$

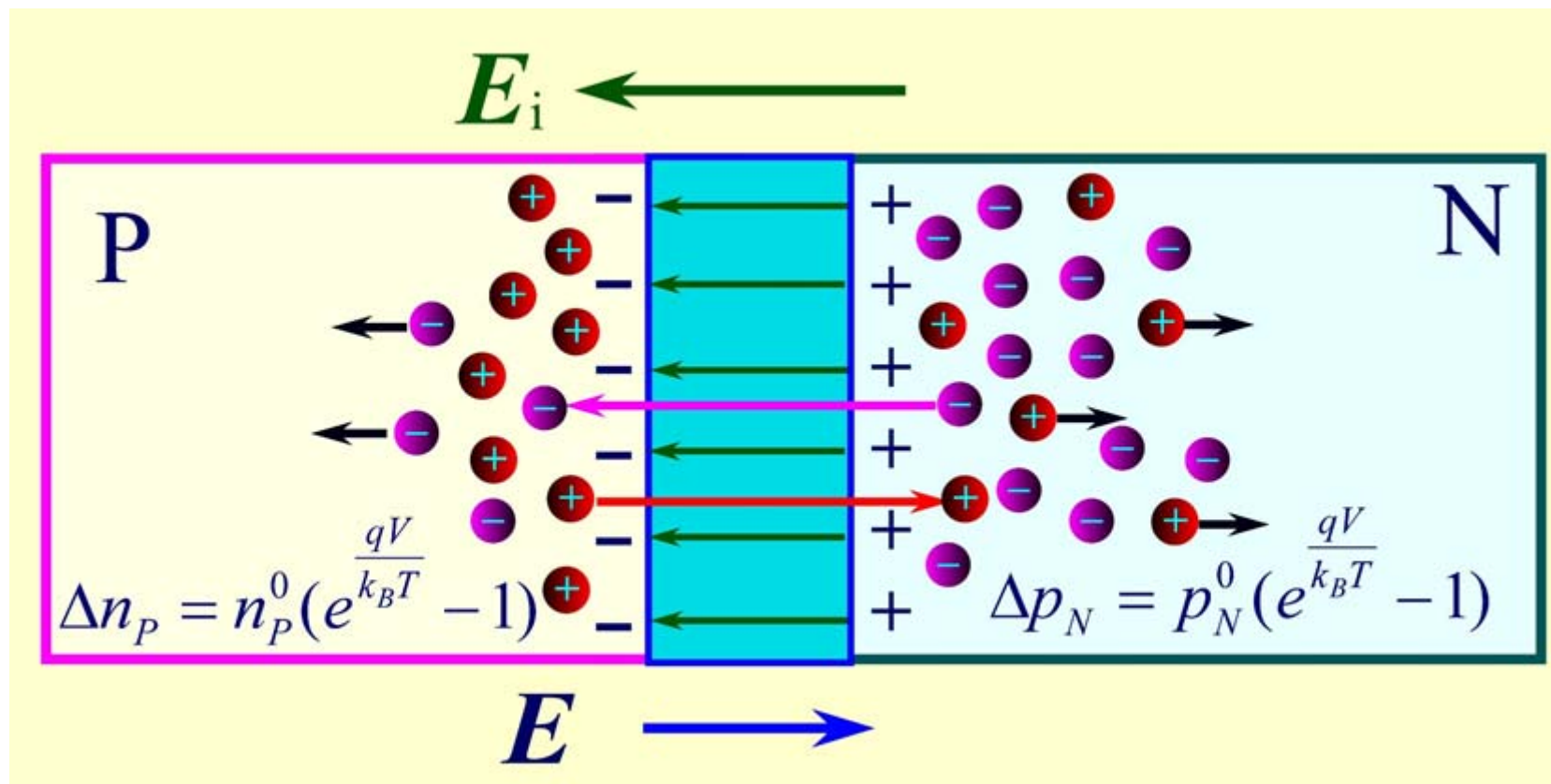
比较得到

$$n_P = n_P^0 e^{qV/k_B T}$$

—— 外加电场使边界处电子的浓度提高 $e^{qV/k_B T}$ 倍



边界处非平衡载流子浓度 $n_P - n_P^0 = n_P^0 (e^{qV/k_B T} - 1)$



- 正向注入的电子在P区边界积累，同时向P区扩散
- 非平衡载流子边扩散、边复合形成电子电流

边界处非平衡载流子浓度 $n_P - n_P^0 = n_P^0 (e^{qV/k_B T} - 1)$

—— 正向注入电子在P区边界积累，同时向P区扩散，非平衡载流子边扩散、边复合形成电子电流

应用非平衡载流子密度方程 $-D \frac{dN}{dx} = N_0 \frac{D}{L} e^{-x/L}$

边界处 $x = 0$ $N_0 = n_P^0 (e^{qV/k_B T} - 1)$

电子扩散流密度 $n_P^0 (e^{qV/k_B T} - 1) \frac{D_n}{L_n}$

D_n and L_n —— 电子的扩散系数和扩散长度

注入到P区的电子电流密度 $j_n = -qn_p^0(e^{qV/k_BT} - 1)\frac{D_n}{L_n}$

——在N区边界空穴积累，同时向N区扩散，也是非平衡载流子边扩散、边复合形成空穴电流

注入到N区的空穴电流密度 $j_p = -qp_N^0(e^{qV/k_BT} - 1)\frac{D_p}{L_p}$

PN结总的电流密度 $j = j_n + j_p = -j_0(e^{qV/k_BT} - 1)$

$j_0 = q\left(\frac{D_n}{L_n}n_p^0 + \frac{D_p}{L_p}p_N^0\right)$ —— 肖克莱方程 (W. Shockley)

$$j = -j_0(e^{qV/k_B T} - 1)$$

结果讨论

- 1) 当正向电压V增加时，电流增加很快
- 2) PN结的电流和N区少子 p_N^0 、P区少子 n_P^0 成正比

$$j_0 = q\left(\frac{D_n}{L_n}n_P^0 + \frac{D_p}{L_p}p_N^0\right)$$

如果N区掺杂浓度远大于P区掺杂浓度 $n_P^0 \gg p_N^0$

——PN结电流中将以电子电流为主

3. PN结的反向抽取

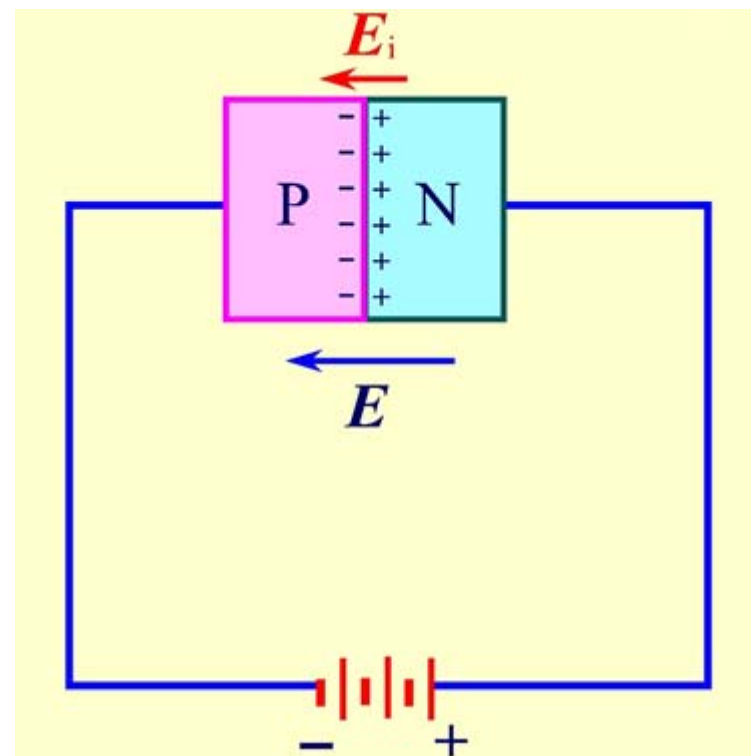
PN结加有反向偏压 —— P区为负电压，外电场与自建场方向相同，势垒增高，载流子的漂移运动超过扩散运动

——只有N区的空穴和P区的电子在结区电场的作用下才能漂移过PN结

N区的空穴一到达边界即被拉到P区
P区的电子一到达边界即被拉到N区
—— PN结方向抽取作用

PN加有反向电压 $V = -V_r$

势垒变为 $q(V_D + V_r)$

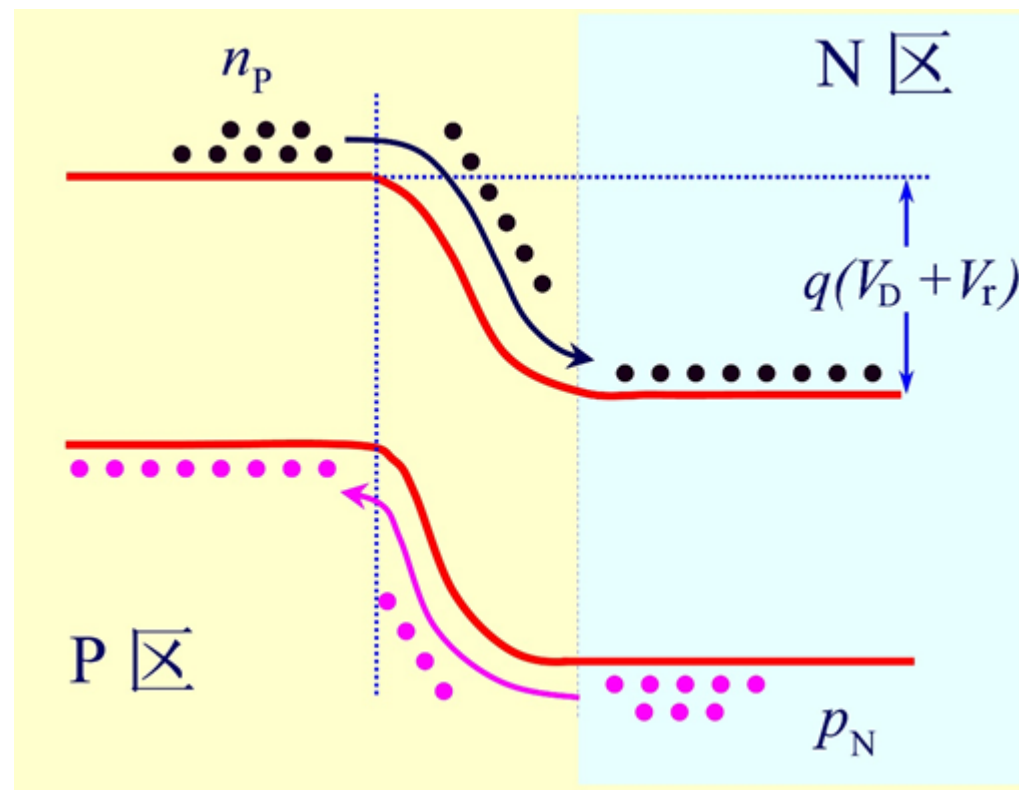


P区边界电子的浓度

$$n_P = n_P^0 e^{-qV_r/k_B T}$$

$$n_P^0 e^{-qV_r/k_B T} \Rightarrow 0$$

—— 反向抽取使边界少子的浓度减小



反向电流 $j = -j_0 (e^{qV/k_B T} - 1)$

$$j = q \left(\frac{D_n}{L_n} n_P^0 + \frac{D_p}{L_p} p_N^0 \right) (1 - e^{-qV_r/k_B T})$$

$$j = q \left(\frac{D_n}{L_n} n_p^0 + \frac{D_p}{L_p} p_N^0 \right) (1 - e^{-qV_r/k_B T})$$

一般情况下 $V_r \gg \frac{k_B T}{q}$

$$j = j_0 = q \left(\frac{D_n}{L_n} n_p^0 + \frac{D_p}{L_p} p_N^0 \right)$$

—— 反向饱和电流

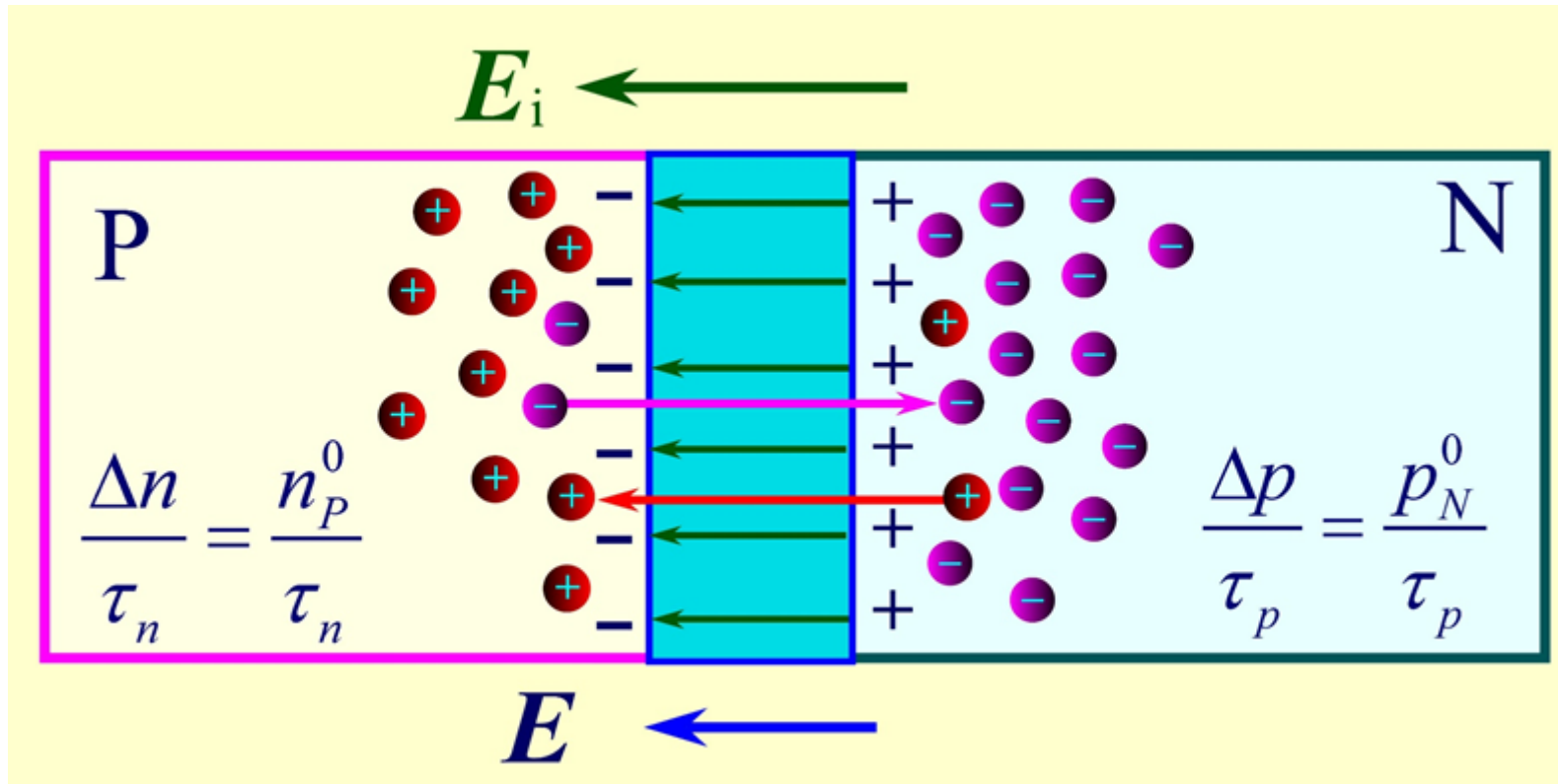
扩散速度 $\frac{D_n}{L_n} = \frac{L_n}{\tau_n}, \quad \frac{D_p}{L_p} = \frac{L_p}{\tau_p}$

$$j_0 = q \left(\frac{n_P^0}{\tau_n} L_n + \frac{p_N^0}{\tau_p} L_p \right)$$

—— **P**区和**N**区少数载流子的产生率 $\frac{n_P^0}{\tau_n}, \frac{p_N^0}{\tau_p}$

P区少数载流子——电子的产生率 $\frac{\Delta n}{\tau_n} = \frac{n_P - n_P^0}{\tau_n} \approx -\frac{n_P^0}{\tau_n}$

N区少数载流子——空穴的产生率 $\frac{\Delta p}{\tau_p} = \frac{p_N - p_N^0}{\tau_p} \approx -\frac{p_N^0}{\tau_p}$



反向电流 —— **PN**结附近所产生的少数载流子又有机会扩散到空间电荷区边界

反向饱和电流 —— 扩散长度一层内，总的少数载流子产生率乘以电子电量 q

§ 7.8 异质结

同质结 —— 由同种半导体材料构成N区或P区，形成的PN结

异质结 —— 两种带隙宽度不同的半导体材料生长在同一块单晶上形成的结

同型异质结 —— 结的两边导电类型相同：NN，PP

异型异质结 —— 结的两边导电类型不相同：NP，PN

两种材料未构成异质PN结之前的能级图

