



# 载流子输运现象

---

西安电子科技大学 XIDIDIAN UNIVERSITY

V1.0 © 2007 韩孝勇 Han XiaoYong

xyhan5151@yahoo.com.cn [www.dianzichan.com](http://www.dianzichan.com)



# 本次课内容

---

- 第5章载流子输运现象
- 5. 1载流子的漂移运动
- 5. 2载流子扩散
- 5. 3杂质梯度分布
- \*5. 4霍尔效应
- 5. 5小结

■ 输运=运输 （土路 公路 铁路 磁悬浮 飞机 火箭... ）

# 5.1 载流子的漂移运动

## 漂移电流密度

- 漂移运动：载流子在外电场作用下的运动
- 漂移电流密度

如果密度为  $\rho$  的正体积电荷以平均漂移速度  $v_d$  运动,则它形成的漂移电流密度为

$$J_{drf} = \rho v_d \quad (5.1)$$

其中  $J$  的单位是  $C/cm^2 \cdot s$  或  $A/cm^2$ 。若体电荷是带正电的空穴,那么

$$J_{p|drf} = (ep)v_{dp} \quad (5.2)$$

其中  $J_{p|drf}$  表示空穴形成的漂移电流密度,  $v_{dp}$  表示空穴的平均漂移速度。

在电场作用下,空穴的运动方程为

$$F = m_p^* a = eE \quad (5.3)$$

其中,  $e$  表示电子电荷电量,  $a$  代表加速度,  $E$  表示电场,  $m_p^*$  为空穴的有效质量。如果电场恒

# 5.1 载流子的漂移运动

## 漂移电流密度

### ■ 用迁移率表示电流密度

联立式(5.2)和式(5.4),可得出空穴漂移电流密度为

$$J_{p|drf} = (ep)v_{dp} = e\mu_p pE \quad (5.5)$$

空穴漂移电流方向与外加电场方向相同。

同理可知电子的漂移电流密度为

$$J_{n|drf} = \rho v_{dn} = (-en)v_{dn} \quad (5.6)$$

其中  $J_{n|drf}$  表示电子的漂移电流密度,  $v_{dn}$  表示电子的平均漂移速度。负号表明电子带负电荷。

弱电场情况下,电子的平均漂移速度也与电场强度成正比。但是由于电子带负电,电子的运动与电场方向相反,所以

$$v_{dn} = -\mu_n E \quad (5.7)$$

其中  $\mu_n$  表示电子的迁移率,为正值。现在式(5.6)可以改写为

$$J_{n|drf} = (-en)(-\mu_n E) = e\mu_n nE \quad (5.8)$$

虽然电子运动的方向与电场方向相反,但是电子漂移电流的方向与外加电场方向相同。

# 5.1 载流子的漂移运动

## 漂移电流密度

### ■ 迁移率的值

电子和空穴的迁移率是温度与掺杂浓度的函数。表 5.1 给出了  $T = 300\text{ K}$  时,低掺杂浓度下的一些典型迁移率。

表 5.1  $T = 300\text{ K}$  时,低掺杂浓度下的典型迁移率值

	$\mu_n$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )	$\mu_p$ ( $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )
Si	1350	480
GaAs	8500	400
Ge	3900	1900

电子和空穴对漂移电流都有贡献,所以总漂移电流密度是电子漂移电流密度与空穴漂移电流密度之和,即

$$J_{drf} = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (5.9)$$

# 5.1 载流子的漂移运动

## 漂移电流密度

### ■ 迁移率

在电场的作用下,晶体中的空穴获得加速度,速度增加。当载流子同晶体中的原子相碰撞后,载流子粒子损失了大部分或全部能量。然后粒子将重新开始加速并且获得能量,直到下一次受到散射。这一过程不断重复。因此,在整个过程中粒子将具有一个平均漂移速度。在弱电场情况下,平均漂移速度与电场强度成正比。我们可以写出

$$v_{dp} = \mu_p E \quad (5.4)$$

其中  $\mu_p$  为比例系数,称为空穴迁移率。迁移率是半导体的一个重要参数,它描述了粒子在电场作用下的运动情况。迁移率的单位通常为  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。



# 5.1 载流子的漂移运动 迁移率

式(5.3)说明了空穴的加速度与外力如电场力之间的关系。我们可以将其写为

$$F = m_p^* \frac{dv}{dt} = eE \quad (5.10)$$

其中  $v$  表示在电场作用下的粒子速度,不包括随机热运动速度。如果电场和有效质量是常数,假设初始漂移速度为零,对式(5.10)积分得

$$v = \frac{eEt}{m_p^*} \quad (5.11)$$

图 5.1a 是无外加电场的情况下,半导体中空穴的随机热运动示意模型。 $\tau_{cp}$  表示碰撞之间的平均时间。如图 5.1b 所示,如果外加一个小电场(电场  $E$ ),空穴将在电场  $E$  的方向上发生漂移,但是它的漂移速度仅是随机热运动速度的微小扰动,平均碰撞时间不会显著变化。如果把式(5.11)中的时间  $t$  替换为平均碰撞时间  $\tau_{cp}$ ,则碰撞或散射前粒子的平均最大速度为

$$v_{d|peak} = \left( \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*} \right) E \quad (5.12a)$$

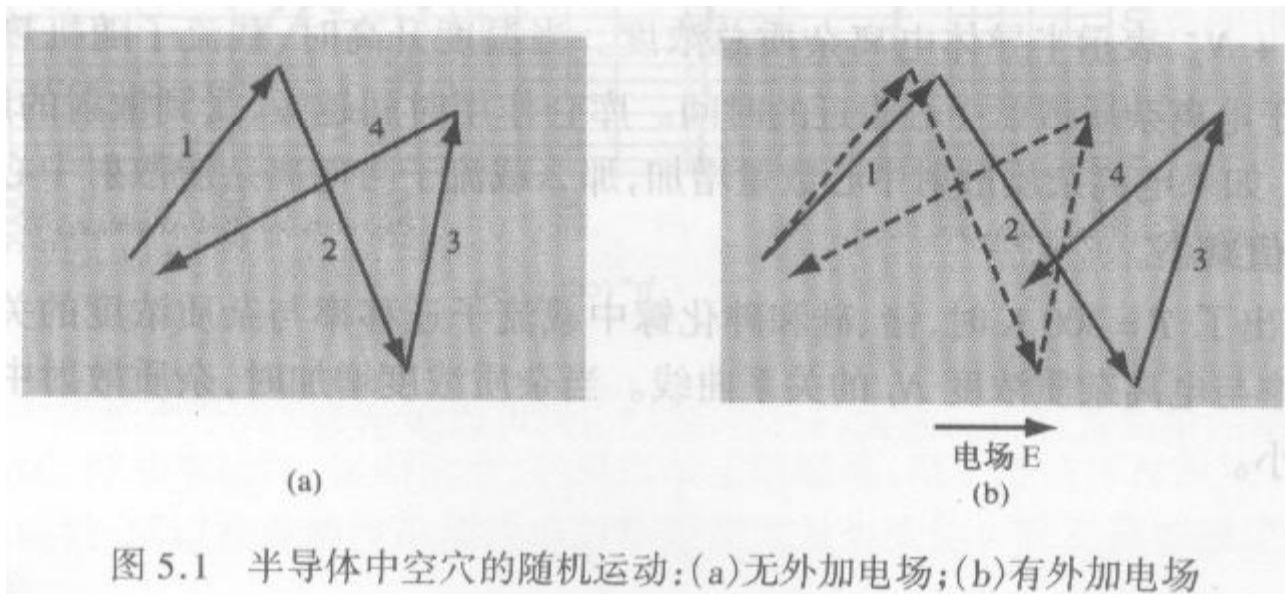
可见平均漂移速度为最大速度的一半,所以有

$$\langle v_d \rangle = \frac{1}{2} \left( \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*} \right) E \quad (5.12b)$$

# 5.1 载流子的漂移运动

迁移率

- 电场对载流子的作用





# 5.1 载流子的漂移运动 迁移率

- 空穴迁移率

$$\mu_p = \frac{v_{dp}}{E} = \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*}$$

- 电子迁移率

$$\mu_n = \frac{e\tau_{cn}}{m_n^*}$$

# 5.1 载流子的漂移运动 迁移率

## ■ 声子散射和电离杂质散射

当温度高于绝对零度时,半导体晶体中的原子具有一定的热能,在其晶格位置上做无规则热振动。晶格振动破坏了理想周期性势场。固体的理想周期性势场允许电子在整个晶体中自由运动,而不会受到散射。但是热振动破坏了势函数,导致载流子电子、空穴与振动的晶格原子发生相互作用。这种晶格散射也称为声子散射。

另一种影响载流子迁移率的散射机制称为电离杂质散射。掺入半导体的杂质原子可以控制或改变半导体的性质。室温下杂质已经电离,在电子或空穴与电离杂质之间存在库仑作用。库仑作用引起的碰撞或散射也会改变载流子的速度特性。如果定义  $\mu_i$  表示只有电离杂质散

# 5.1 载流子的漂移运动 迁移率

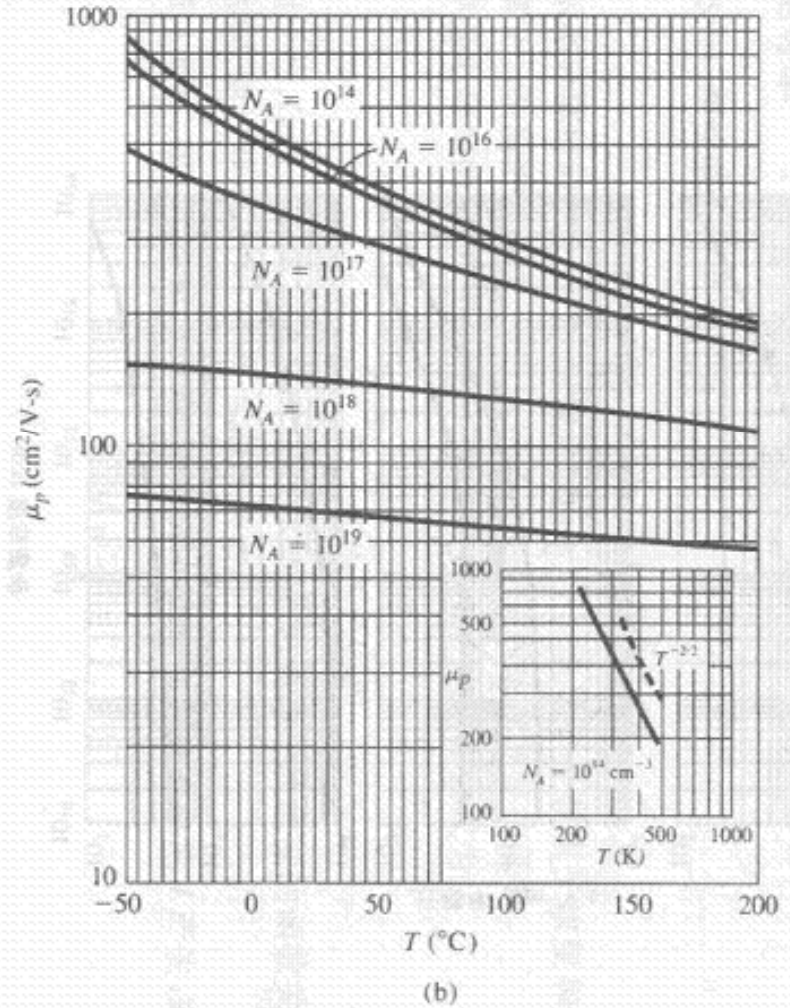
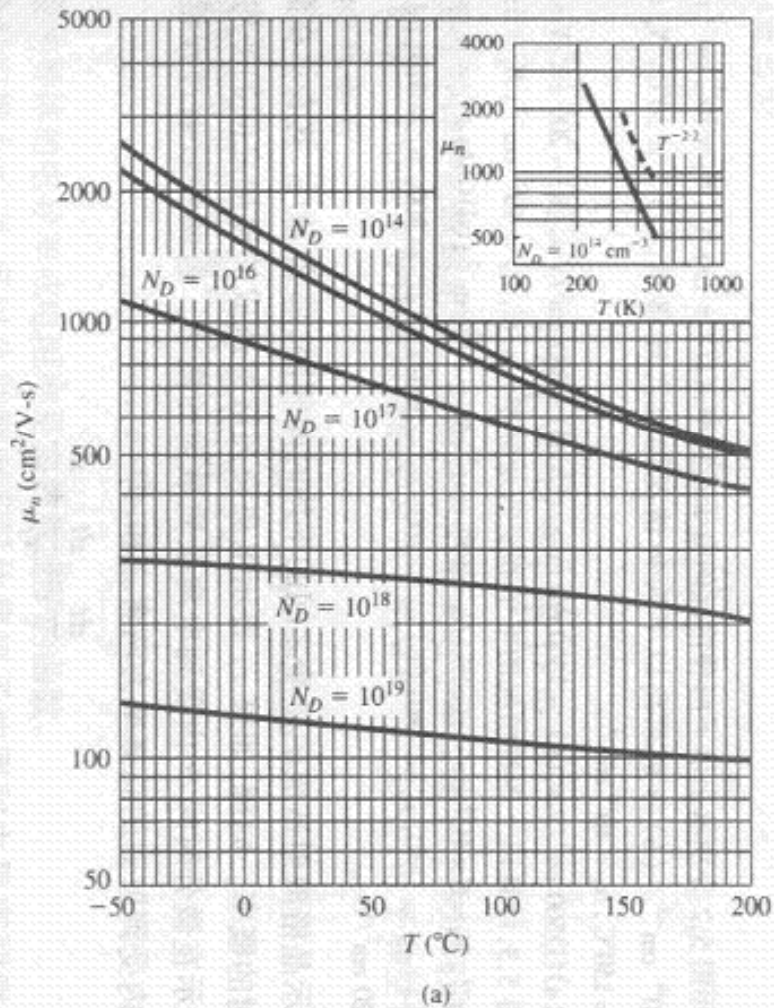
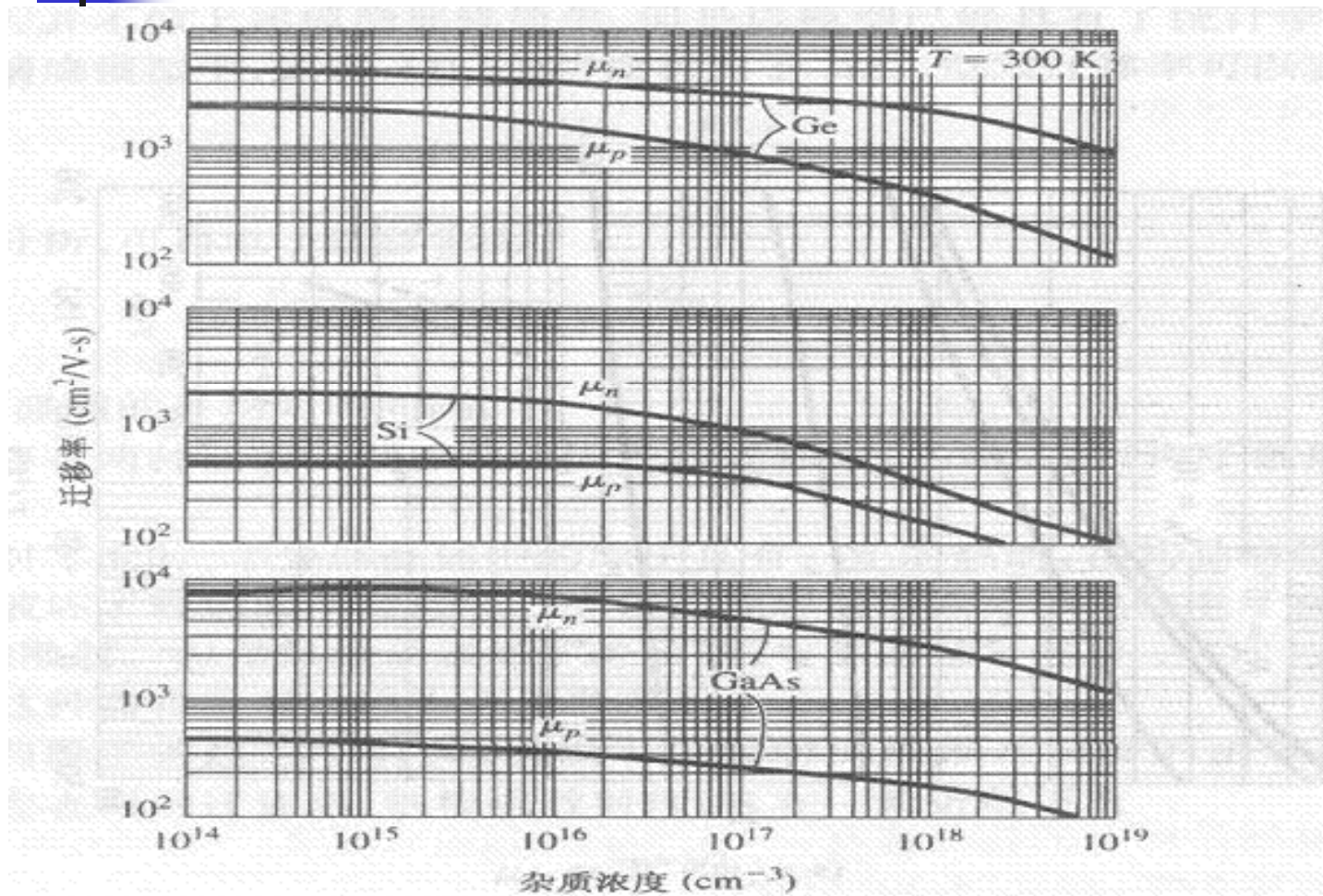


图 5.2 不同掺杂浓度下, 硅中(a)电子和(b)空穴的迁移率-温度曲线。其中的插图为“近似”本征硅的情况

# 5.1 载流子的漂移运动

## 迁移率



$T = 300\text{ K}$  时, 锗、硅、砷化镓中电子和空穴迁移率与杂质浓度的关系



# 5.1 载流子的漂移运动 电导率

由式(5.9), 漂移电流密度可写为

$$J_{drf} = e(\mu_n n + \mu_p p)E = \sigma E \quad (5.19)$$

其中  $\sigma$  表示半导体材料的电导率, 单位是  $(\Omega\text{-cm})^{-1}$ 。电导率是载流子浓度和迁移率的函数。因为迁移率又与杂质浓度有关, 所以电导率是关于杂质浓度的复杂函数。

电阻率是电导率的倒数, 用  $\rho$  表示, 单位为  $\Omega\text{-cm}$ 。电阻率公式为

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (5.20)$$

图5.4 给出了 Si, Ge, GaAs 和 GaP 在  $T = 300\text{ K}$  时电阻率与杂质浓度的函数关系。显然, 由于迁移率的影响, 曲线并不是  $N_d$  或  $N_a$  的线性函数。



## ■ 欧姆定律

如图 5.5 所示,在一个条形半导体材料两端加上电压就会有电流  $I$  产生,则我们有

$$J = \frac{I}{A} \quad (5.21a)$$

和

$$E = \frac{V}{L} \quad (5.21b)$$

将式(5.19)重写为

$$\frac{I}{A} = \sigma \left( \frac{V}{L} \right) \quad (5.22a)$$

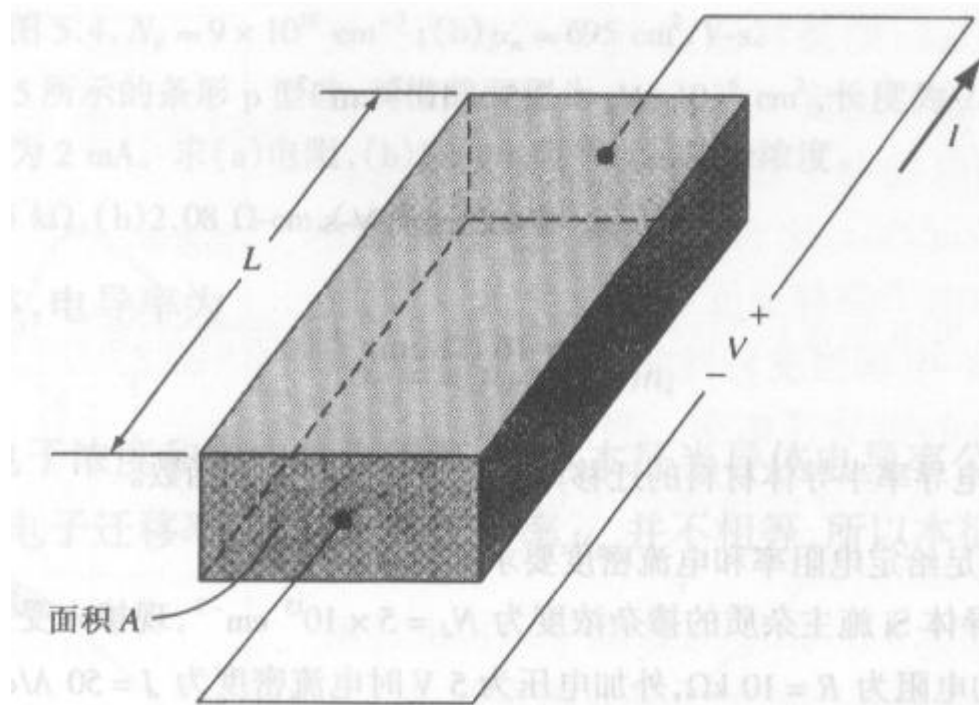
或

$$V = \left( \frac{L}{\sigma A} \right) I = \left( \frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (5.22b)$$

式(5.22b)是半导体中的欧姆定律。电阻是电阻率或电导率以及半导体几何形状的函数。

# 5.1 载流子的漂移运动

## 电导率



# 5.1 载流子的漂移运动 电导率

例如,假设一个 p 型半导体的掺杂浓度为  $N_a$  ( $N_d = 0$ ),  $N_a \gg n_i$ , 电子和空穴迁移率的数量级相同, 则电导率为

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \approx e\mu_p p \quad (5.23)$$

如果仍假设杂质全部电离, 则式(5.23)可改写为

$$\sigma \approx e\mu_p N_a \approx \frac{1}{\rho} \quad (5.24)$$

因此非本征半导体的电导率或电阻率是多数载流子的函数。

# 5.1 载流子的漂移运动

## 电导率

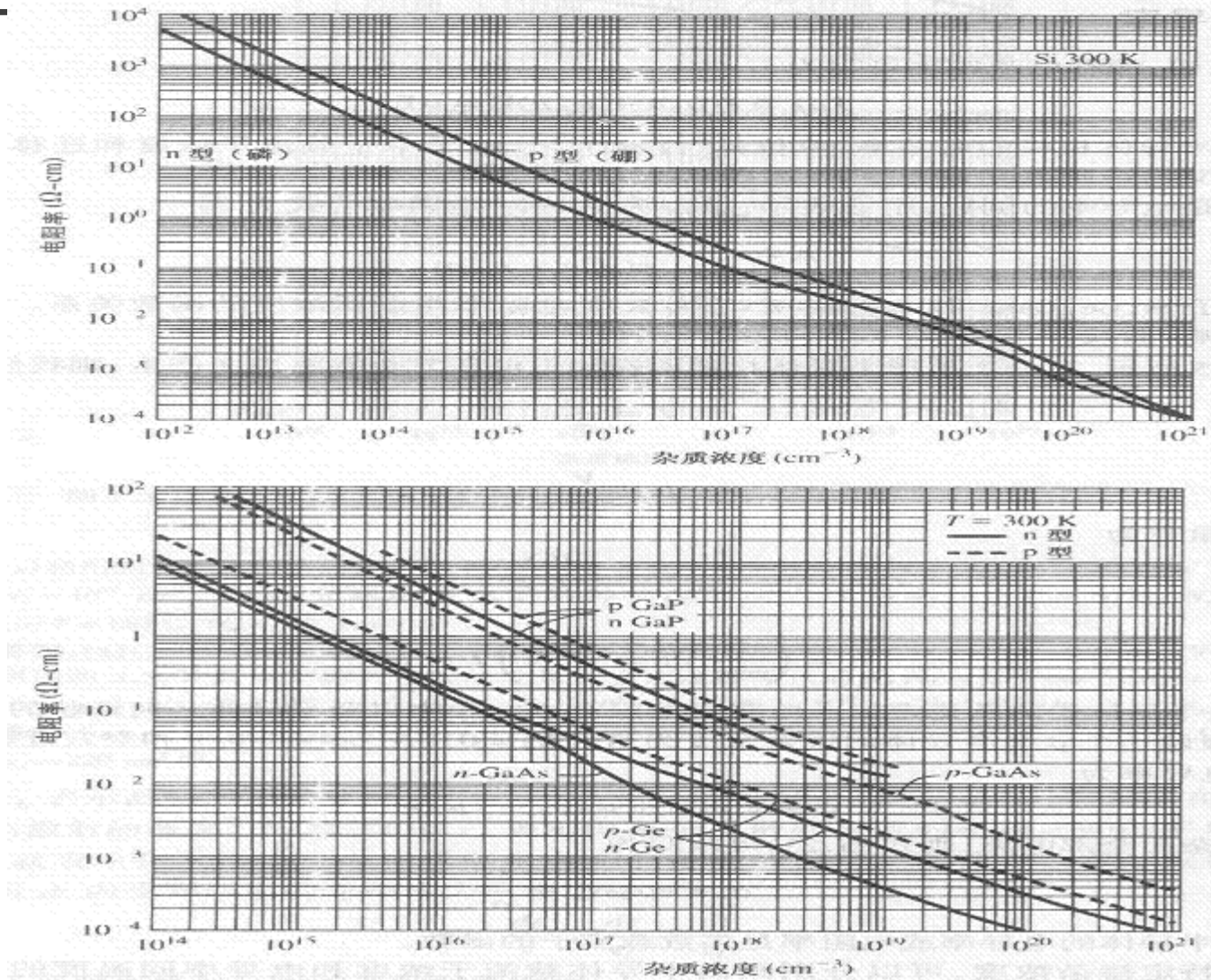


图 5.4 (a)硅和(b)锗、砷化镓、磷化镓在  $T = 300\text{ K}$  时,电阻率与杂质浓度的关系



# 5.1 载流子的漂移运动

## 电导率

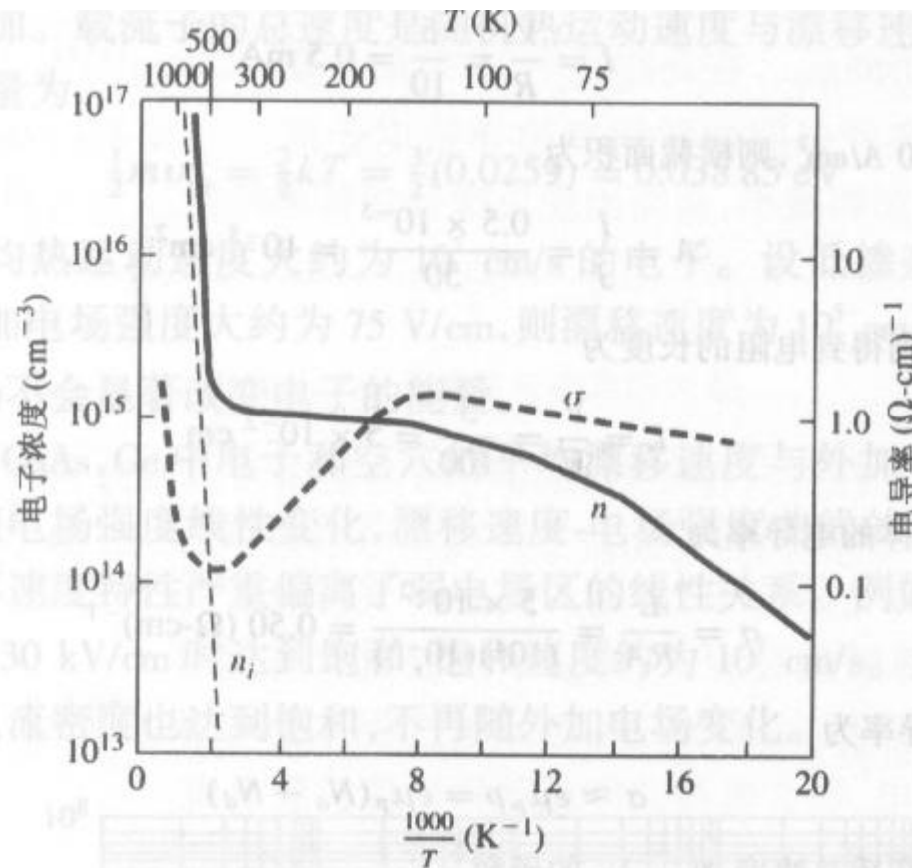


图 5.6 硅中电子浓度-温度倒数的关系曲线和电导率-温度倒数的关系曲线



# 5.1 载流子的漂移运动

## 电导率

对于本征半导体,电导率为

$$\sigma_i = e(\mu_n + \mu_p)n_i \quad (5.25)$$

因为本征半导体的电子浓度和空穴浓度相等,所以本征半导体电导率公式中包括  $\mu_n$  和  $\mu_p$  两个参数。一般来说,电子迁移率  $\mu_n$  和空穴迁移率  $\mu_p$  并不相等,所以本征电导率并不是某给定温度下可能的最小值。

# 半导体的电阻特性

(红线区—电阻：阻碍运输)

- 对于本征半导体，本征激发起决定性因素，所以T升高，电阻下降；
- 对于杂质半导体，在温度很低时，本征电离可忽略，T升高，杂质电离的载流子越来越多，电阻下降；
- 进入室温区，杂质已经全部电离，而本征激发还不重要，T升高，晶格震动散射加剧，电阻升高；
- 高温区，本征激发起主要作用，T升高，本征激发明显，电阻下降。

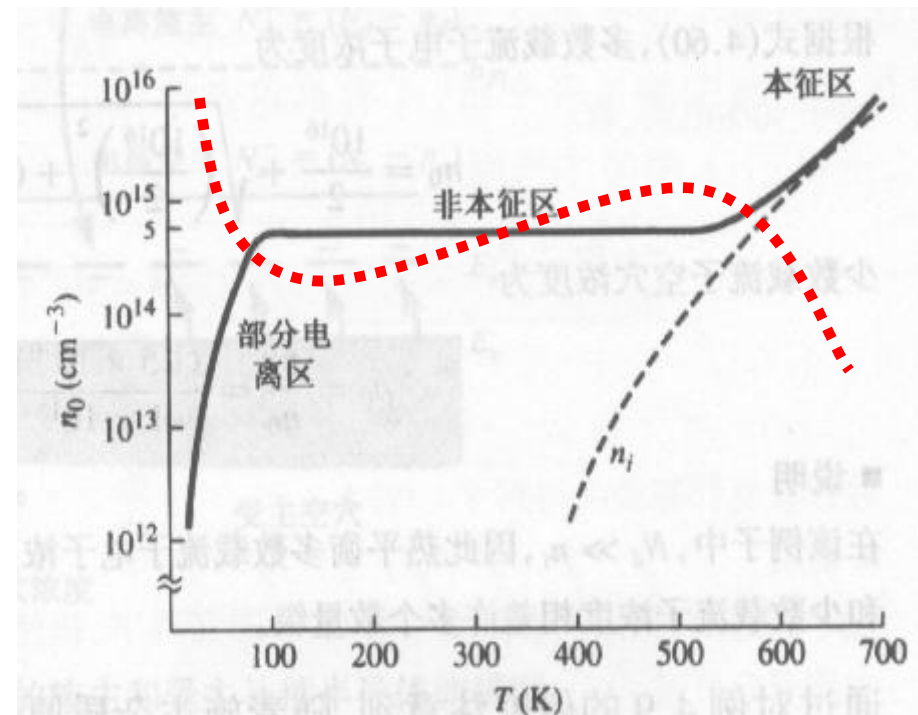


图 4.16 电子浓度与温度的关系,显示了三个区域:部分电离、非本征和本征



# 关于超导

- 1911年，荷兰科学家昂内斯(Ones)用液氦冷却汞，当温度下降到4.2K时，水银的电阻完全消失，这种现象称为超导电性，此温度称为临界温度。
- 为了证实（超导体）电阻为零，科学家将一个铅制的圆环，放入温度低于 $T_c=7.2K$ 的空间，利用电磁感应使环内激发起感应电流。结果发现，环内电流能持续下去，从1954年3月16日始，到1956年9月5日止，在两年半的时间内的电流一直没有衰减，这说明圆环内的电能没有损失，当温度升到高于 $T_c$ 时，圆环由超导状态变正常态，材料的电阻骤然增大，感应电流立刻消失，这就是著名的昂内斯持久电流实验。
- 【超导电子计算机】 一个超高速计算机的体积应限制在  $15 \times 15 \times 15$  立方厘米的范围里。超导计算机没有功率耗散问题。

# 5.1 载流子的漂移运动

饱和速度

- 载流子的运动速度不再随电场增加而增加

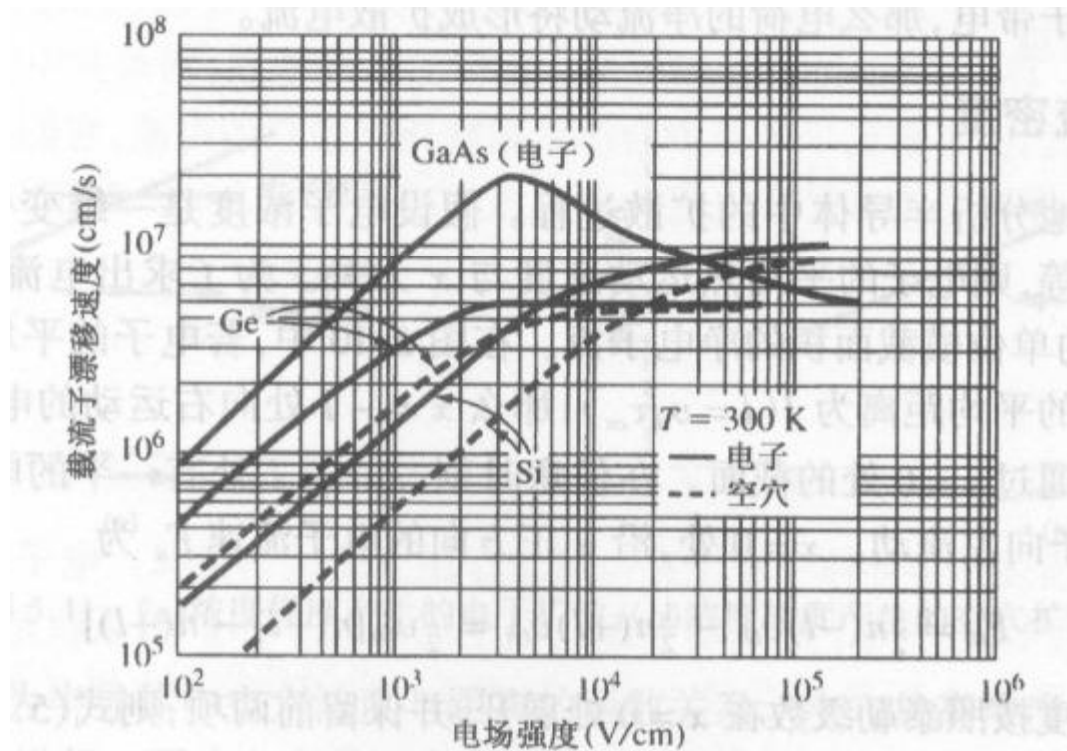


图 5.7 高纯 Si, GaAs 和 Ge 中载流子漂移速度与外加电场的关系

# 5.1 载流子的漂移运动

## 饱和速度

下面通过讨论如图 5.8 所示的 GaAs 能带结构来理解负微分迁移率的含义:低能谷中的电子有效质量为  $m_n^* = 0.067m_0$ 。有效质量越小,迁移率就越大。随着电场强度的增加,低能谷电子能量也相应增加,并可能被散射到高能谷中,有效质量变为  $0.55m_0$ 。在高能谷中,有效质量变大,迁移率变小。这种多能谷间的散射机构导致电子的平均漂移速度随电场增加而减小,从而出现负微分迁移率。

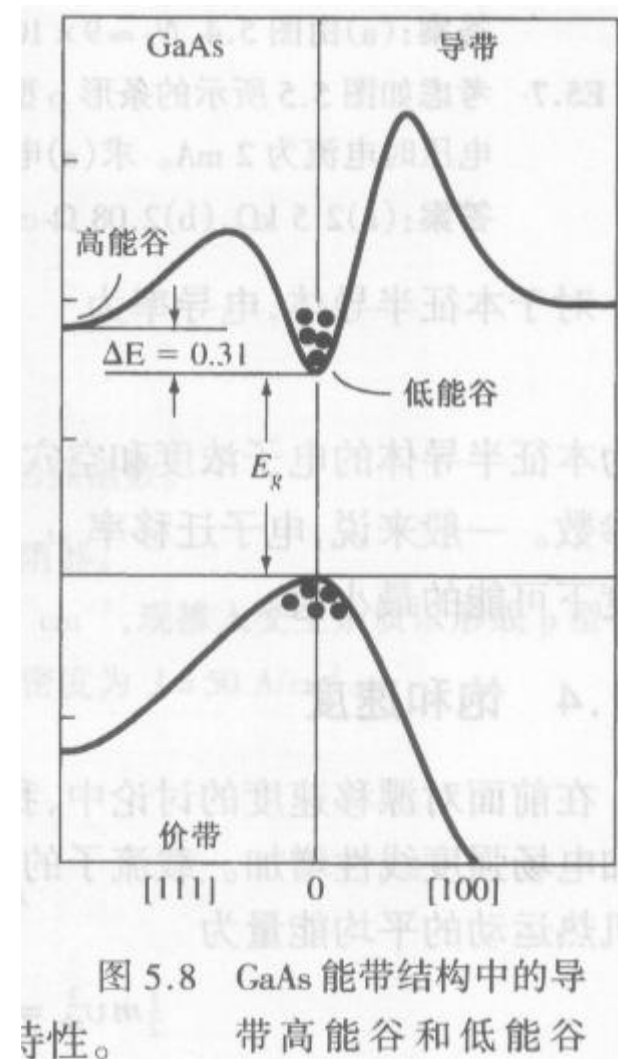


图 5.8 GaAs 能带结构中的导带高能谷和低能谷特性。



## 5.2 载流子的扩散运动

- 扩散\_\_从高浓度向低浓度迁移
- 扩散电流密度:

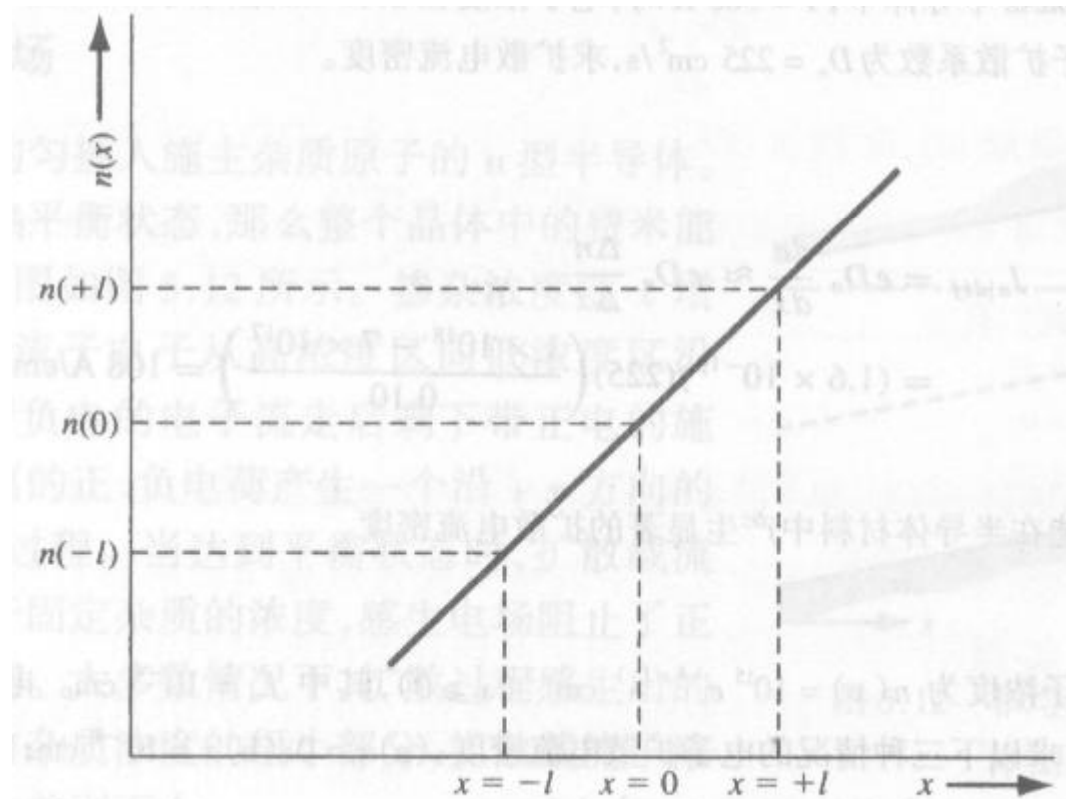


图 5.10 电子浓度与距离的关系

## 5.2 载流子的扩散运动

(SE.2) 5.3 杂质梯度分布

电子电荷电量为  $(-e)$ , 所以电流密度为

到目前为止, 多数情况下都假设半导体均匀掺杂。下面将通过分析非均匀掺杂区。

$$F_n = -v_{th} l \frac{dn}{dx}$$
$$J = -e F_n = +e v_{th} l \frac{dn}{dx}$$

## 5.2 载流子的扩散运动

在此例中,电子从高浓度区向低浓度区的扩散沿负  $x$  方向进行。因为电子带负电荷,所以电流方向沿正  $x$  方向,如图 5.11a 所示。对此一维情况,可以将电子扩散电流密度表示为

$$J_{nx|dif} = eD_n \frac{dn}{dx} \quad (5.31)$$

其中  $D_n$  为电子扩散系数,其值为正,单位为  $\text{cm}^2/\text{s}$ 。如果电子浓度梯度为负,电子扩散电流密度将沿负  $x$  方向。

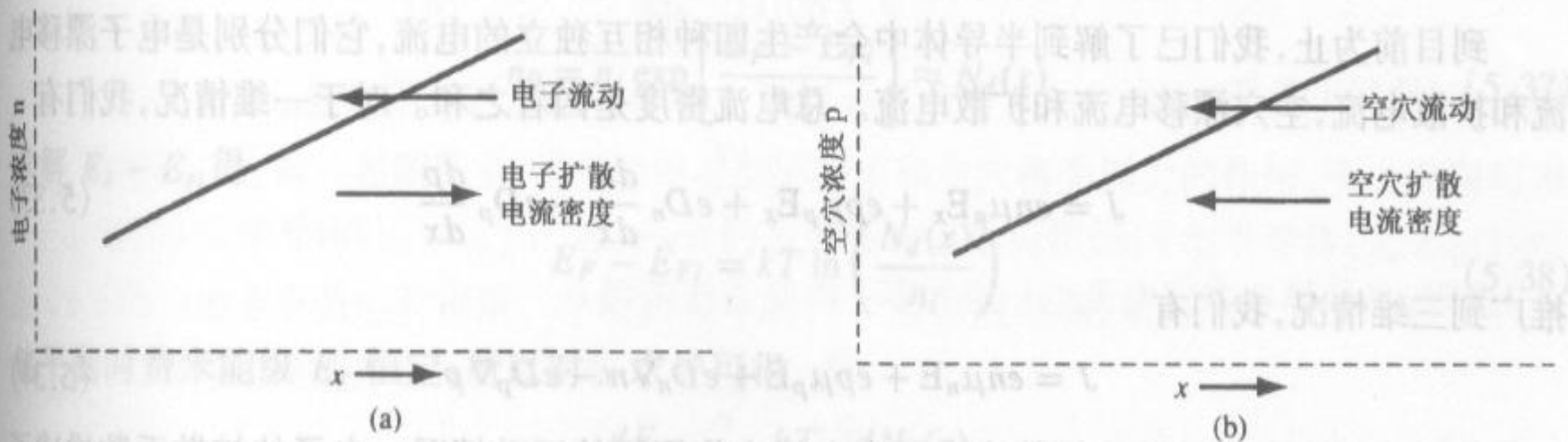


图 5.11 (a)浓度梯度产生的电子扩散;(b)浓度梯度产生的空穴扩散

## 5.2 载流子的扩散运动

### ■ 总电流密度

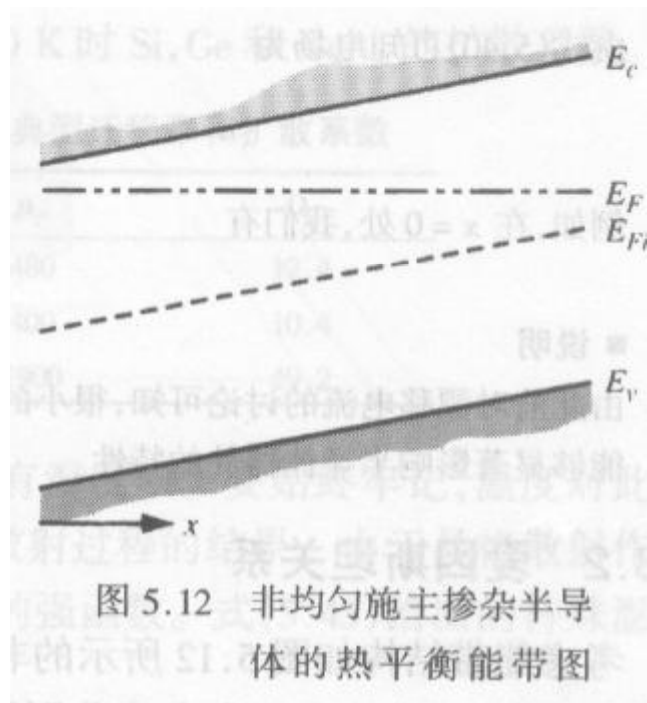
到目前为止,我们已了解到半导体中会产生四种相互独立的电流,它们分别是电子漂移电流和扩散电流,空穴漂移电流和扩散电流。总电流密度是四者之和。对于一维情况,我们有

$$J = en\mu_n E_x + ep\mu_p E_x + eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (5.33)$$

推广到三维情况,我们有

$$J = en\mu_n E + ep\mu_p E + eD_n \nabla n - eD_p \nabla p \quad (5.34)$$

## 5.3 杂质的浓度梯度





## 5.3 杂质的浓度梯度

电势 $\phi$ 等于电子势能除以电子电量 $(-e)$ ,即

$$\phi = +\frac{1}{e}(E_F - E_{Fi}) \quad (5.35)$$

一维情况下感生电场定义为

$$E_x = -\frac{d\phi}{dx} = \frac{1}{e} \frac{dE_{Fi}}{dx} \quad (5.36)$$

如果处于热平衡状态的半导体中本征费米能级随着距离变化,那么半导体内将存在一个电场。

若假设满足准中性条件,即电子浓度与施主杂质浓度基本相等,则有

$$n_0 = n_i \exp\left[\frac{E_F - E_{Fi}}{kT}\right] \approx N_d(x) \quad (5.37)$$

求解  $E_F - E_{Fi}$  得

$$E_F - E_{Fi} = kT \ln\left(\frac{N_d(x)}{n_i}\right) \quad (5.38)$$

热平衡时费米能级  $E_F$  恒定,所以对  $x$  求导可得

$$-\frac{dE_{Fi}}{dx} = \frac{kT}{N_d(x)} \frac{dN_d(x)}{dx} \quad (5.39)$$

联立式(5.39)和式(5.36),解得电场为

$$E_x = -\left(\frac{kT}{e}\right) \frac{1}{N_d(x)} \frac{dN_d(x)}{dx} \quad (5.40)$$

由于存在电场,非均匀掺杂将使半导体中的电势发生变化。

## 5.3 杂质的浓度梯度

### 爱因斯坦关系

考虑能带结构如图 5.12 所示的非均匀掺杂半导体。假设没有外加电场,半导体处于热平衡状态,则电子电流和空穴电流分别等于零。可写为

$$J_n = 0 = en\mu_n E_x + eD_n \frac{dn}{dx} \quad (5.41)$$

设半导体满足准中性条件,即  $n \approx N_d(x)$ ,则式(5.41)可写为

$$J_n = 0 = e\mu_n N_d(x)E_x + eD_n \frac{dN_d(x)}{dx} \quad (5.42)$$

将式(5.40)给出的电场表达式代入式(5.42),可得

$$0 = -e\mu_n N_d(x) \left( \frac{kT}{e} \right) \frac{1}{N_d(x)} \frac{dN_d(x)}{dx} + eD_n \frac{dN_d(x)}{dx} \quad (5.43)$$

式(5.43)适用于条件

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{kT}{e} \quad (5.44a)$$

同理,半导体中空穴电流也一定为零。由此条件得到

$$\frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} \quad (5.44b)$$

联立式(5.44a)和式(5.44b),可得

$$\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{kT}{e} \quad (5.45)$$

扩散系数和迁移率不是彼此独立的参数。式(5.45)给出的扩散系数和迁移率之间的关系称为爱因斯坦关系。

## 5.3 杂质的浓度梯度

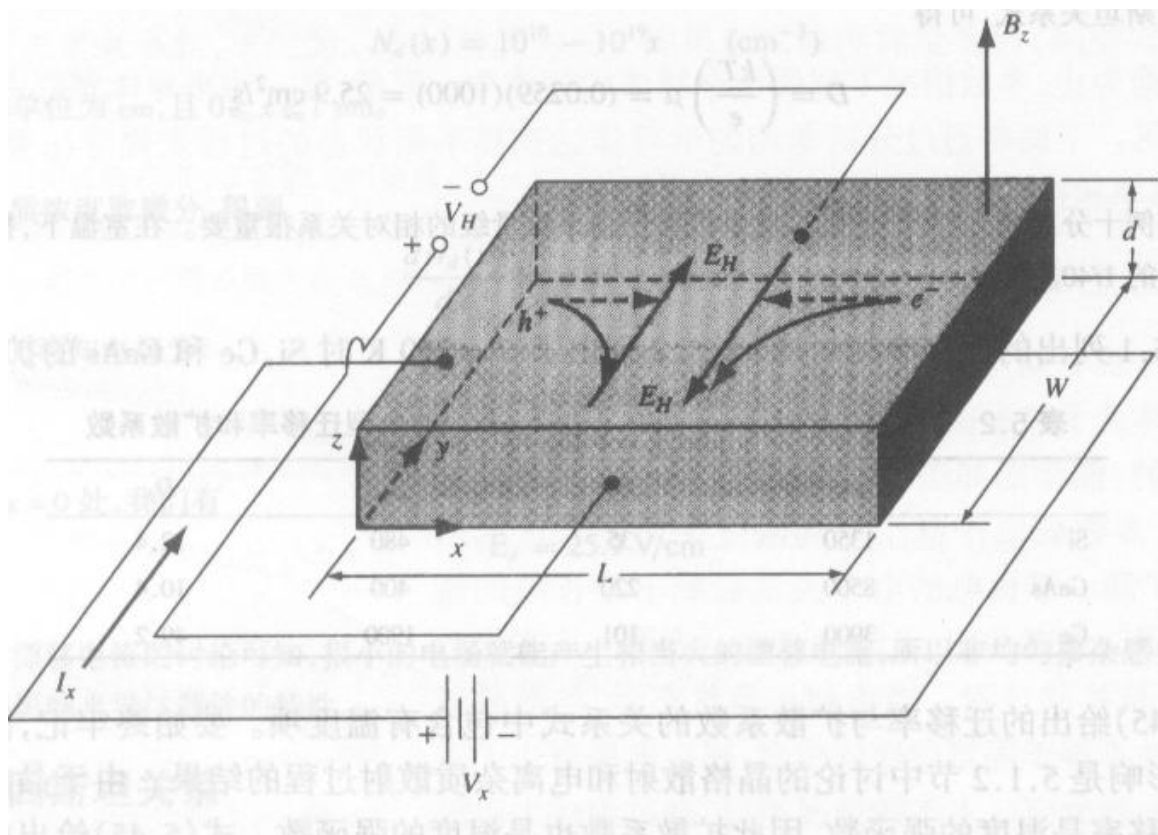
### ■ 典型迁移率及扩散系数

表 5.2  $T = 300 \text{ K}$  时 ( $\mu = \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ,  $D = \text{cm}^2/\text{s}$ ) 的典型迁移率和扩散系数

	$\mu_n$	$D_n$	$\mu_p$	$D_p$
Si	1350	35	480	12.4
GaAs	8500	220	400	10.4
Ge	3900	101	1900	49.2

## 5.4 霍尔效应

电场和磁场对运动电荷施加力的作用产生的效应称为霍尔效应。



$y$  方向的感生电场称为霍尔电场。霍尔电场在半导体内产生的电压称为霍尔电压



## 5.4 霍尔效应

### ■ 作用：确定半导体类型和浓度及迁移率

例 5.7 已知霍尔效应参数,求多数载流子的浓度和迁移率。如图 5.13 所示,令  $L = 10^{-1}$  cm,  $W = 10^{-2}$  cm,  $d = 10^{-3}$  cm。设  $I_x = 1.0$  mA,  $V_x = 12.5$  V,  $V_H = -6.25$  mV,  $B_z = 500$  Gs =  $5 \times 10^{-2}$  T。

■ 解

霍尔电压为负,所以半导体为 n 型。使用式(5.54),可计算出电子浓度为

$$n = \frac{-(10^{-3})(5 \times 10^{-2})}{(1.6 \times 10^{-19})(10^{-5})(-6.25 \times 10^{-3})} = 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} = 5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$$

使用式(5.58),可计算出电子迁移率为

$$\mu_n = \frac{(10^{-3})(10^{-3})}{(1.6 \times 10^{-19})(5 \times 10^{21})(12.5)(10^{-4})(10^{-5})} = 0.10 \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

或

$$\mu_n = 1000 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

■ 说明

注意,霍尔效应公式中必须使用统一的米-千克-秒(MKS)单位制才能得到正确的结果。



## 5.5小结

- 半导体中的两种基本输运机构:电场作用下的漂移运动和浓度梯度作用下的扩散运动。
- 存在外加电场时,在散射作用下载流子达到平均漂移速度。半导体内存在两种散射过程,即晶格散射和电离杂质散射。
- 在弱电场下,平均漂移速度是电场强度的线性函数;而在强电场下,漂移速度达到饱和,其数量级为  $10^7$  cm/s。
- 载流子迁移率为平均漂移速度与外加电场之比。电子和空穴迁移率是温度以及电离杂质浓度的函数。
- 漂移电流密度为电导率和电场强度的乘积(欧姆定律的一种表示)。电导率是载流子浓度和迁移率的函数。电阻率等于电导率的倒数。
- 扩散电流密度与载流子扩散系数和载流子浓度梯度成正比。
- 扩散系数和迁移率的关系称为爱因斯坦关系。
- 霍尔效应是载流子电荷在相互垂直的电场和磁场中运动产生的。载流子发生偏转,感生出霍尔电压。霍尔电压的正负反映了半导体的导电类型。还可以由霍尔电压确定多数载流子浓度和迁移率。



# 重要术语解释

**电导率:**关于载流子漂移的材料参数;可量化为漂移电流密度和电场强度之比。

**扩散:**粒子从高浓度区向低浓度区运动的过程。

**扩散系数:**关于粒子流动与粒子浓度梯度之间的参数。

**扩散电流:**载流子扩散形成的电流。

**漂移:**在电场作用下,载流子的运动过程。

**漂移电流:**载流子漂移形成的电流。

**漂移速度:**电场中载流子的平均漂移速度。

**爱因斯坦关系:**扩散系数和迁移率的关系。

**霍尔电压:**在霍尔效应测量中,半导体上产生的横向压降。

**电离杂质散射:**载流子和电离杂质原子之间的相互作用。

**晶格散射:**载流子和热振动晶格原子之间的相互作用。

**迁移率:**关于载流子漂移和电场强度的参数。

**电阻率:**电导率的倒数;计算电阻的材料参数。

**饱和速度:**电场强度增加时,载流子漂移速度的饱和值。



# 知识点

学完本章后,读者应具备如下能力:

- 论述载流子漂移电流密度。
- 解释为什么在外加电场作用下载流子达到平均漂移速度。
- 论述晶格散射和杂质散射机制。
- 定义迁移率,并论述迁移率对温度和电离杂质浓度的依赖关系。
- 定义电导率和电阻率。
- 论述饱和速度。
- 论述载流子扩散电流密度。
- 叙述爱因斯坦关系。
- 描述霍尔效应。



# 复习题

1. 写出总漂移电流密度方程。
2. 定义载流子迁移率。其单位是什么？
3. 解释迁移率的温度依赖性。为什么载流子迁移率是电离杂质浓度的函数？
4. 定义电导率、电阻率。它们各自的单位是什么？
5. 分别画出硅、砷化镓中电子漂移速度与电场强度的关系曲线。
6. 写出电子和空穴的扩散电流密度方程。
7. 爱因斯坦关系是什么？
8. 描述霍尔效应。
9. 解释为什么霍尔电压的正负反映了半导体的导电类型(n型或p型)。



END

---

本次课回顾