



西安交通大学
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY

半导体物理与器件

任课教师: 赵小龙
电信学部微电子学院
zhaoxiaolong@xjtu.edu.cn

目录

- 前沿——课程信息

第一部分：半导体物理

- 第一章 半导体中的电子状态
- 第二章 半导体中载流子的统计分布
- **第三章 半导体的导电性**
- 第四章 非平衡载流子
- 第五章 金属和半导体的接触

第二部分：p-n结

第三部分：双极晶体管

第四部分：金属-氧化物-半导体场效应晶体管

第三章 半导体的导电性

• 3.1 载流子的漂移运动和迁移率

3.1.1 导体的欧姆定律

(1) $I = \frac{V}{R}$ $J = \frac{\Delta I}{\Delta s}$ 电流密度:
通过垂直于电流方向的单位面积的电流, A/cm²

(2) $R = \rho \frac{l}{S}$

ρ : **电阻率** $\Omega \cdot \text{cm}$, σ : **电导率** $\sigma = \frac{1}{\rho}$ S/cm, 西门子/cm

(3) 欧姆定律的微分形式

$$I = \frac{V}{R} = \frac{El}{\rho \frac{l}{S}} = \frac{S}{\rho} E = S\sigma E \quad \Rightarrow \quad J = \sigma |E|$$

第三章 半导体的导电性

- 3.1 载流子的漂移运动和迁移率

3.1.2 漂移速度和迁移率（导体）

(1) 漂移运动

导体外加电压，内部电子受到电场力的作用，沿电场反方向作定向运动，形成电流。

(2) 漂移速度

定向运动的速度，平均漂移速度用 \bar{v}_d 表示。

(3) 电流密度和平均漂移速度的关系

通过A面的电流（单位时间通过该面的电荷量）为：

$$I = -nq\bar{v}_d \times 1 \times S$$

第三章 半导体的导电性

• 3.1 载流子的漂移运动和迁移率

电流密度 $J = -nq\bar{v}_d$

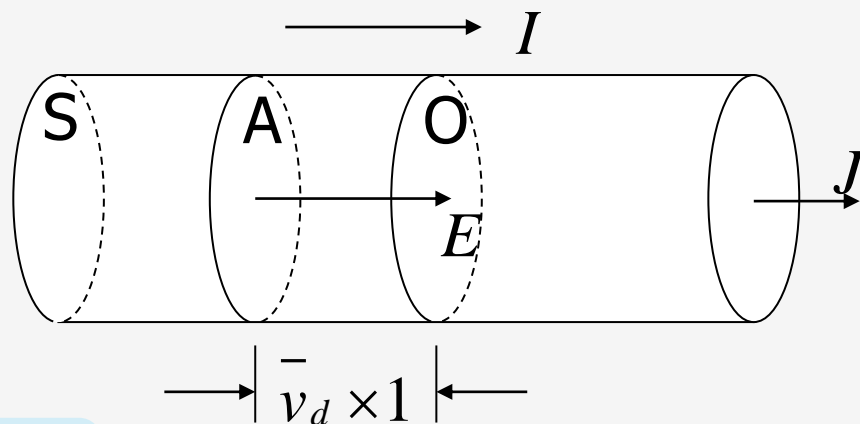
欧姆定律: $J = \sigma|E|$

对比可得, 平均漂移速度的大小与电场强度成正比, 因此:

$$\bar{v}_d = \mu|E| \quad \mu = \frac{\sigma}{nq}$$

迁移率: $\mu = \left| \frac{\bar{v}_d}{E} \right|$

单位: $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$



单位场强下电子的平均漂移速度

第三章 半导体的导电性

• 3.1 载流子的漂移运动和迁移率

载流子迁移率 μ

$$\overline{v_d} = \mu E$$

E : 外加电场

μ : 载流子迁移率, 是一个比例因子

$$\sigma = nq\mu$$

迁移率描述在电场作用下, 载流子的移动情况 (移动的难易程度)

第三章 半导体的导电性

- 3.1 载流子的漂移运动和迁移率

3.1.3 半导体的电导率与迁移率

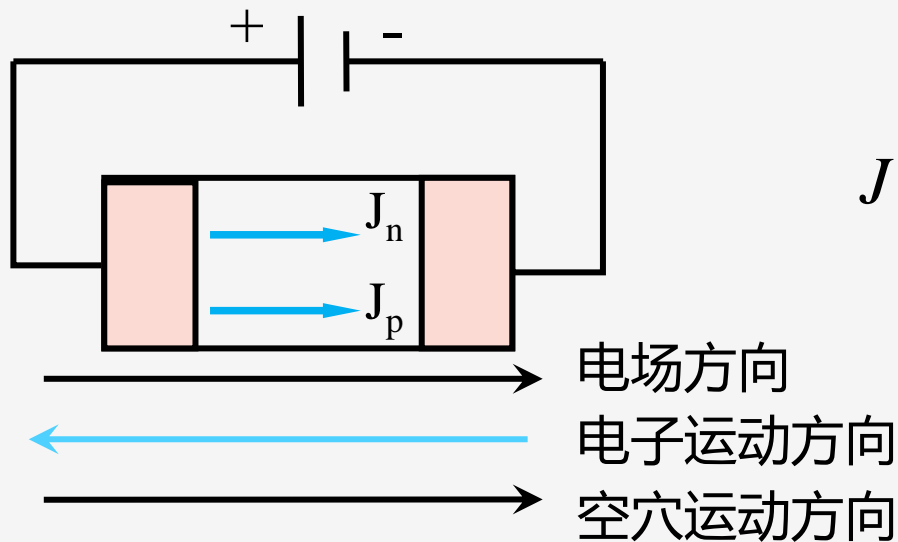
实验发现，电场不是很强的时候，半导体中的载流子在电场力作用下遵守欧姆定律

$$J = \sigma |E| \quad \sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

半导体中的情形：导带电子和价带空穴都可以参与导电。虽然在电场下的运动方向相反，但是贡献的电流方向相同。

第三章 半导体的导电性

• 3.1 载流子的漂移运动和迁移率



$$J = J_n + J_p = (nq\mu_n + pq\mu_p)|E|$$

对于半导体 $\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$

n型半导体

$$\sigma = nq\mu_n$$

p型半导体

$$\sigma = pq\mu_p$$

本征半导体

$$\sigma_i = n_i q (\mu_n + \mu_p)$$

第三章 半导体的导电性

• 3.1 载流子的漂移运动和迁移率

漂移电流方程

电子

$$J_n = nqE\mu_n$$

电子漂
移电流

单位体积
的电子数

电子迁
移率

空穴

$$J_p = pqE\mu_p$$

空穴漂
移电流

单位体积
的空穴数

空穴迁
移率

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

3.2.1 散射的概念和欧姆定律的定性解释

问题提出：

因为 $J = \sigma |E|$ ，当 E 一定时，则 J 恒定，而 $J = nq\bar{v}_d$

所以 \bar{v}_d 应该一定。

然而电子受到电场力的作用匀加速运动，速度应该是一直增加，与实际情况矛盾。

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

3.2.1 散射的概念和欧姆定律的定性解释

散射概念

- a. 载流子无规则永不停息运动---热运动
- b. 晶格原子在格点附近热振动
- c. 电离杂质热振动（带电荷）

载流子热运动与晶格原子、电离杂质发生作用 - - 碰撞，使载流子运动的速度的大小及方向发生变化。

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

3.2.1 散射的概念和欧姆定律的定性解释

(1) 用波的概念解释

电子波在半导体中传播时遭到散射，由于散射使载流子的速度大小方向改变。

(2) 自由载流子

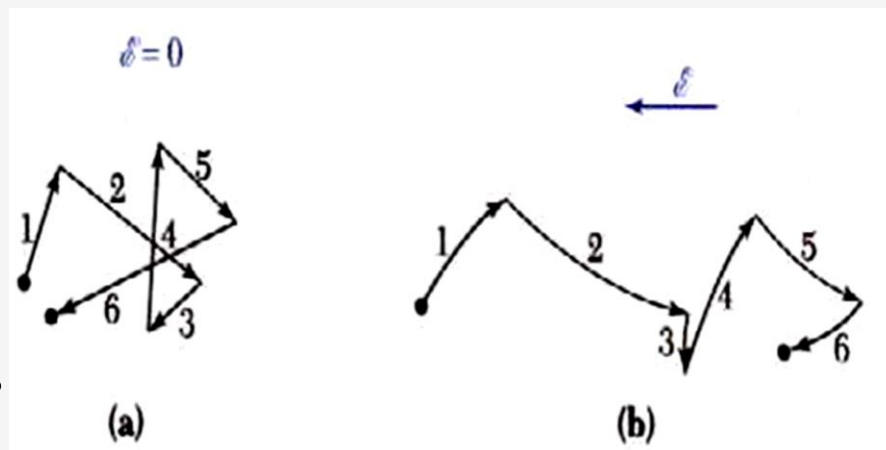
两次散射之间的运动，自由运动。

(3) 平均自由程

连续两次散射间自由运动的平均路程。

(4) 平均自由时间 τ :

连续两次散射间自由运动的平均时间。



第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

欧姆定律的定性解释

电子无规则运动，

a.没有电场

宏观上没有沿某一方向的运动，不构成电流

b.有电场

电场力作用下，载流子沿电场方向运动，由于散射，由电场力作用得到的附加速度散射到各个方向，使速度不能积累。在上述两种作用下，载流子以一定的平均速度沿力的方向运动，具有恒定的平均漂移速度，形成电流，恒定电流。

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

3.2.2 半导体的主要散射机构

用能量的观点解释散射

散射的本质

晶体周期性势场发生变化，具有附加势场，使能带中电子发生不同k状态间的跃迁，速度发生变化。不同的散射机构具有不同的附加势场。

主要散射机构

电离杂质散射
晶格振动散射
其它散射（等能谷散射，
中性杂质散射，位错散射等）

散射作用的强弱用散射几率P描述；
散射几率：单位时间内一个载流子受到散射的次数。

平均自由时间： $\tau = \frac{1}{P}$

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

电离杂质散射

电离施主（+）电离受主（-）形成库仑场 - - 附加场，局部破坏了周期性势场。经过其附近的载流子将在库伦作用下而改变运动方向，称电离杂质对载流子的散射作用。

类似于 α 粒子散射，运动轨迹为：以电离杂质为焦点的双曲线。

散射理论指出**电离杂质的散射几率**： $P_i \propto N_i T^{-3/2}$

N_i 为电离杂质浓度， T 为温度

解释： N_i 升高，载流子受到散射的几率增加；

T 升高，载流子热运动的平均速度大，可以很快掠过杂质离子，受库仑场的影响小，偏转小，不易受到散射，散射几率减小。

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

晶格振动的散射

晶体振动以格波形式存在，格波又分为声学波和光学波声学波

声学波 (原胞中两个原子沿同一方向振动) 代表原胞质心振动，频率低；

光学波 (原胞中两个原子振动方向相反) 代表原胞内原子间的相对振动，质心不动，频率高；

晶格振动的能量是量子化的，晶格振动的能量子称为声子；
晶格振动对载流子的散射可看作是载流子与声子的碰撞；
载流子和声子的碰撞遵循准动量守恒和能量守恒定律；
对于硅、锗等元素半导体，其主要散射机制为声学波；
光学波在离子性半导体中起重要作用。

第三章 半导体的导电性

• 3.2 载流子的散射

其他因素引起的散射

a. 等同能谷间散射

Si导带具有极值相同的6个旋转椭球，载流子在这些能谷中分布相同 - - 等同能谷；电子可以从一个极值附近散射到另一个极值附近 - - 谷间散射，可以吸收或发射声子。

b. 中性杂质散射

没有电离的杂质 - - 中性杂质，对周期性势场微扰，引起散射。在杂质浓度高的重掺杂半导体中， T 很低时，起作用

c. 位错散射

位错线俘获电子，成为一串负电中心，周围形成带正电的圆柱形电荷区，内部存在电场 - - 附加电场，引发散射。

d. 载流子间散射 强简并半导体起作用。

第三章 半导体的导电性

• 3.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

3.3.1 平均自由时间与散射几率

- $t = 0$ 时 N_0 个电子在电场力的作用下开始运动,
- $N(t)$: t 时刻未遭到散射的电子数,
- $N(t + \Delta t)$: $t + \Delta t$ 时刻未遭到散射的电子数,
- Δt 内被散射的电子数为:

$$N(t) - N(t + \Delta t) = N(t)P\Delta t \quad \frac{dN(t)}{dt} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t + \Delta t) - N(t)}{\Delta t} = -PN(t)$$

$$N(t = 0) = N_0 \quad \longrightarrow \quad N(t) = N_0 e^{-Pt}$$

t 到 $t + dt$ 内遭散射电子数 $N_0 e^{-Pt} P dt$

dt 内遭散射的所有电子的自由时间都是 t , 取平均

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \cdot N_0 P e^{-Pt} dt = \frac{1}{P} \quad \text{平均自由时间} = \text{散射几率的倒数}$$

第三章 半导体的导电性

• 3.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

3.3.2 迁移率与平均自由时间关系

电子:
$$\mu_n = \frac{\left| \overline{v_x} \right|}{\left| E \right|} = \frac{q\tau_n}{m_n^*}$$

空穴:
$$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$$

$$\tau = \frac{1}{P} \quad P = P_I + P_{II} + P_{III} + \dots$$

$$P_s = AT^{3/2} \quad P_i = BN_iT^{-3/2}$$

$$\mu = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}$$

电离杂质浓度

第三章 半导体的导电性

• 3.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

3.3.4 迁移率与杂质和温度的关系（假设全部电离）

$$\mu = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}$$

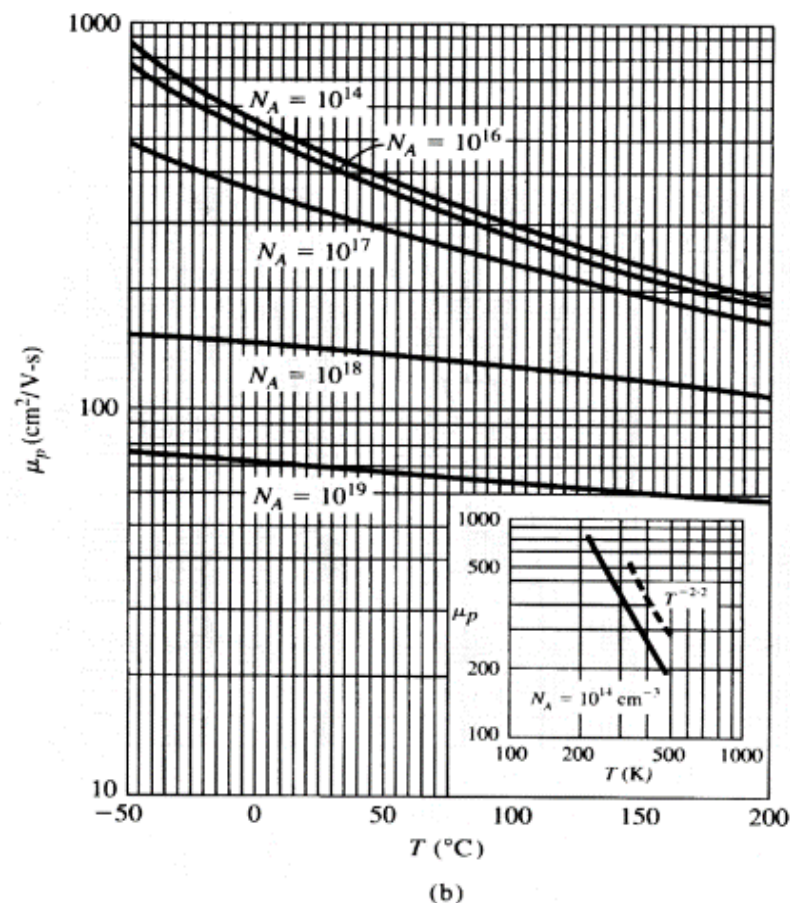
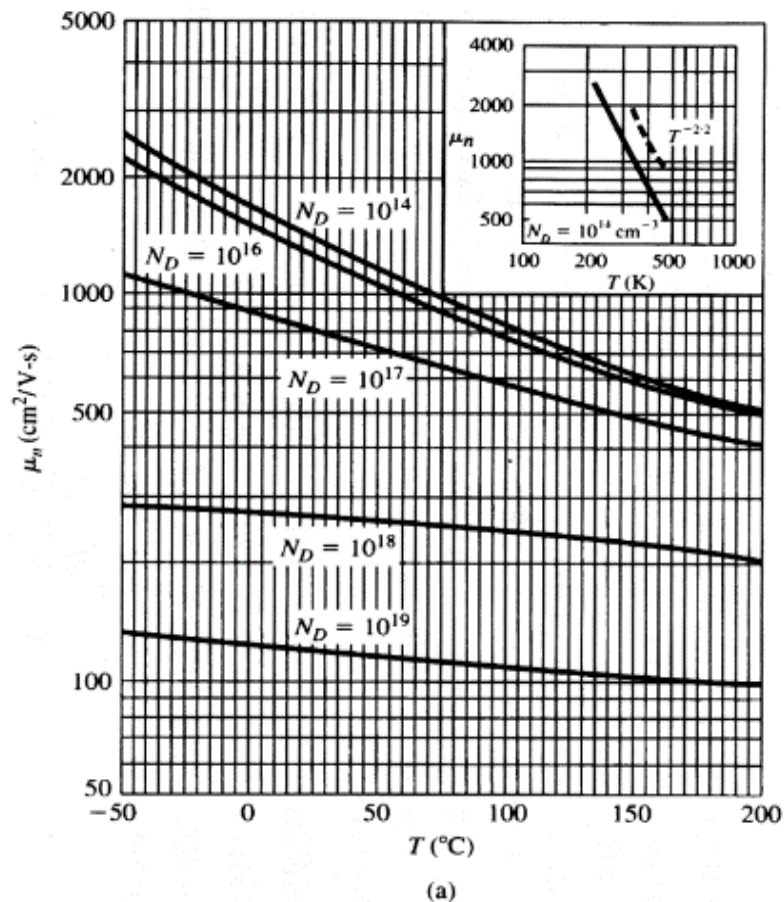

声学波散射 电离杂质散射

1. $N_i = 10^{13} - 10^{17}/\text{cm}^3$ （高纯 - - 低掺杂），声学波散射， T 升高，**迁移率下降**；（晶格振动作用）
2. N_i 升高 $10^{18}/\text{cm}^3$ ， T 升高，**迁移率下降趋势减缓**；晶格振动作用+电离杂质散射开始起作用；
3. N_i 升高 $10^{19}/\text{cm}^3$ ， T 升高，**迁移率先升再降，低温时电离杂质散射主要作用**；温度升高到一定程度后，晶格振动起主要作用。（两者都参与）

第三章 半导体的导电性

• 3.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

3.3.4 迁移率与杂质和温度的关系



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

第三章 半导体的导电性

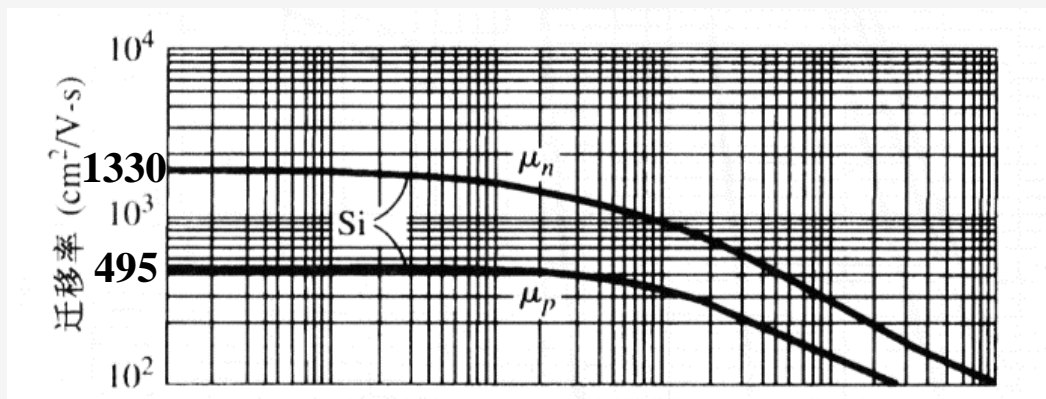
• 3.3 迁移率与杂质浓度和温度的关系

3.3.4 迁移率与杂质和温度的关系

温度不变，迁移率与杂质浓度的关系

杂质浓度升高，迁移率下降
$$\mu = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}$$

对于补偿半导体，载流子浓度决定于施主和受主浓度之差，但是迁移率决定于两种杂质浓度之和。



300K时硅迁移率与杂质浓度的关系

第三章 半导体的导电性

• 3.4 电阻率及其与杂质浓度和温度的关系

电阻率 $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$

n型半导体

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n}$$

p型半导体

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p p}$$

本征半导体

$$\rho = \frac{1}{qn_i(\mu_n + \mu_p)}$$

300K, 本征硅电阻率: $2.3 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$,

本征锗: $47 \Omega \cdot \text{cm}$

迁移率和载流子浓度均与**杂质浓度**和**温度**有关, 所以, 半导体电阻率随杂质浓度和温度变化。

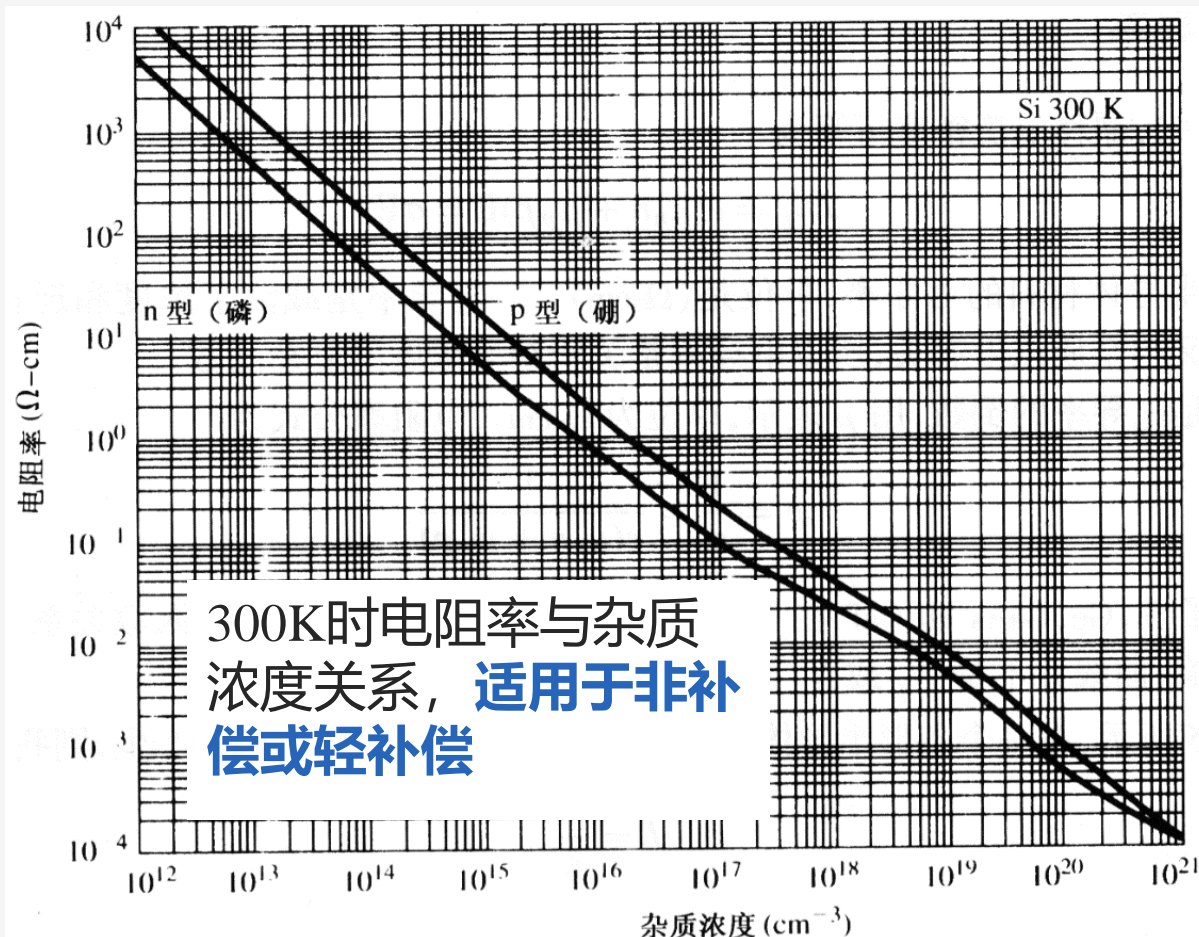
第三章 半导体的导电性

• 3.4 电阻率及其与杂质浓度和温度的关系

3.4.1 电阻率与杂质浓度的关系（杂质半导体）

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n}$$

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p p}$$



第三章 半导体的导电性

• 3.4 电阻率及其与杂质浓度和温度的关系

3.4.1 电阻率与杂质浓度的关系（杂质半导体）

a. 轻掺杂 ($N: 10^{16} - 10^{18}/\text{cm}^3$)

室温下，杂质全部电离，迁移率随杂质浓度变化不大，所以，杂质浓度升高，电阻率下降；

b. 杂质浓度大于 $10^{19}/\text{cm}^3$ ，曲线严重偏离直线，其原因：

- 1) 杂质在室温下不能全部电离；
- 2) 迁移率随杂质浓度升高而下降；

由此图可以查杂质浓度对应的电阻率

第三章 半导体的导电性

- 3.4 电阻率及其与杂质浓度和温度的关系

3.4.2 电阻率随温度的变化

本征半导体

$$\rho = \frac{1}{qn_i(\mu_n + \mu_p)}$$

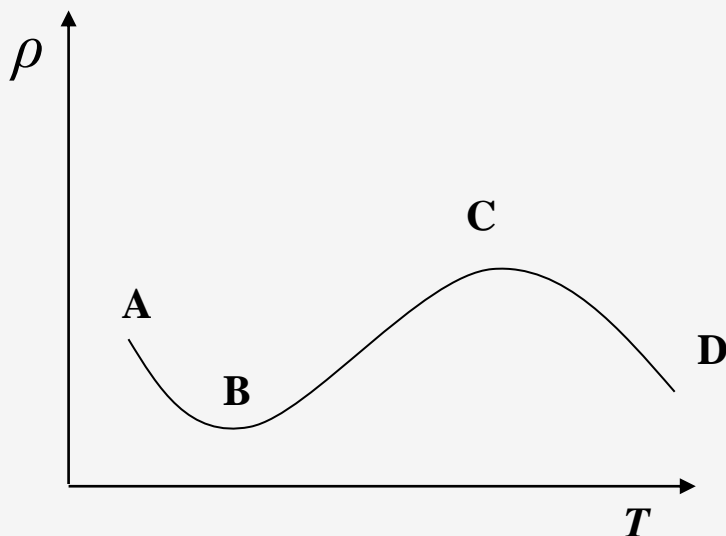
电阻率由 n_i 决定， T 升高， n_i 升高很快，而迁移率只是稍微下降，变化不大，所以最终结果：温度升高，电阻率减小，负温度系数。

第三章 半导体的导电性

• 3.4 电阻率及其与杂质浓度和温度的关系

3.4.2 电阻率随温度的变化

杂质半导体



$$\rho = \frac{1}{q\mu_n n}$$

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p p}$$

$$\mu = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}$$

第三章 半导体的导电性

• 3.4 电阻率及其与杂质浓度和温度的关系

3.4.2 电阻率随温度的变化

◆ AB段（随温度升高而降低）：

温度低，本征激发忽略，载流子主要来自杂质电离，载流子浓度随温度升高而增加；散射以电离杂质为主，迁移率随温度升高而增大；（迁移率影响较载流子浓度影响小很多）（迁移率和载流子浓度都随温度升高而升高）

◆ BC段（随温度升高而增加）：

杂质全部电离，载流子浓度基本不变，晶格振动散射起主导作用，迁移率随温度升高而下降，电阻率增大；（载流子浓度不变，迁移率随温度升高而下降）

◆ CD段（随温度升高而降低）：

本征激发为主，随温度升高，载流子数量快速增加，其影响远远超过迁移率变化，电阻率下降。（载流子浓度随温度升高很快，迁移率随温度升高而下降，但是载流子浓度起主要作用）

第三章 半导体的导电性

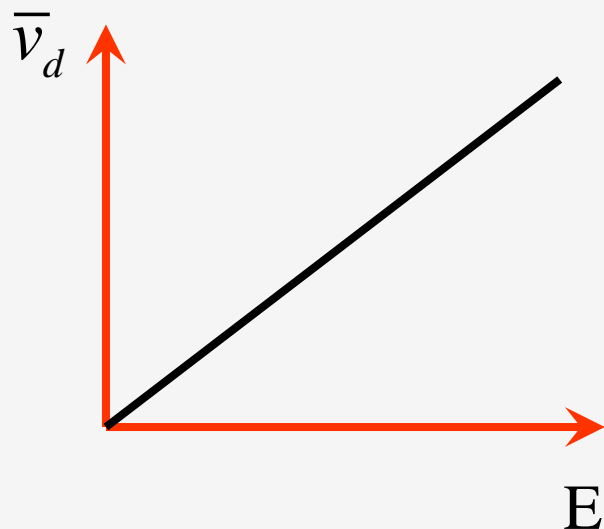
• 3.5 强电场下的效应、热载流子

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*}$$

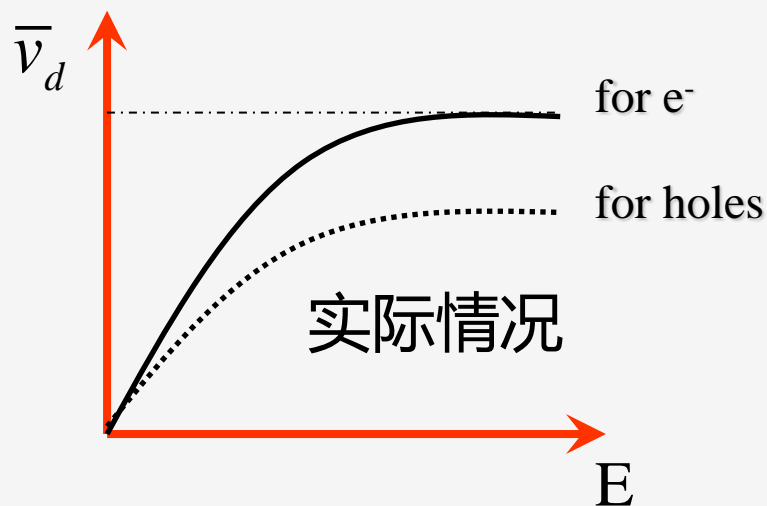
$$\bar{v}_d = \mu E$$

$$J = nq\bar{v}_d$$

通过增大电场强度可以让载流子的运动速度无限增加？



(a) 上述方程描述的电子速度与电场的关系



(b) 实际漂移速度会达到饱和

第三章 半导体的导电性

• 3.5 强电场下的效应、热载流子

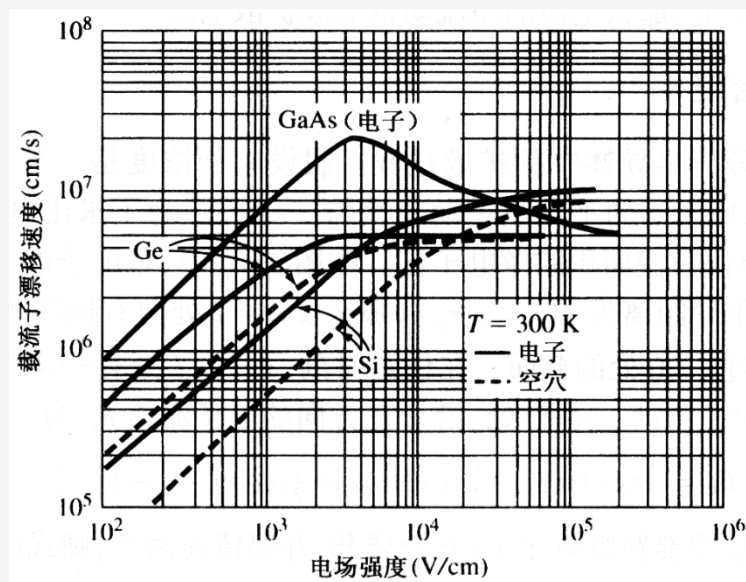
饱和漂移速度

- ◆在电场强度 E 较小时, \bar{v}_d 随着电场增加而线性增加。
- ◆但电场强度 E 较大时, \bar{v}_d 随着电场增加会发生饱和, 达到一个饱和漂移速度 v_{th} 。
- ◆出现漂移速度饱和后, 电场 E 进一步增大不再增加漂移速度 \bar{v}_d , 而是会加热半导体的晶格。

$$J = nq\bar{v}_d$$

$$J = \sigma |E|$$

$$\sigma = nq\mu_n$$



第三章 半导体的导电性

• 3.5 强电场下的效应、热载流子

原因分析

由载流子与晶格振动散射时的能量交换过程来说明

- ◆ 无外加电场时，载流子和晶格振动散射，吸收声子和发射声子，与晶格交换动量和能量，交换净能量为0，载流子平均能量与晶格相同，处于热平衡态；
- ◆ 有较小电场时，载流子从电场中获得能量，以发射声子的形式将能量传给晶格，载流子发射声子>吸收声子；
- ◆ 强电场，载流子从电场获得更多的能量，载流子平均能量>晶格系统的能量，用温度量度平均动能，引入热载流子，载流子的有效温度为 $T_e > T$

第三章 半导体的导电性

• 3.5 强电场下的效应、热载流子

热载流子

高场强下，电子的温度高于晶格温度，载流子漂移速度出现饱和。

根据电导率的统计理论：

低场时：

$$\mu_0 = \frac{4ql_n}{3\sqrt{2\pi m_n^* k_0 T}}$$

高场时：

$$\mu = \frac{4ql_n}{3\sqrt{2\pi m_n^* k_0 T_e}} \quad \mu = \mu_0 \sqrt{\frac{T}{T_e}}$$

◆ 半导体的导电性

1. 迁移率是平均漂移速度与电场关系曲线的斜率

$$\mu = |\bar{v}_d| / |E|$$

2. 半导体电导率、迁移率与平均自由时间：

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p = \frac{nq^2\tau_n}{m_n^*} + \frac{nq^2\tau_p}{m_p^*}$$

3. 半导体主要的载流子散射机构；
4. 迁移率与温度及杂质浓度的关系：

电离杂质散射： $\mu_i \propto N_i^{-1}T^{3/2}$

晶格振动散射（声学波）： $\mu_s \propto T^{-3/2}$

两种散射机构同时存在时：

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_i} \qquad \mu = \frac{q}{m^*} \frac{1}{AT^{3/2} + \frac{BN_i}{T^{3/2}}}$$

◆ 半导体的导电性

5. 电阻率与杂质浓度及温度的关系 $\rho(N_i, T)$

$\rho(N_i)$ -- 杂质半导体

$\rho(T)$ -- 本征半导体及杂质半导体

6. $\mu(E)$ 关系，热载流子，平均漂移速度饱和

高场强下，电子温度高于晶格温度，载流子漂移速度出现饱和：

$$\mu = \mu_0 \sqrt{\frac{T}{T_e}}$$