

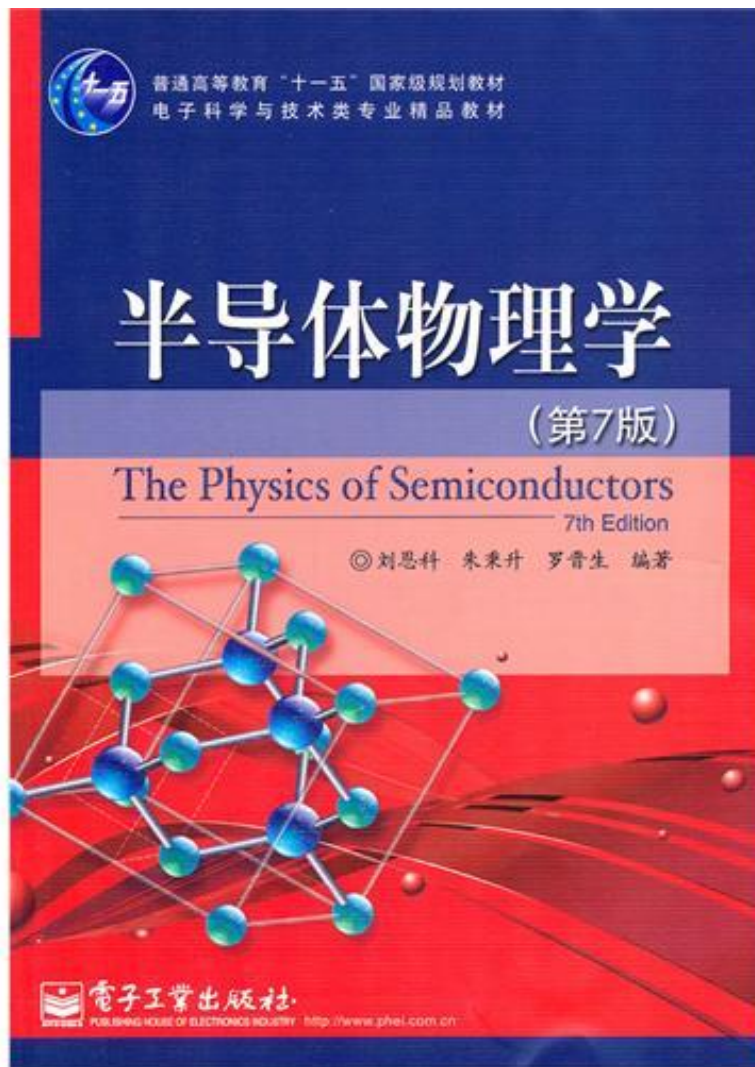
# 华中科技大学光学与电子信息学院本科教学

## 半导体物理（电子16级）

姜胜林、刘欢、张光祖

2018. 10





1

半导体中的电子状态

2

半导体中载流子的统计分布

3

载流子输运与导电

4

非平衡载流子

5

p-n结

6

金属和半导体的接触

7

半导体表面与MIS结构

8

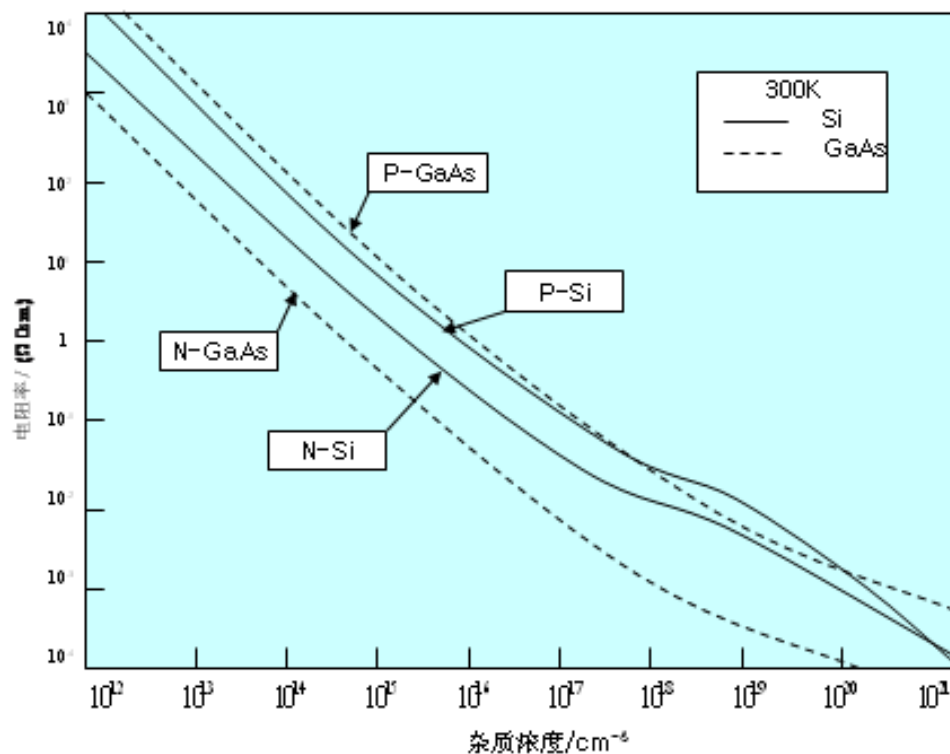
半导体异质结

9

半导体的光、热、磁效应

## 本章内容提要

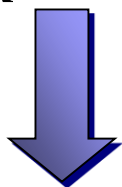
- 载流子漂移，迁移率
- 散射与散射机构
- 迁移率/电阻率 ~  
温度/杂质
- 强电场效应



## 3.1 载流子的漂移运动

### 1. 欧姆定律的微分形式

欧姆定律  $I = \frac{V}{R}$        $R = \rho \frac{l}{s}, \quad \sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{l}{Rs}$



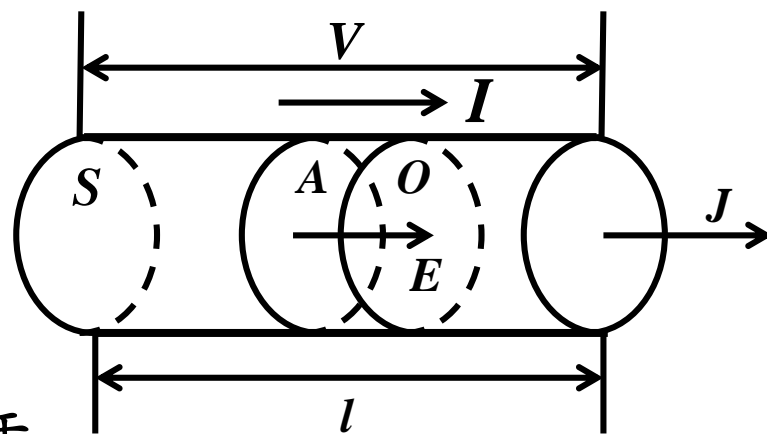
内部各处电流的分布?

**电流密度** (通过垂直于电流方向单位面积的电流)

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta S}$$

均匀导体

$$J = \frac{I}{s} = \frac{V}{Rs} = \frac{l|E|}{Rs} = \sigma|E|$$



物理意义：导体中某点的电流密度正比于该点的电场强度，其比例系数为电导率

(欧姆定律的微分形式)

## 2. 漂移速度和迁移率

漂移运动：由电场作用而产生的、沿电场力方向的运动

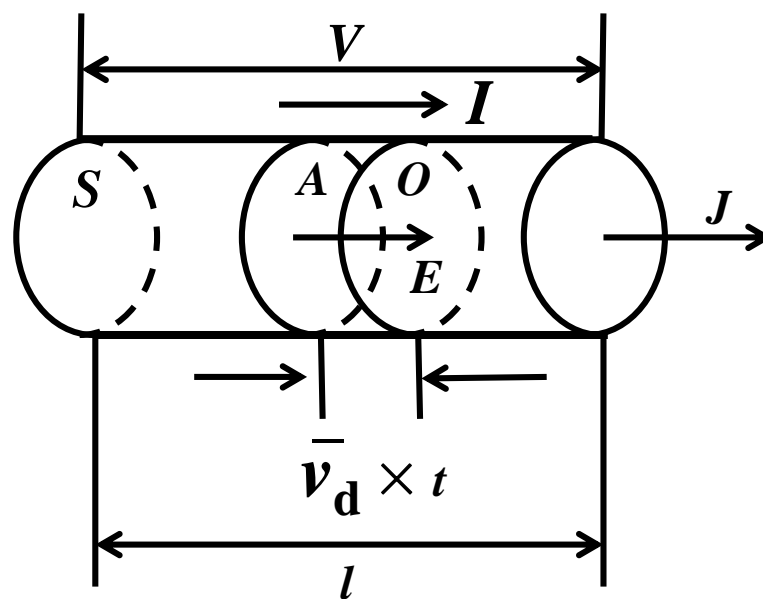
（电子和空穴漂移运动方向相反）

漂移速度：漂移运动的速度（平均漂移速度  $\bar{v}_d$ ）

漂移电流：载流子的漂移运动所引起的电流

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \times (\bar{v}_d \times t \times s) \times (-q)}{t}$$
$$= -n \times \bar{v}_d \times s \times q$$

漂移电流密度  $J = \frac{I}{s} = -nq\bar{v}_d$



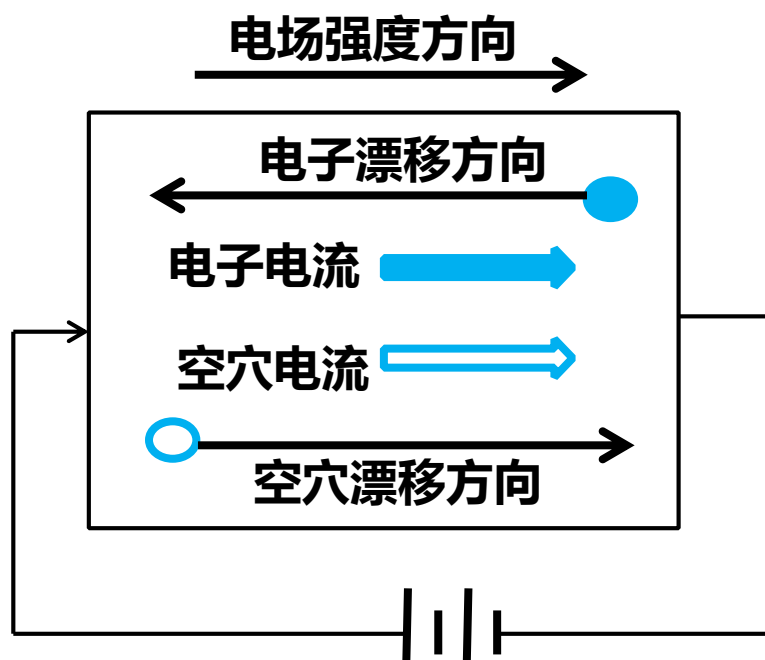
$$\left\{ \begin{array}{l} J = \frac{I}{S} = -nq\bar{v}_d \\ J = \sigma|E| \end{array} \right. \xrightarrow[\text{电子平均漂移速度应恒定}]{\text{电场恒定时}} \text{可令 } \bar{v}_d = -\mu|E|$$

$$\text{或者 } \mu = \left| \frac{\bar{v}_d}{E} \right|$$

迁移率  $\mu$ ：单位场强下载流子平均漂移速度，单位是  $\text{m}^2/\text{V s}$  或者  $\text{cm}^2/\text{V s}$   
 它反映了外电场作用下载流子作漂移运动的难易程度/能力  
 是半导体的特征参数之一

$$\text{则 } J = -nq\bar{v}_d = nq\mu|E| \xrightarrow{J = \sigma|E|} \boxed{\sigma = nq\mu}$$

### 3. 半导体的电导率



半导体中载流子的漂移电流

电子和空穴的漂移运动方向相反，  
但形成的电流都是沿着电场方向

总电流密度 = 电子电流密度 + 空穴电流密度

实验证实：电场不太强时，半导体  
漂移电流遵从欧姆定律

$$J = J_n + J_p$$

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

$$J = \sigma|E|$$

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

NOTE: 电子和空穴的迁移率并不相等，一般来说 $\mu_n \gg \mu_p$ ???

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

本征半导体:  $n = p = n_i$

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

$$J = J_n + J_p = n_i q (\mu_n + \mu_p) |E|$$

n型半导体:

$$n \gg p$$

$$\sigma = \sigma_n = nq\mu_n$$

$$J = J_n = nq\mu_n |E|$$

p型半导体:

$$p \gg n$$

$$\sigma = \sigma_p = pq\mu_p$$

$$J = J_p = pq\mu_p |E|$$



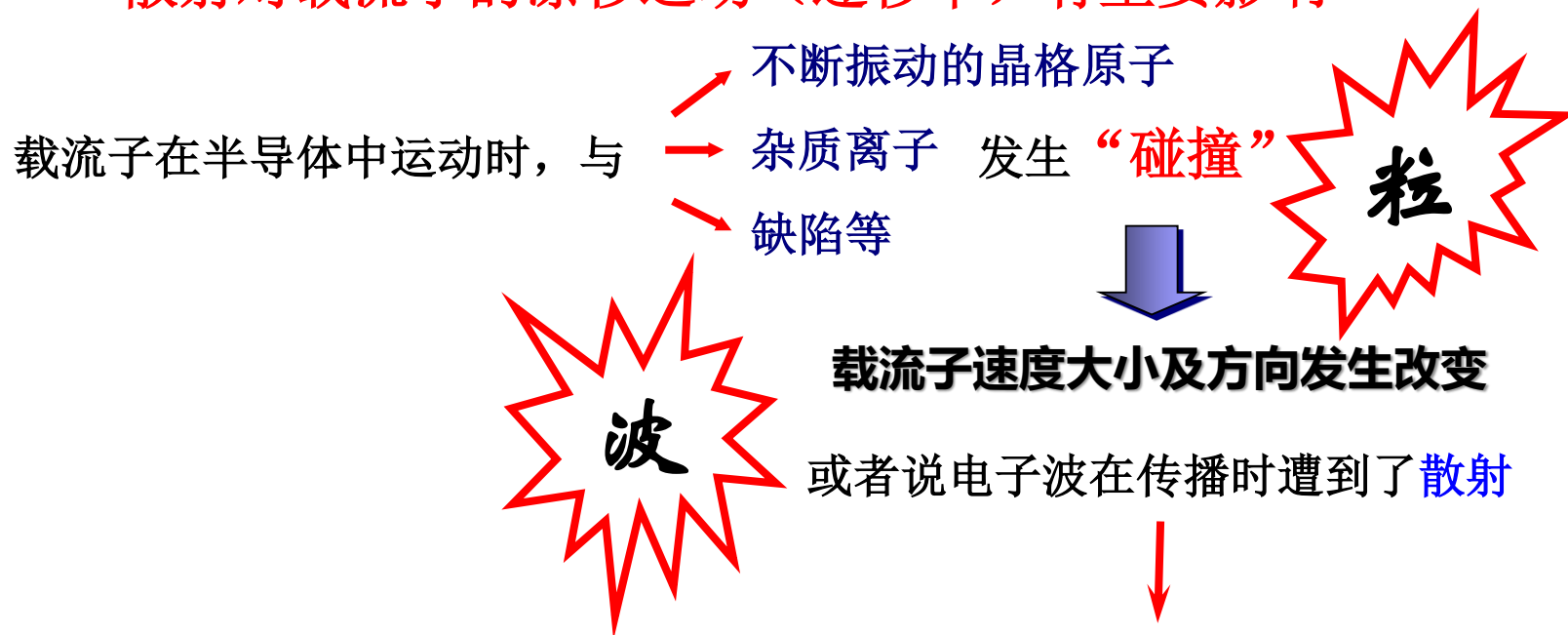
## 3.2 载流子的散射

外加电场时，沿电场力方向漂移产生电流：

**漂移速度**与外电场成正比；电场恒定，则速度恒定，并非不断加速？？？

➤ 事实上，载流子在电场中的运动情况很复杂

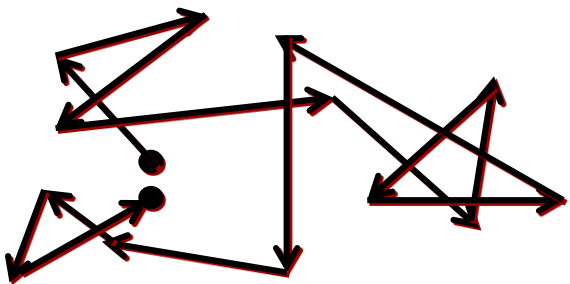
**散射对载流子的漂移运动（迁移率）有重要影响**



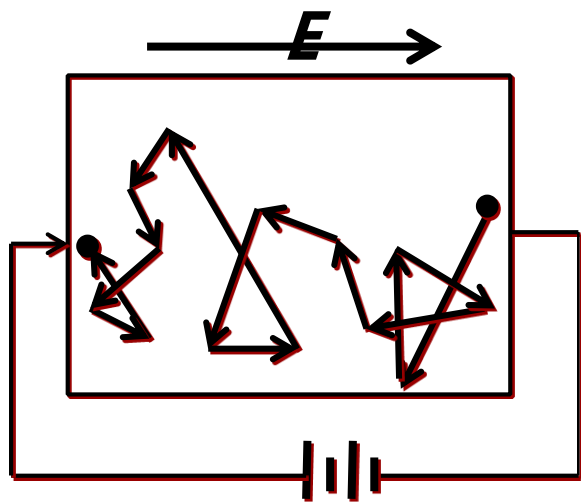
正是因为散射，无外加电场时载流子作无规则、杂乱无章的运动（热运动）

无外加电场时：

载流子并非静止不动，而是无止境地作无规则的  
**热运动**，只是运动速度各向同性，即不存在宏观  
迁移，也就无电流产生



在外电场作用下，载流子的实际运动是**热运动**和**漂移运动**的**叠加**




只有在两次散射之间，载流子才是作“自由运动”

外电场力和散射双重作用

载流子沿电场力方向的速度分量比其它方向要大，  
以一定的平均速度沿力的方向漂移（平均漂移速度）  
电场恒定时，平均漂移速度和电流密度恒定。

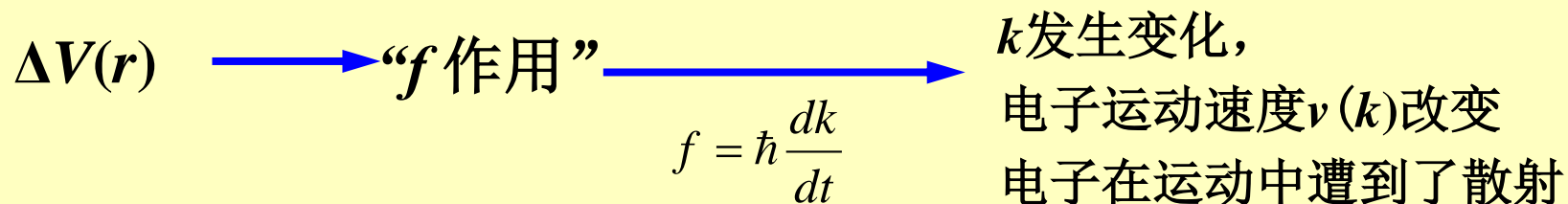
（平均自由程，平均自由时间）

载流子在半导体中运动时，与  不断振动的晶格原子  
杂质离子 发生 “碰撞”  
缺陷等

**遭到散射的根本原因：**实际晶体中，晶格周期势场易受各种因素影响而被局部破坏，从而在理想周期势场上叠加了附加势场

$$V(r) = V_0(r) + \Delta V(r)$$

**散射对迁移率的影响就是 $\Delta V(r)$ 对载流子（电子）运动的影响**

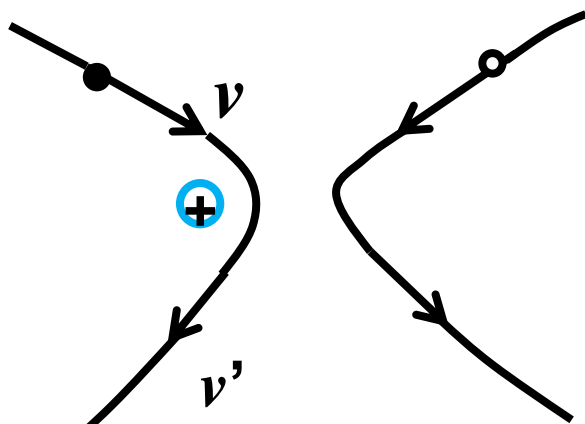


产生附加势场的主要原因/半导体的主要散射机构

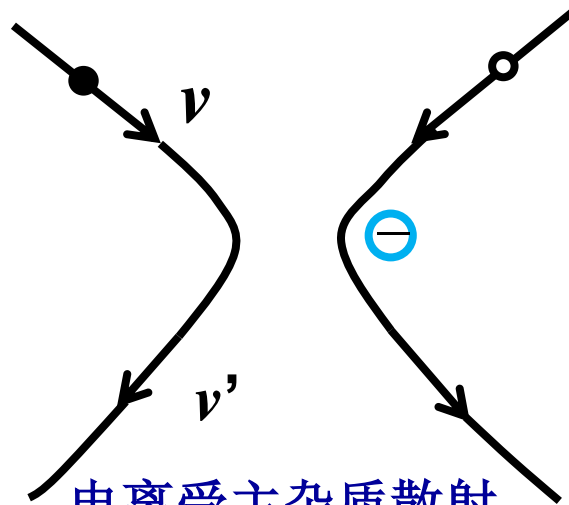
(1) 电离杂质散射 (2) 晶格振动散射 (3) 其它散射机构

## 半导体的主要散射机构--(1)电离杂质散射

- ◆ 杂质电离形成带电中心，其产生的库仑势场破坏了附近区域的周期性势场，即产生附加势场引起载流子散射
- ◆ 受库仑作用，当载流子运动到它们附近时，运动方向将发生改变



电离施主杂质散射



电离受主杂质散射

- ◆ 其散射几率（单位时间内受到散射的次数）  $P_i \propto N_i T^{-3/2}$

$T \uparrow \rightarrow$  载流子热运动平均速度越大，能更快地掠过杂质离子  $\rightarrow$  散射几率  $\downarrow$

$N_i \uparrow \rightarrow$  电离杂质数目更多  $\rightarrow$  散射几率  $\uparrow$

## 半导体的主要散射机构—(2)晶格振动散射

### 固体物理知识

- 晶格中各原子都在各自平衡位置(格点)附近作微振动, 振动将通过原子间的相互作用在晶体中传播, 表现为晶格振动波(格波)
- 常用格波矢 $q$  (与电子波波矢 $k$ 类似)表示格波的波长及其传播方向
- 在晶体中存在着若干基本的振动模式, 晶格中各原子的振动由这些基本的格波叠加而成

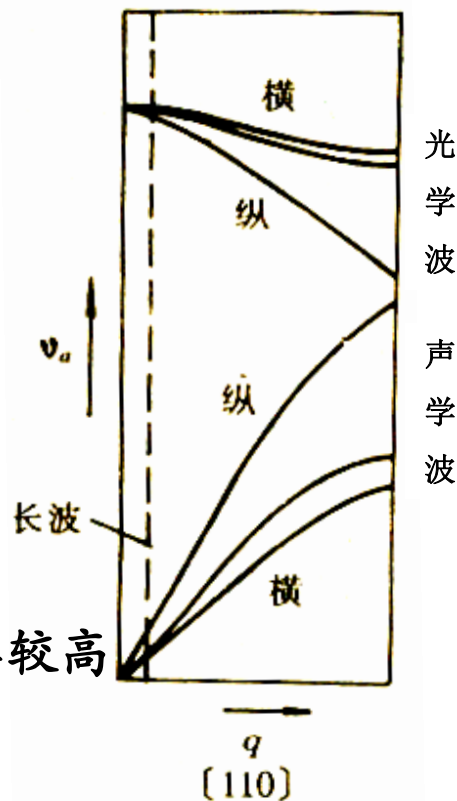
- ◆ 研究发现，一个晶体中，具有同样 $q$ 的格波不止一个：最简单的晶体原胞中只有一个原子，对应每一个 $q$ 具有三个格波，频率或振动方式各不相同。
- ◆ Si, Ge及III-V族化合物半导体，原胞中含有两个原子，对应每一个 $q$ 就有六个不同的格波，故共有 $6N$ 个格波（六支格波）：频率最低的三支—**声学波**（声频支），其余为**光学波**（光频支）

声学波：原胞中两原子沿同一方向振动（**一纵两横**）  
 光学波：原胞中两原子振动方向相反（**一纵两横**）

**声学波**：两原子振动方向相同，没有相对位移，原胞质心在振动，振动频率较低



**光学波**：两原子的振动方向相反，原胞质心不动，振动频率较高

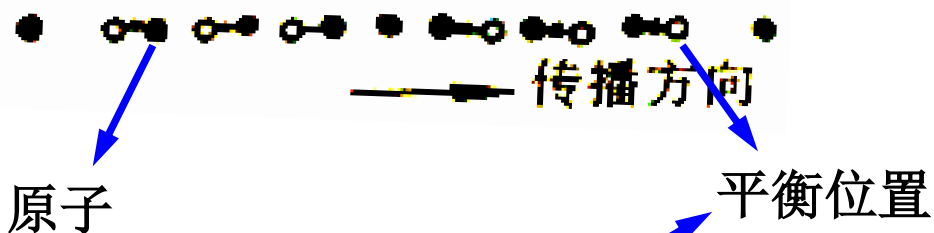


金刚石晶格振动沿 $[110]$ 方向传播的格波频率与波矢的关系

## 半导体中声学波与光学波的特点

从原子振动方式来看，声学波和光学波 均为一纵两横

**纵波：** 原子位移方向与波传播方向平行



**横波：** 原子位移方向与波传播方向垂直



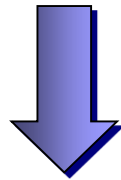
- 格波的能量是量子化的： $E = \left(n + \frac{1}{2}\right)\hbar\omega$

晶格原子与其他物质相互作用而交换能量时，其振动状态将发生变化，

格波能量发生的变化只能是  $\hbar\omega$  的整数倍，

格波的能量子  $\hbar\omega$   声子


格波能量的增加/减少



声子的吸收/放出

晶格振动对载流子的散射，可归结到各种格波对电子的散射，进而可以看作是电子和声子的“碰撞”过程；散射的强弱决定于电子和格波之间的相互作用的强弱，即电子和声子之间耦合(能量交换)的强弱，这种耦合即表现为晶格振动产生某种附加的势而作用于载流子。





各种格波对与载流子的散射比其他散射机制更为基本，因为这种散射机制是晶格本身所固有的，尤其是在高温下，当晶格振动变得更激烈时，晶格振动散射往往占统治地位。

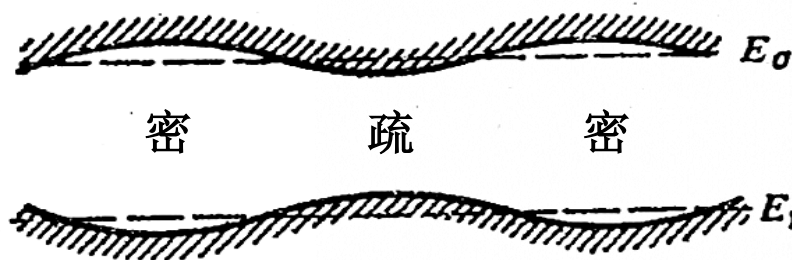
**重在通过分析格波的具体形式，找出附加势场来源，从而讨论它们对载流子的散射作用！**

■ 半导体晶格振动引起的散射中，起主要作用的是长波，即波长比原子间距大很多倍的格波。

根据准动量守恒，声子动量应和电子动量同数量级，  
(  $\hbar k = m_n^* v$ ,  $\lambda = 2\pi/k$  )，即格波波长范围与电子波（波长约为  $10^{-8}\text{m}$ ）类似的格波可起主要散射作用，波长在几十个原子间距（ $\sim 10^{-10}\text{m}$ ）以上，为长波。

## 声学波散射：

- 声学波中，对电子散射起主要作用的是波长较长的长声学波
- 在长声学波中，纵波在散射中起主要作用（联想：刘翔跨栏）
- **长纵声学波**：与空气中声波类似，造成原子分布的疏密变化（晶格形变），从而使得禁带宽度变化（疏处小、密处大），也就是引起能带起伏，能带极值发生变化（ $\Delta E_C$ ， $\Delta E_V$ ），如同产生附加势场作用于载流子，引起散射



长纵声学波引起的形变势

- 其散射几率  $P_s \propto T^{\frac{3}{2}}$  （单位时间内受到散射的次数）

说明： $T \uparrow \rightarrow$  晶格振动越强烈  $\rightarrow$  对电子的散射几率  $P \uparrow$

声学波：晶胞中两原子沿同一方向振动，频率低，声子能量小

光学波：晶胞中两原子振动方向相反，频率高，声子能量大

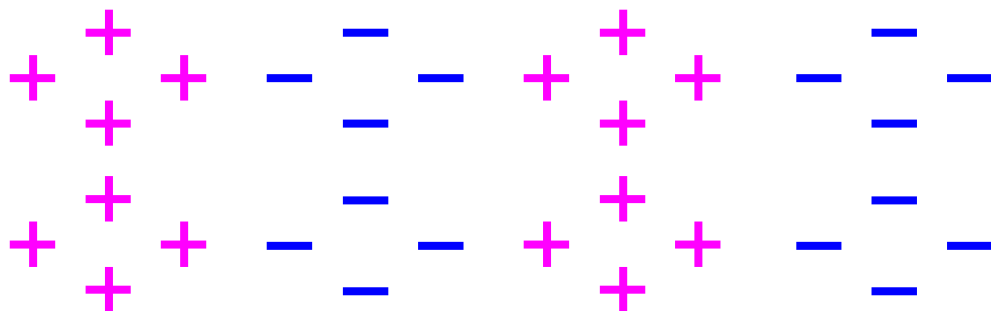
## 光学波散射：

- 仍以长纵光学波为主，它在离子晶体中有重要的散射作用

单看其中一种原子（正离子或负离子），它们与长纵声学波相似，形成疏密相间的区域（纵波的特征）

但由于两种等价原子（正负离子）的振动方向相反（光学波的特征），因此一种原子密的地方，另一种原子就疏，此时尽管原胞质心不动，却引起了正、负电荷交叉的电荷区，形成的静电场将产生附加的势，对电子产生强烈的散射作用，因此离子晶体中电子迁移率通常较小

长纵光学波引起的极化



- 低温时载流子能量低，不足以发射光学波声子，光学波散射不起什么作用
- 但随着温度升高，其散射几率迅速增大（因为高温下晶格振动更强烈）

### (3) 其它散射机构（自学）

同样对周期势场起到微扰作用

- 中性杂质散射：掺杂浓度高且在低温下，作用才明显
- 位错散射：也易成为施、受主带电中心，取决于位错密度
- 载流子之间的散射：载流子浓度很大时或强场作用下
- 合金散射：两种同族原子在晶格位置上随机排列产生微扰势场
- 谷间散射：Si、Ge等多能谷半导体，电子在能量极值间散射，低温时谷间散射几率小

## 小结:

- ✓ 半导体中的散射机构主要是电离杂质散射和晶格振动散射，其中，晶格振动散射以长纵声学波和长纵光学波为主
- ✓ 散射作用的强弱用散射几率  $P$  来衡量

$$\text{电离杂质散射: } P_i \propto N_i T^{-\frac{3}{2}}$$

$$\text{长纵声学波: } P_s \propto T^{\frac{3}{2}}$$

<硅、锗等经典半导体材料>

对电导率的影响?

$$\sigma = nq\mu$$

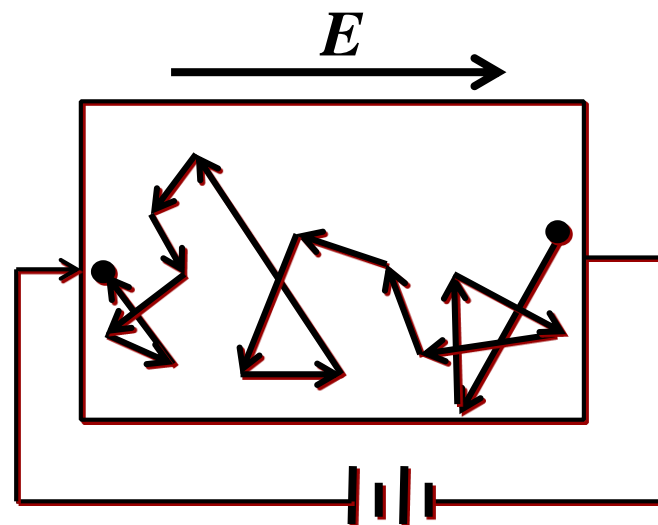
对迁移率的影响?

杂质浓度/温度对散射几率的影响

### 3.3 迁移率/电阻率随杂质浓度/温度的变化

#### 1. 迁移率与散射几率的关系

平均自由时间  $\tau$



只有在两次散射之间载流子才是自由运动

自由时间：连续两次散射之间的时间间隔，自由时间长短不一

平均自由时间  $\tau$ ：相继两次散射的时间间隔的平均值 ( $\tau_n$   $\tau_p$ )

自由路程：载流子在两次散射之间所经过的距离

平均自由程  $l$ ：大量载流子自由路程的平均值

## 散射几率 $P$ 与平均自由时间 $\tau$ 的关系

$P$ : 表示单位时间内一个载流子遭受散射的次数

$\tau$ : 相继两次散射的时间间隔的平均值

} 描述散射强弱

$t \sim (t + \Delta t)$  时间内被散射的电子数

$$\begin{aligned} N(t) - N(t + \Delta t) &= N(t)P\Delta t & \Rightarrow & N(t) = N_0 e^{-Pt} \\ &= N_0 P e^{-Pt} \Delta t \end{aligned}$$

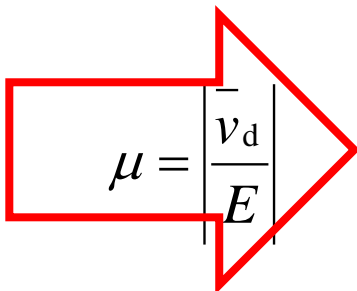
$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} N_0 P e^{-Pt} t dt = \frac{1}{P}$$

$P \uparrow \rightarrow$  散射作用强, 平均自由时间短

$P \downarrow \rightarrow$  散射作用弱, 平均自由时间长



## 迁移率与平均自由时间 $\tau$ 的关系

$$\bar{v}_d = -\frac{q|E|}{m_n^*} \tau_n$$

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

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_n^*} \quad \text{同理} \mu_p = \frac{q\tau_p}{m_p^*}$$

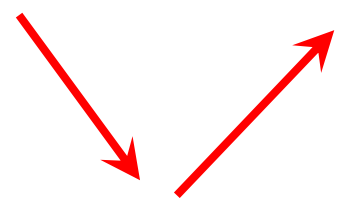
电子和空穴的迁移率是不同的  
电子迁移率一般大于空穴迁移率

课后自学：少子迁移率和多子迁移率

常见半导体的载流子室温迁移率  
(单位:  $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ )

	$\mu_n$	$\mu_p$
Si	1300	500
Ge	4500	3500
GaAs	8800	400
GaN	300	180
InSb	77 000	750
InAs	33 000	460
InP	4600	150
ZnO	230	8

## 迁移率与散射几率的关系

$$\mu = \frac{q\tau}{m^*} \quad \tau = \frac{1}{P}$$


平均自由时间  $\tau$



$$\mu = \frac{q}{m^*} \tau = \frac{q}{m^*} \frac{1}{P} \quad (\text{可见, } \mu \propto \tau \text{ 或 } \frac{1}{P})$$

平均自由时间  $\tau$  越长，  
或者说单位时间内遭受散射的次数  $P$  越小，  
载流子的迁移率越高

## 2. 迁移率与杂质浓度/温度的关系

常用半导体锗、硅中

起主要散射作用的是晶格长纵声学波散射和电离杂质散射

散射机构

$$\text{电离杂质散射: } P_i \propto N_i T^{-\frac{3}{2}}$$

$$\text{长纵声学波: } P_s \propto T^{\frac{3}{2}}$$

$$\mu_i = \frac{q}{m^*} \frac{1}{P_i} \propto N_i^{-1} T^{3/2}$$

$$\mu_s = \frac{q}{m^*} \frac{1}{P_s} \propto T^{-3/2}$$

**$N$ 种散射机构同时存在时总的散射几率**  $P = \sum_N P_N$

$$P = \frac{q}{m^*} \frac{1}{\mu} \quad \downarrow \quad P_N = \frac{q}{m^*} \frac{1}{\mu_N}$$
$$\frac{1}{\mu} = \sum_N \frac{1}{\mu_N}$$

常用半导体锗、硅中起主要散射作用的是  
晶格长纵声学波散射和电离杂质散射

$$\mu_s = \frac{q}{m^*} \frac{1}{P_s} \quad \downarrow \quad \mu_i = \frac{q}{m^*} \frac{1}{P_i}$$

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_s} + \frac{1}{\mu_i} = \frac{m^*}{q} (P_s + P_i) = \frac{m^*}{q} (AT^{3/2} + BN_i T^{-3/2})$$

$$P_s \propto T^{3/2}$$

$$P_i \propto N_i T^{-3/2}$$

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

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

数学公式  $\longleftrightarrow$  物理意义

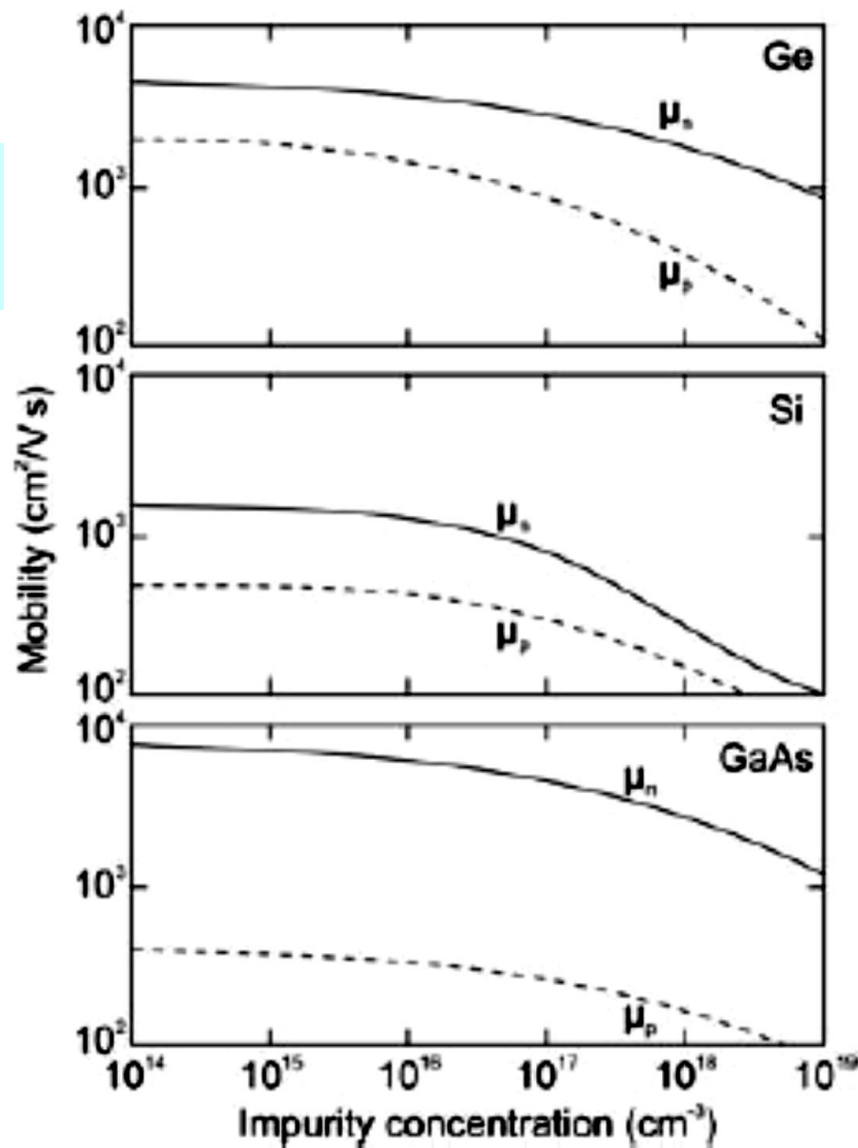
迁移率与杂质浓度的关系（图4-14b）：

### ■ 单调递减

理解：

温度一定时（晶格振动散射不变），杂质越多其散射作用越强，迁移率越小

■ 通过掺杂增加载流子浓度来提高电导率，但同时会引起迁移率下降！



## 迁移率与温度的关系（图4-13）：

$$\mu_i \propto N_i^{-1} T^{3/2} \quad \mu_s \propto T^{-3/2}$$

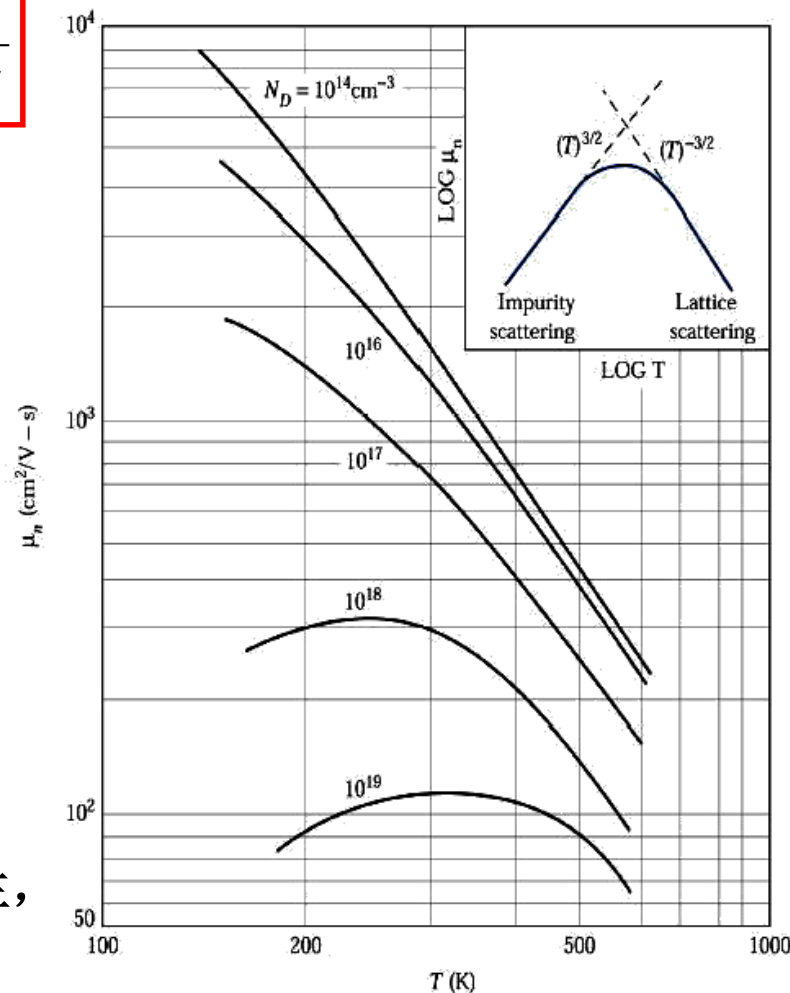
两种散射机构中温度的影响趋势正好相反，仍然归结到哪种散射机构占主导地位的问题

衡量二者的权重！

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

杂质浓度  $N_i$  很小时：高纯（如  $10^{13} \text{cm}^{-3}$ ）  
或轻掺杂（如  $10^{17} \text{cm}^{-3}$ ）

- 晶格振动散射占优， $T \uparrow$ ， $\mu \downarrow$
- 杂质浓度相对较高时，其散射作用较强，  
迁移率随温度下降的程度较轻



杂质浓度  $N_i$  很大时：高掺杂（如  $10^{19} \text{cm}^{-3}$ ）

- 温度不太高时：电离杂质散射占优，此时  $T \uparrow$ ， $\mu \uparrow$
- 温度很高时（如  $250^\circ \text{C}$ ）：又以晶格振动散射为主，  
此时  $T \uparrow$ ， $\mu \downarrow$

### 3. 电阻率与杂质浓度/温度的关系

$$\sigma = nq\mu_n + pq\mu_p$$

载流子浓度 ✓

迁移率 ✓

本征半导体:

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

$$\rho_i = \frac{1}{n_i q (\mu_n + \mu_p)}$$

n型半导体:

$$\sigma = nq\mu_n$$

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n}$$

p型半导体:

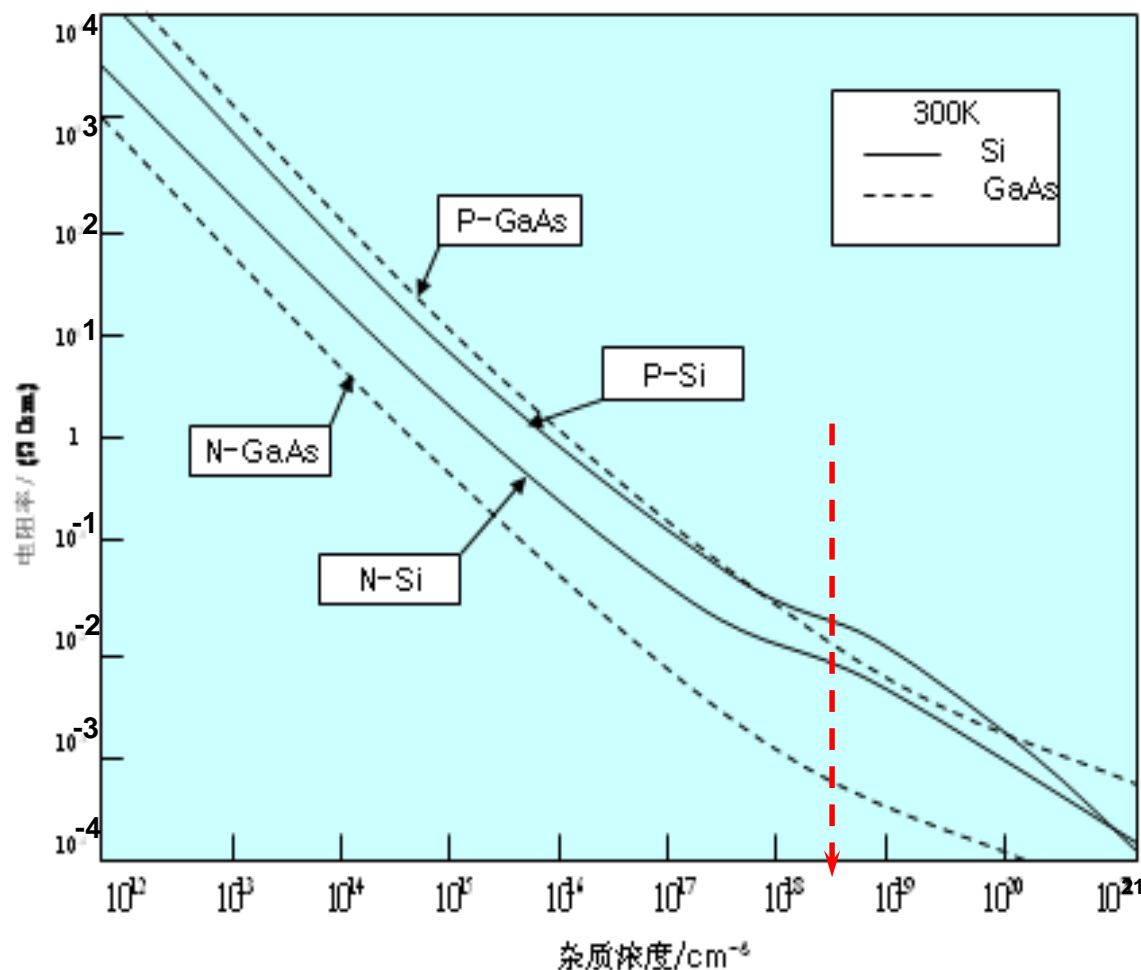
$$\sigma = pq\mu_p$$

$$\rho = \frac{1}{pq\mu_p}$$

# (1) 电阻率与杂质浓度的关系

$$\rho = \frac{1}{nq\mu_n}$$

$$\ln \rho = -\ln n - \ln(q\mu_n)$$



硅、砷化镓300K时电阻率与杂质浓度关系（对数坐标）

1. 轻掺杂时：此时迁移率虽随杂质浓度下降，但不明显；**300K**时为饱和区，杂质全电离

$$\ln \rho = -\ln N_D - \ln(q\mu_n)$$

因此，呈直线

2. 杂质浓度很高时，偏离直线

◆ 逐渐出现简并化，杂质不能全电离

◆ 迁移率随杂质浓度升高而显著下降



# (1) 电阻率与杂质浓度的关系 $\rho = \frac{1}{nq\mu_n}$

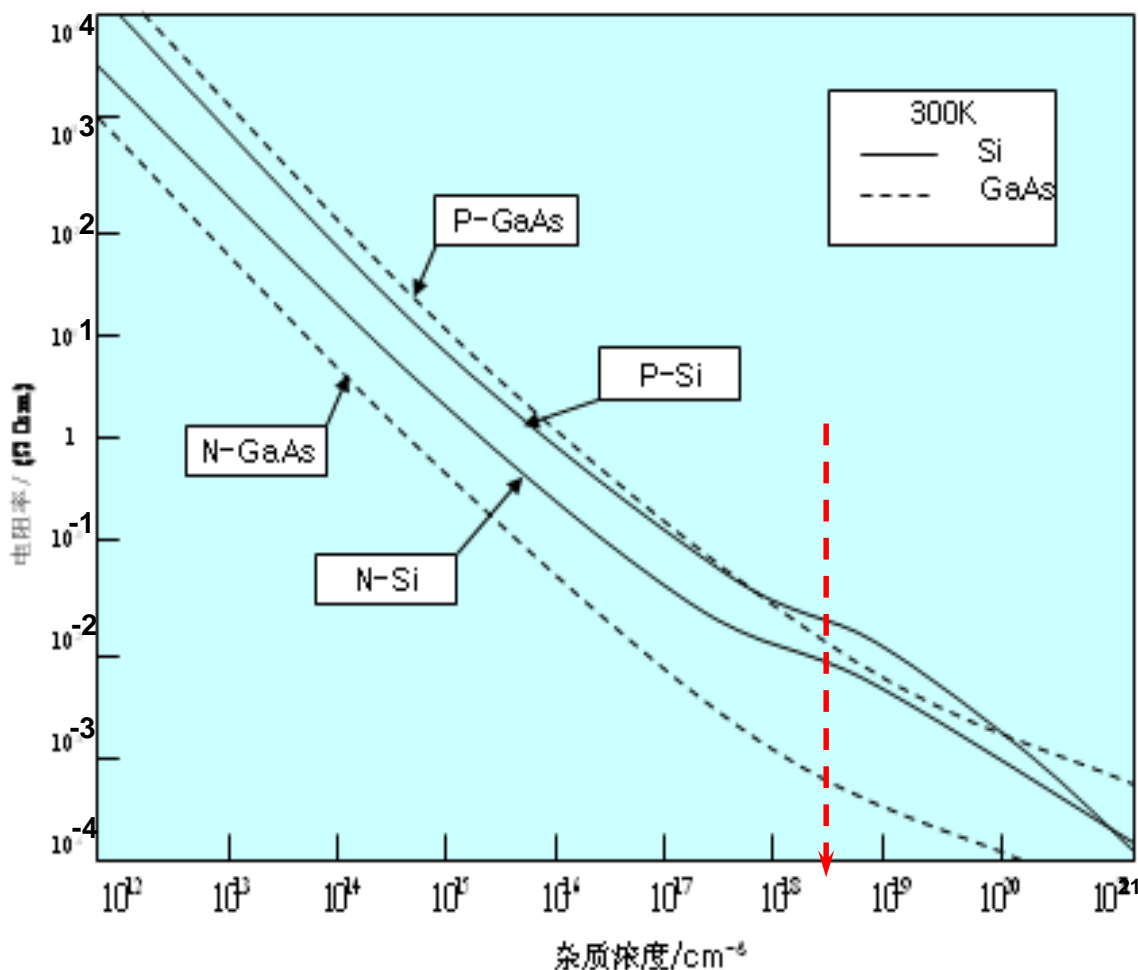
## 实际应用:

理论在得到实践证实的同时，得以进一步指导实践，**意义所在!**

1. 根据实际需求确定掺杂浓度，控制导电性能，指导实践工艺
2. 通过测量电阻率得到杂质浓度，检验提纯效果

电阻率越高，说明材料越纯

**想一想:** 适用于高度补偿材料吗?



硅、锗、砷化镓300K时电阻率与杂质浓度关系（对数坐标）

## (2) 电阻率随温度的变化

纯（本征）半导体： $n_i$ 随温度上升急剧增加，而迁移率随 $T$ 升高有所下降，所以**本征半导体的电阻率随着温度增加而单调下降**，这是半导体区别于金属的一个重要特征。

$$\rho_i = \frac{1}{n_i q (\mu_n + \mu_p)}$$

杂质半导体：

载流子浓度：杂质电离 **and** 本征激发

有何特征？

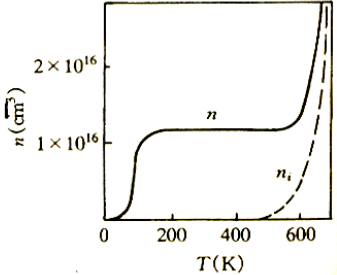
迁移率：电离杂质散射 **and** 晶格振动散射

均受到杂质和温度的影响，因此共同作用、相互制约

# 硅的电阻率与温度的关系 (n型硅且施主杂质浓度一定时)

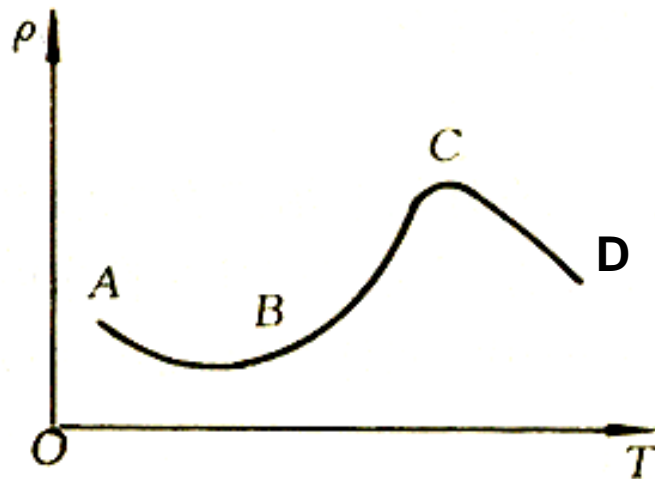
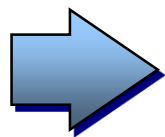
$$\rho = \frac{1}{nq\mu}$$

$n$  (cm<sup>-3</sup>)



$T$  (K)

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



## 低温区: A-B

$n$ : 低温弱电离区、中间电离、强电离直至饱和区前,  $T \uparrow$ ,  $n \uparrow$ ;

$\mu$ : 电离杂质散射占优,  $T \uparrow$ ,  $\mu \uparrow$

故  $\rho \downarrow$

## 饱和区: B-C (类似金属)

$n$ : 饱和区杂质全部电离, 本征激发还不十分明显, 载流子浓度基本不变;

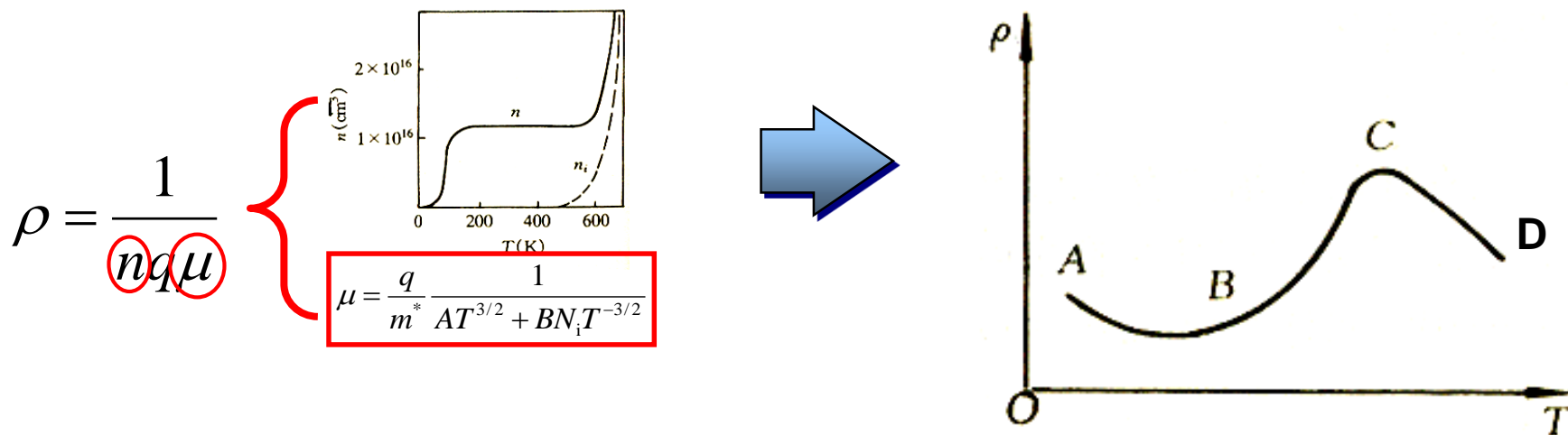
$\mu$ : 随温度升高, 以晶格振动散射逐渐上升为主要矛盾,  $\mu$  随  $T \uparrow$  而下降

故  $\rho \uparrow$

## 本征区: C-D (类似本征半导体)

进入本征区, 本征激发很快增加并成为主要矛盾,  $n$  迅速增大, 足以抵消晶格振动散射加剧使  $\mu$  下降的影响, 故  $\rho \downarrow$

## 硅的电阻率与温度的关系（n型硅且施主杂质浓度一定时）



- ◆ 杂质浓度越高，进入本征导电占优势的温度也越高。
- ◆ 材料的禁带宽度越大，同一温度下的本征载流子浓度就越低，进入本征导电的温度也越高。
- ◆ 温度高到本征导电起主要作用时，一般器件就不能正常工作，对应器件的极限工作温度。例如：硅器件的极限工作温度**520K**、锗**370K**（ $E_g$ 比Si小）；GaAs**720K**（ $E_g$ 比Si大）更适宜于制造大功率器件。

## 3.4 强电场效应

### 1. 欧姆定律的偏离

实验表明：在外电场不是很强时，欧姆定律成立

$$J = \sigma |E|$$

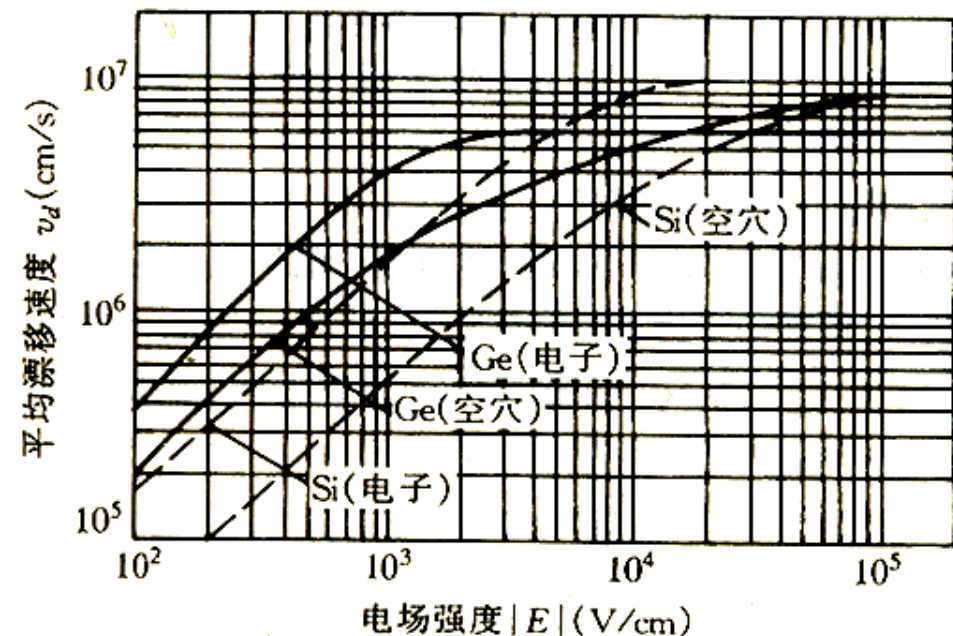
$$|\bar{v}_d| = \mu |E|$$

$$\sigma = nq\mu$$

对于给定的材料和一定温度下， $\mu$ 和 $\sigma$ 是常数

当电场超过一定强度后（如 $10^3\text{V/cm}$ ）， $J$ 和 $E$ 不再成正比，偏离了欧姆定律  
电导率不再是常数（Why？）

- 电场接近 $10^5\text{V/cm}$ 时，载流子浓度才开始改变
- 电场在 $10^3\sim 10^5\text{V/cm}$ 范围内欧姆定律的偏离说明  $|\bar{v}_d| = \mu |E|$  不再成立，  
（平均漂移速度趋于饱和，迁移率随电场改变）



当电场超过一定强度后（如 $10^3$  V/cm）  
平均漂移速度与 $E$ 不再成正比，趋于饱和  
 $\mu$  不再是常数，而是随场强改变  
 $J$ 与 $|E|$ 的关系不再成正比，偏离欧姆定律

思考：如何理解？

**强电场效应：**平均漂移速度随外电场增加的速度开始减缓，最后趋于一个不随场强变化的定值，即达到饱和漂移速度

## 2. 强电场效应的理论解释（知识扩充）

角度：载流子与晶格振动散射时的能量交换过程（能量损耗）

无外场时：载流子与晶格散射时以发射或吸收声子的形式与晶格交换动量和能量，二者交换的净能量为零，载流子的平均能量与晶格的相同，二者处于热平衡状态。

$$E(k') = E(k) \pm \hbar\omega$$

有外电场时：载流子从电场获得一定能量，从而获得一定速度，形成电流。但由于晶格振动散射，部分能量将以发射声子的形式将该能量传递给晶格（晶格吸收声子），载流子存在一定的能量损耗。

$$E(k') = E(k) - \hbar\omega$$

**弱电场：**载流子从电场中获得的能量较小，主要和声学波散射，由于声学波声子的能量远小于电子能量，载流子能量损失可忽略。

$$E(k') = E(k) - \hbar\omega \approx E(k) \quad \text{弹性散射！}$$

散射前后载流子能量（速度）基本保持不变，即可认为迁移率恒定，从而遵循欧姆定律。

〈电离杂质散射也是一种弹性散射，不引起能量损耗〉

**强电场：**随着场强逐渐提高，一方面，发射的声子数目增多，引起了较大的能量损耗，因此平均漂移速度随场强增大而增大的幅度减小（迁移率降低）；而当场强很高时，载流子从电场中获得的能量很多，速度很大，直到载流子能量高到可以和光学波声子能量相比时，将发射光学波声子（能量高），载流子能量损失严重，散射后速度严重下降（甚至可为零），直至在电场作用下又一次加速、又一次散射..... **非弹性散射！**

**载流子的能量（速度）受到光学波声子能量的限制！！！！**

平均漂移速度不会随场强增大而无限增大，而是趋于饱和，不随场强变化



强电场下：载流子从电场中获得的能量很多，载流子的平均能量比热平衡状态时的大，因而载流子和晶格不再处于热平衡系统，“热载流子”的温度和平均能量比晶格大，速度大，晶格振动散射更加强烈，迁移率降低。

$$\mu = \mu_0 \sqrt{\frac{T}{T_e}} \quad (\text{弱场下 } T_e = T, \mu = \mu_0, \text{服从欧姆定律})$$