

课程内容

- **研究主体：半导体中的电子**
- 第一部分：晶体结构
- 第二部分：能带结构
- **第三部分：热力学统计**
 - 研究半导体中载流子数目在不同温度下的行为
- 第四部分：载流子输运
- 第五部分：非平衡载流子

小结： 温度和费米分布

- 确定的温度对应某种确定的粒子能量分布
- 对于电子，该分布为费米分布

$$f(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}} + 1}$$

其中E代表能量， E_F 表示费米能级， k_B 为玻尔兹曼常数，T为温度
f(E)表示粒子占据能量为E的态的概率

- f(E)表示一个态中电子的平均个数
- 当状态数为g时，gf(E)表示能量为E的态中电子的（平均）个数
- 当态密度为g(E)时，g(E)f(E)dE表示能量为E到E+dE的态中电子的个数，积分得到载流子浓度

小结：半导体的载流子浓度

导带电子浓度 $n = \int \frac{1}{V} g_C(E) f(E) dE$

导带C：态密度 $g_C(E)$

电子数 $g_C(E) f(E) dE$

施主D：状态数 $V N_D$
 N_D ：施主浓度

电子数 $V N_D f(E)$

受主A：状态数 $V N_A$
 N_A ：受主浓度

电子数 $V N_A f(E)$
 空穴数 $V N_A (1 - f(E))$

价带V：态密度 $g_V(E)$

电子数 $g_V(E) f(E) dE$
 空穴数 $g_V(E) (1 - f(E)) dE$

V ：半导体体积

价带空穴浓度 $p = \int \frac{1}{V} g_V(E) (1 - f(E)) dE$

非简并半导体的载流子浓度

玻尔兹曼

导带电子浓度 $n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$

导带C: 状态数 VN_C
 N_C : 导带等效状态浓度

电子数 $VN_C f(E_C)$

施主D: 状态数 VN_D
 N_D : 施主浓度

电子数 $VN_D f_D(E_D)$

受主A: 状态数 VN_A
 N_A : 受主浓度

电子数 $VN_A f_A(E_A)$
 空穴数 $VN_A (1 - f_A(E_A))$

价带V: 态密度 VN_V
 N_V : 价带等效状态浓度

电子数 $VN_V f(E_V)$
 空穴数 $VN_V (1 - f(E_V))$

V : 半导体体积

价带空穴浓度 $p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$ 玻尔兹曼

要求: 非简并 - E_C 、 E_V 和 E_F 足够远 ($>$ 几个 $k_B T$, “几”至少要有 2.5)

小结：本征半导体

- 未掺杂（掺杂补偿）半导体

电子-空穴浓度乘积

$$np = n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_g}{k_B T}} = \frac{(m_{dn}^* m_{dp}^*)^{3/2}}{2\pi^3 \hbar^6} (k_B T)^3 e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

- 本征载流子浓度 n_i 与材料和温度有关
- 同一材料，随温度升高而迅速增大
- 同一温度下， E_g 越大， n_i 越小

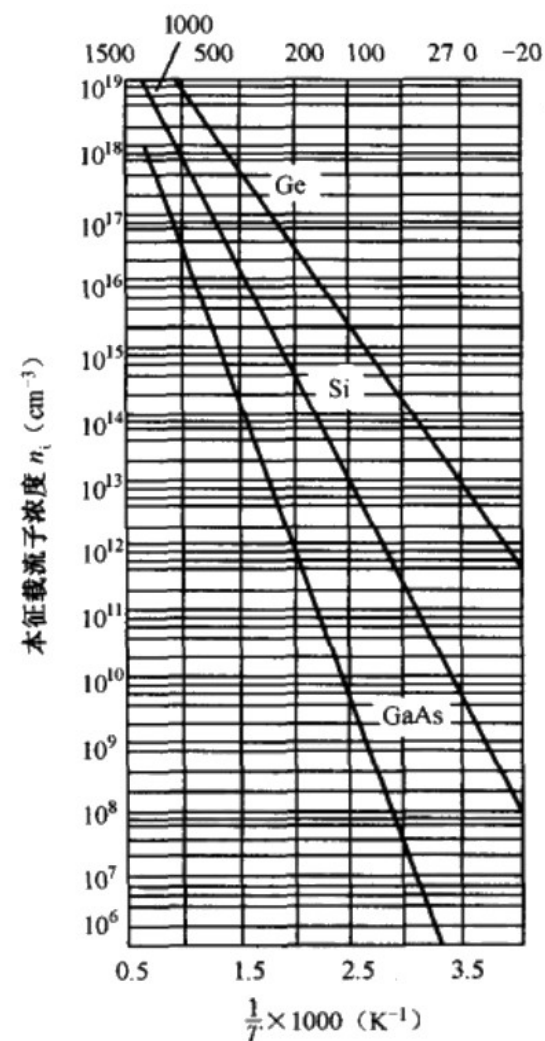


图 3-7 硅、锗、砷化镓的 $\ln n_i \sim 1/T$ 关系^[5]

小结：掺杂半导体

- 多子
- 1. 低温弱电离区
- 2. 中间电离区
- 3. 强电离区（饱和）
- 4. 过渡区
- 5. 高温本征激发区
- 注意：少数浓度在非简并条件下一直都可以用 $np = n_i^2$ 计算

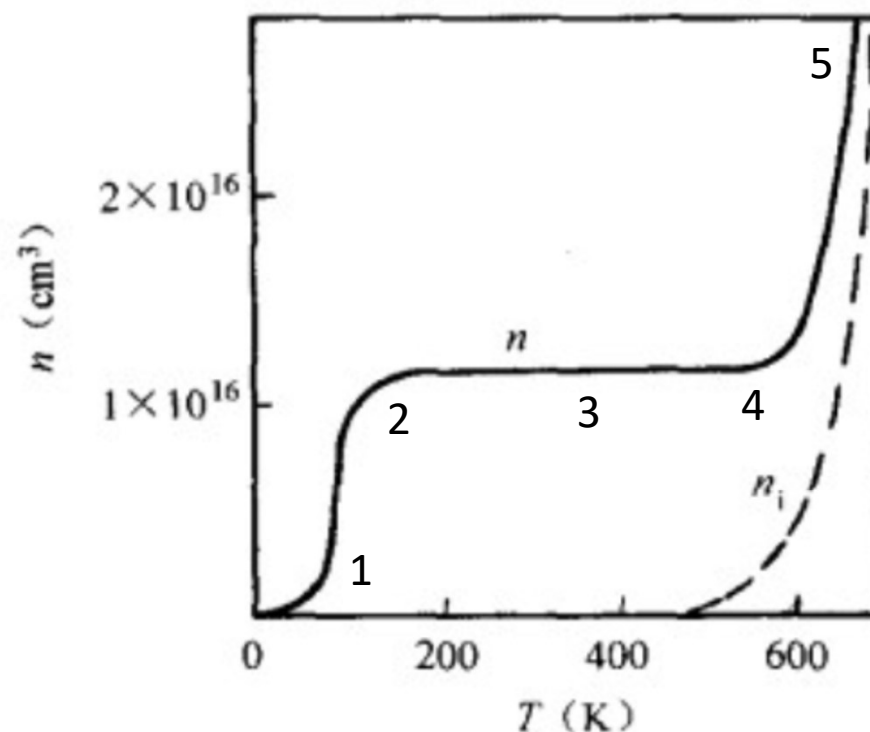
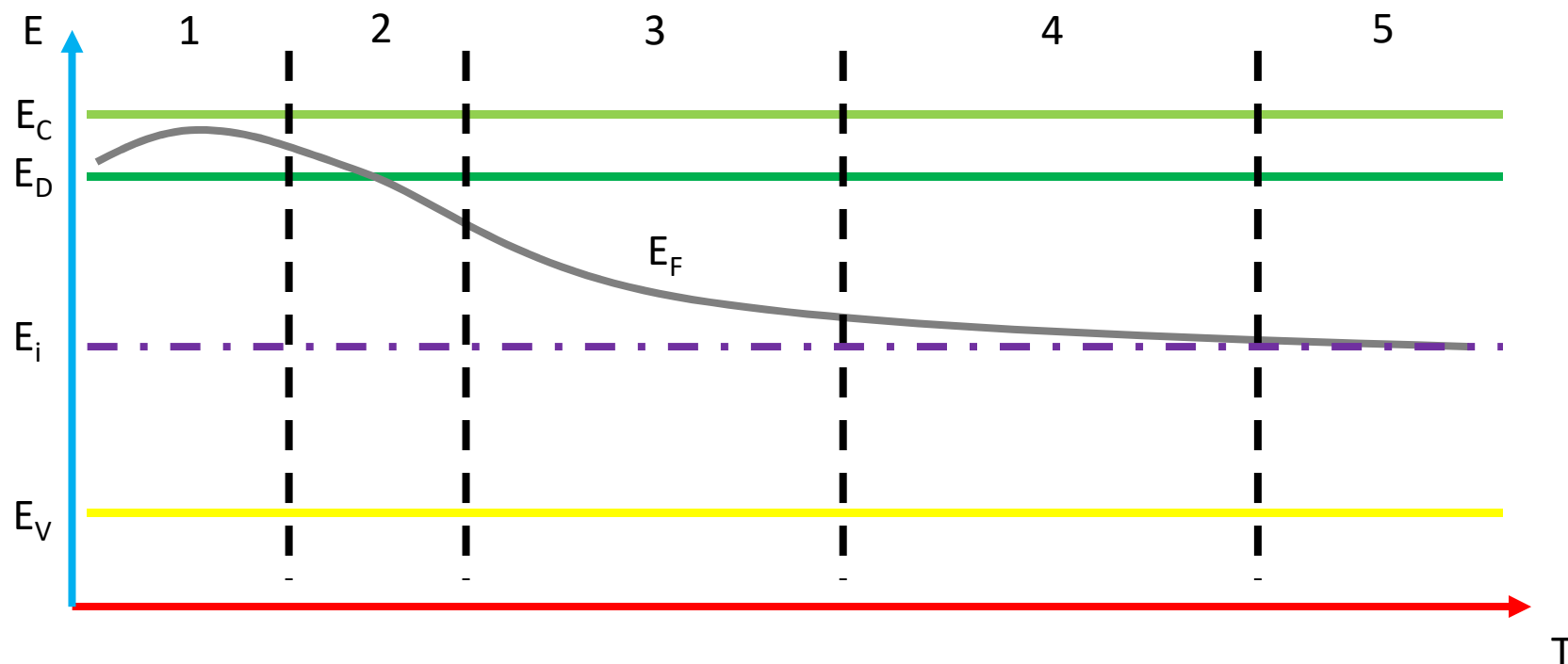


图 3-11 n 型硅的电子浓度与温度的关系^[8,9]曲线

n型半导体的费米能级

- 1. 低温弱电离区
- 2. 中间电离区
- 3. 强电离区
- 4. 过渡区
- 5. 高温本征激发区



n、p和 E_F 随杂质浓度的变化

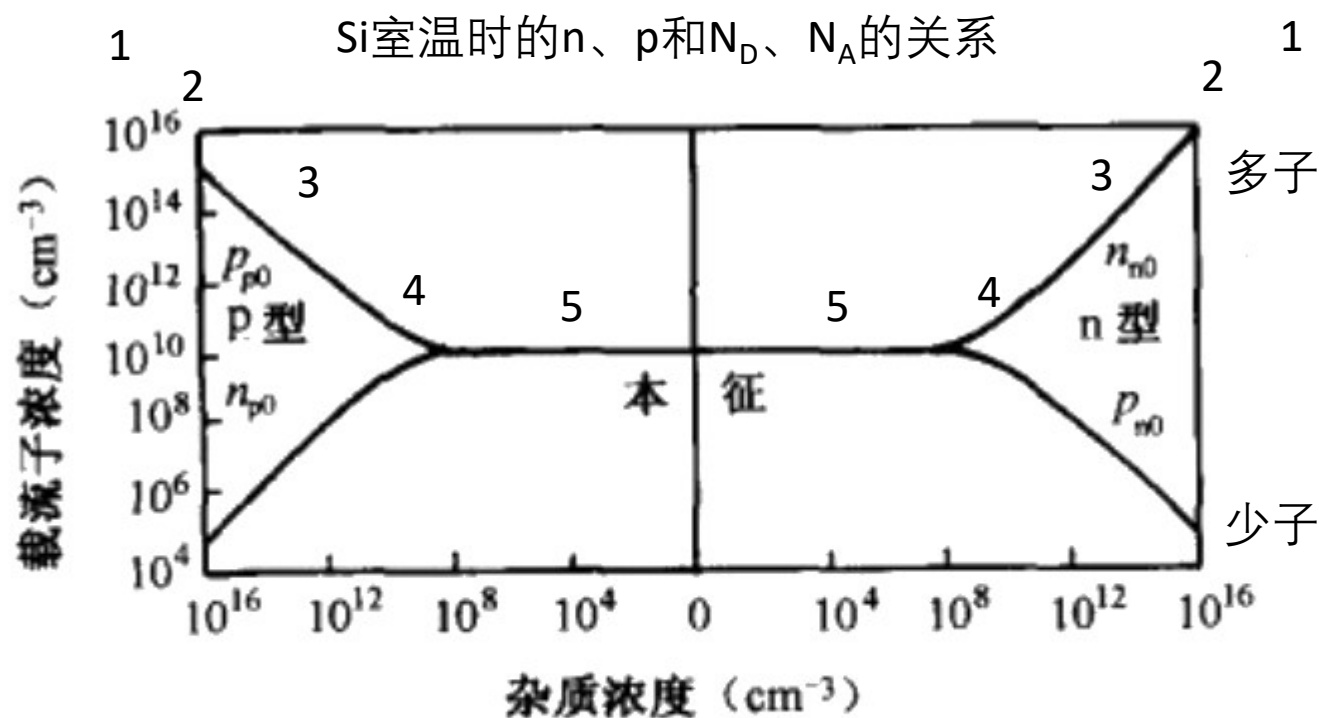


图 3-14 硅中载流子浓度与杂质浓度的关系

掺杂在一开始不影响载流子浓度。超过本征浓度之后，掺得越多载流子浓度越高

n 、 p 和 E_F 随杂质浓度的变化

掺杂浓度越高，载流子浓度越高

掺杂浓度越高， E_F 越靠近带边

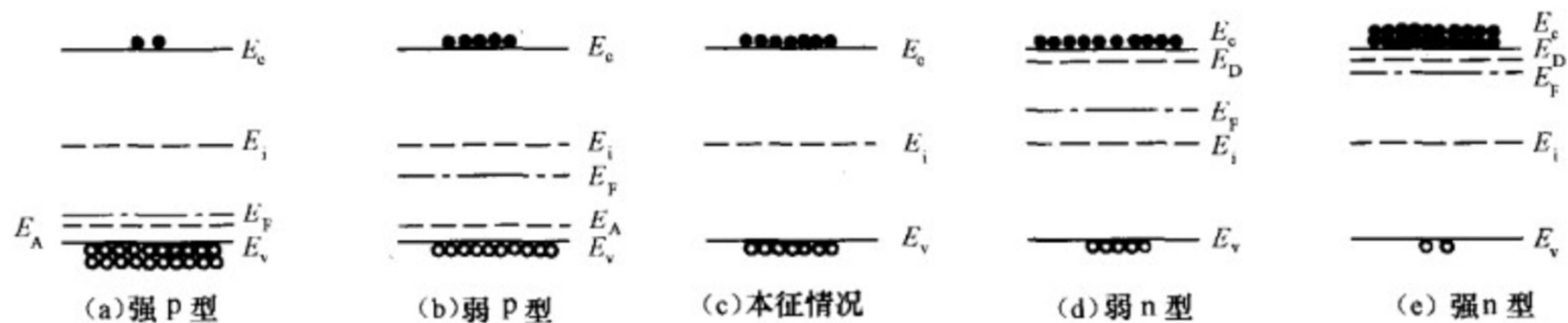


图 3-13 不同掺杂情况下的半导体的费米能级

霍耳效应

- 霍耳效应
 - 垂直的均匀磁场和电流产生正比于其值的横向电场, 比例系数为霍尔系数
 - 可用于直接测量载流子类型和浓度

$$E = \frac{JB}{\pm nq} = R_H JB$$

- p型半导体与n型半导体的霍耳系数方向相反
- 载流子浓度越小, 霍耳系数越大