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

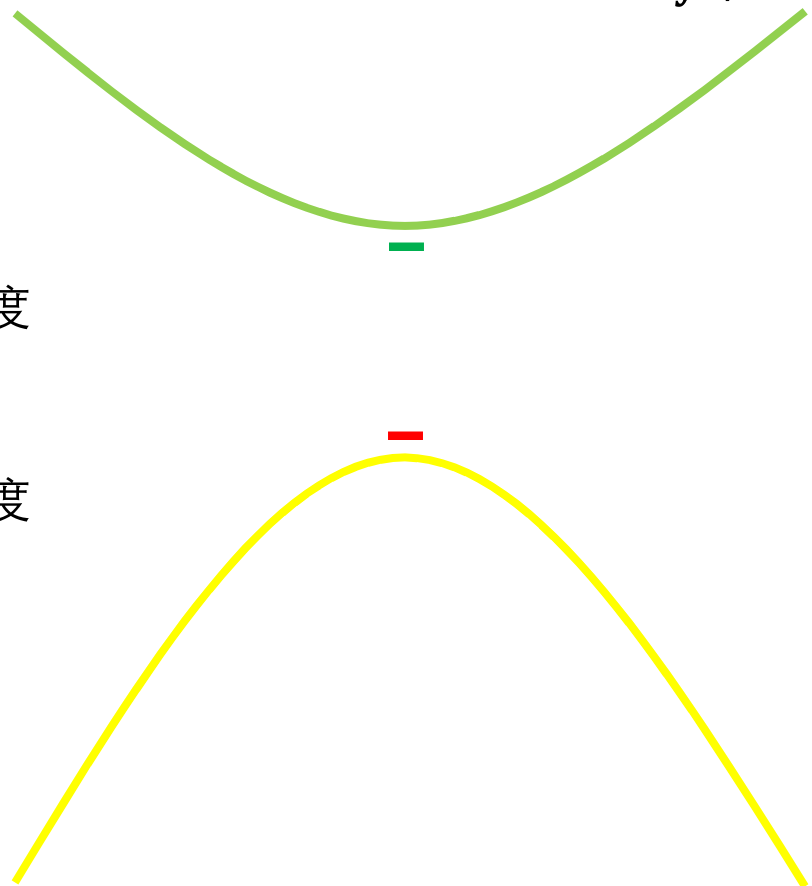
$$f(E)=\frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{k_B T}}+1}$$

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VN_D

N_D：施主浓度

电子数$VN_Df(E)$

受主A：状态数VN_A

N_D：受主浓度

电子数$VN_Af(E)$

空穴数$VN_A(1\text{-}f(E))$

价带V：态密度$g_V(E)$

电子数$g_V(E)f(E)dE$

空穴数$g_V(E)(1\text{-}f(E))dE$

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 —— 电子数$VN_C f(E_C)$

N_C：导带等效状态浓度

施主D：状态数VN_D —— 电子数$VN_D f(E_D)$

N_D：施主浓度

受主A：状态数VN_A —— 电子数$VN_A f(E_A)$

N_D：受主浓度 —— 空穴数$VN_A(1-f(E_A))$

价带V：态密度VN_V —— 电子数$VN_V f(E_V)$

N_V：价带等效状态浓度 —— 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_BT，“几”至少要有2.5）

小结：本征半导体载流子浓度

- 仅考虑导带底“能级”和价带顶“能级”

载流子浓度的计算结果

$$n = 2\frac{(m_{dn}^{*}k_B T/2\pi)^{3/2}}{\hbar^3}e^{-\frac{E_C-E_F}{k_B T}} = N_C e^{-\frac{E_C-E_F}{k_B T}}$$

$$p = 2\frac{(m_{dp}^{*}k_B T/2\pi)^{3/2}}{\hbar^3}e^{-\frac{E_F-E_V}{k_B T}} = N_V e^{-\frac{E_F-E_V}{k_B T}}$$

- 适用于非简并半导体+热平衡态

小结：本征半导体模型求解

- 1.列出导带价带载流子浓度

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} \qquad p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$$

- 2.“巧解”求出本征载流子浓度

$$n_i = \sqrt{np} = \sqrt{N_C N_V e^{-\frac{E_g}{k_B T}}} = \frac{(m_n^* m_p^*)^{3/4}}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\hbar^3}(k_B T)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

- 3.利用电中性条件求出本征费米能级

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}} = p$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_V - k_B T \log\frac{N_C}{N_V}) \equiv E_i$$

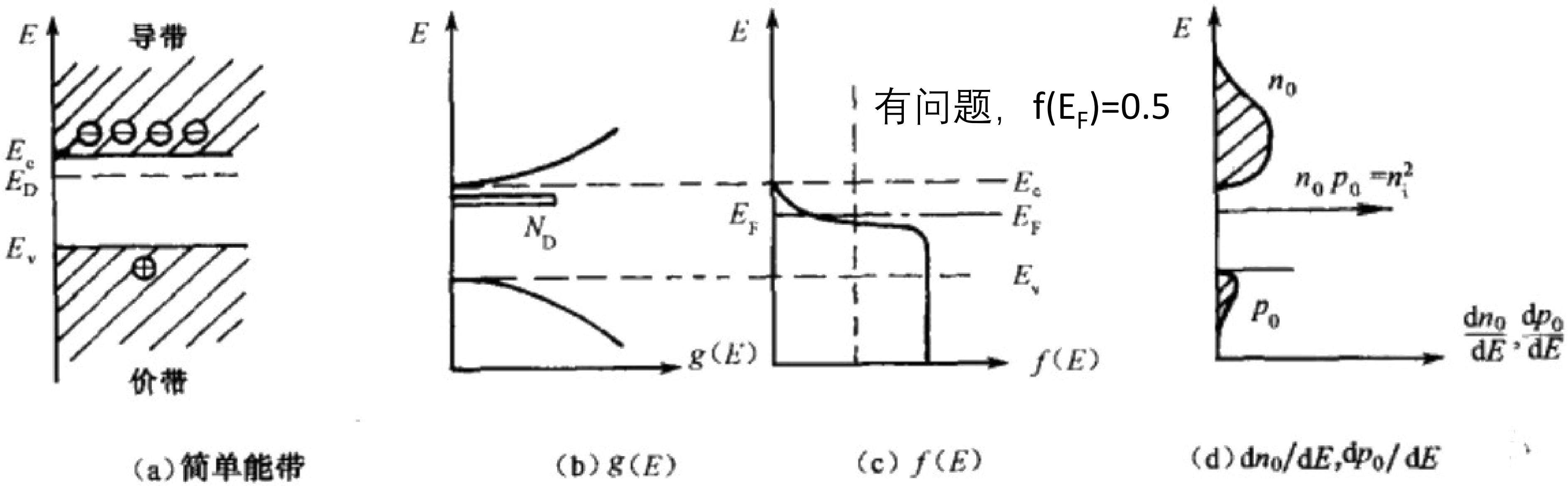
通常禁带不是太窄的半导体都满足非简并条件

第三章：大纲

- 回顾热力学里温度的概念（复习）
- **电子系统中温度和能量分布的关系**
  - 费米分布
  - 态密度（复习第二章）
  - 本征半导体中的载流子浓度
  - **掺杂半导体中的载流子浓度**
- 霍耳效应（教材12.1）

杂质半导体（n型）

能带　　态密度　　费米分布　　单位能量中的载流子浓度



有问题，$f(E_F)=0.5$

图 3-8　n 型半导体[5]

n型半导体E_F高于E_i

杂质半导体（p型）

能带　　态密度　　费米分布　　单位能量中的载流子浓度

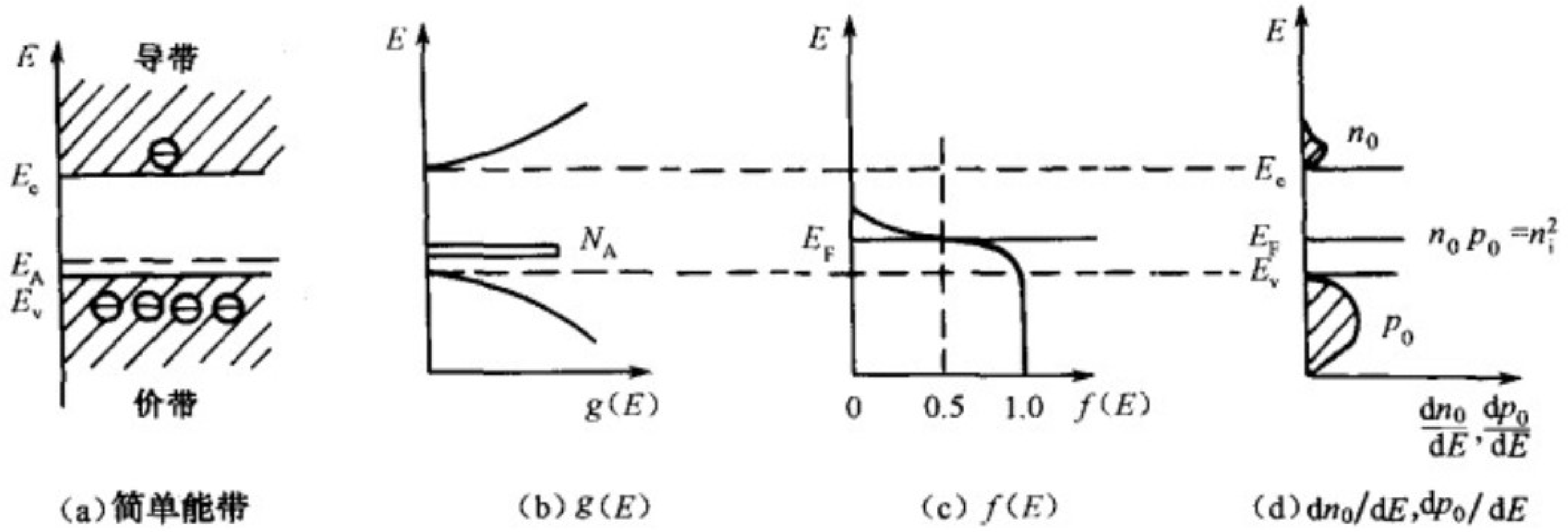


图 3-12　p 型半导体的能带

p型半导体E_F低于E_i

非简并半导体的载流子浓度

玻尔兹曼

导带电子浓度 $n = N_C f(E_C)$

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$VN_D f(E_D)$

受主A：状态数VN_A

N_D：受主浓度

电子数$VN_A f(E_A)$

空穴数$VN_A(1-f(E_A))$

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$VN_V(1-f(E_V))$

玻尔兹曼

V：半导体体积

价带空穴浓度 $p = N_V(1 - f(E_V))$

要求：非简并 – E_C、E_V和E_F足够远（>几个k_BT，“几”至少要有2.5）

杂质能级的费米分布函数

电子在能带中服从费米分布

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

但在施主能级中，电子服从的费米分布略有不同

$$f_D(E_D)=\frac{1}{\frac{1}{g_D}e^{\frac{E_D-E_F}{k_BT}}+1}$$ 其中g_D为导带的简并度（包含自旋）

受主能级中，空穴服从的费米分布也略有不同

$$1-f_A(E_A)=\frac{1}{\frac{1}{g_A}e^{\frac{E_F-E_A}{k_BT}}+1}$$ 其中g_A为价带的简并度（包含自旋）

g_D和g_A合称简并因子

注意：这和“简并半导体”（玻尔兹曼近似所需满足的条件）完全无关！

杂质能级的占据概率

- 杂质能级和能带中的能级是有区别的：
  - 在能带中，每一个能级可容纳二个电子（自旋上下）
  - 有些时候还有多个能带（例如硅的价带：重空穴带、轻空穴带）
  - 电子或空穴占据杂质能级时，施主能级只能容纳一个电子，受主能级只能容纳一个空穴
  - 因此，需要对这个费米分布作出修正
- 对Si，Ge，GaAs等常见半导体，$g_D=2$，$g_A=4$
  - 导带：自旋上下
  - 价带：重空穴带自旋上下、轻空穴带自旋上下

掺杂半导体的载流子浓度

<u>玻尔兹曼</u>

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

导带C：状态数VN_C —— 电子数$VN_C f(E_C)$

N_C：导带等效状态浓度

施主D：状态数VN_D —— 电子数$VN_D f_D(E_D)$

N_D：施主浓度

<u>简并因子修正过的费米分布</u>

受主A：状态数VN_A —— 电子数$VN_A f_A(E_A)$

N_D：受主浓度 —— 空穴数$VN_A(1-f_A(E_A))$

价带V：态密度VN_V —— 电子数$VN_V f(E_V)$

N_V：价带等效状态浓度 —— 空穴数$VN_V(1-f(E_V))$

V：半导体体积

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

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）

掺杂半导体模型的解法

- 解法：
- 1.画出能级图，写出能级上的电子数
  - 即gf(E)。注意，其中含未知的E_F，无法直接计算
- 2.列出电子数守恒/电中性条件方程
  - 即所有电子数加起来等于多少
- 3.利用该方程求出E_F
- 4.利用E_F求出载流子浓度

掺杂半导体的电中性条件

- n型半导体（只考虑施主杂质）
  - $n = p + (N_D - n_D)$（考虑价带导带激发和施主激发）
  - $n_D=N_D f_D(E_D)$：施主能级上电子浓度
- p型半导体（只考虑受主杂质）
  - $n + (N_A - p_A) = p$（考虑价带导带激发和受主激发）
  - $p_A=N_A(1-f_A(E_A))$：受主能级上空穴浓度
- 半导体中既有施主杂质又有受主杂质时:
  - $n + (N_A - p_A) = p + (N_D - n_D)$（全部考虑）

n型半导体的载流子浓度

$$n = p + (N_D - n_D)$$

- 分情况讨论：温度从低到高
- T=0，无激发
- 低温，依照感性认识，施主容易激发，价带导带激发可忽略：$p \ll N_D - n_D$，$n = N_D - n_D$
    - 1. 低温弱电离区（杂质电离也很弱）
    - 2. 中间电离区
    - 3. 强电离区（杂质完全电离）
- 高温，价带导带激发不可忽略
    - 4. 过渡区（$p \sim N_D - n_D$）
    - 5. 高温本征激发区（$p \gg N_D - n_D$，$n = p$）

0. T=0，无激发

导带电子浓度 $n = 0$

导带C：状态数VN_C　　电子数$VN_Cf(E_C)=0$

N_C：导带等效状态浓度　　E_F

施主D：状态数VN_D　　电子数$VN_Df_D(E_D)=VN_D$

N_D：施主浓度

简并因子修正过的费米分布

受主A：状态数VN_A　　电子数$VN_Af_A(E_A)$

N_D：受主浓度　　空穴数$VN_A(1-f_A(E_A))$

暂时不看受主

价带V：态密度VN_V　　电子数$VN_Vf(E_V)=VN_V$

N_V：价带等效状态浓度　　空穴数$VN_V(1-f(E_V))=0$

V：半导体体积　　价带空穴浓度 $p = 0$

E_F在哪里？大致在$(E_C+E_D)/2$处

1.2.3.低温施主激发区

玻尔兹曼

施主能级电子浓度 $n_D = \dfrac{N_D}{\dfrac{1}{g_D} e^{\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$

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$VN_Cf(E_C)$

施主D：状态数VN_D

N_D：施主浓度

电子数$VN_Df_D(E_D)$

简并因子修正过的费米分布

受主A：状态数VN_A

N_D：受主浓度

暂时不看受主

电子数$VN_Af_A(E_A)$

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$VN_Vf(E_V)=VN_V$

空穴数$VN_V(1-f(E_V))=0$

V：半导体体积

价带空穴浓度 $p = N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}} \sim 0$

注意： $np = n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_C - E_V}{k_B T}}$ 还是成立

1. 低温弱电离区

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} \qquad n_D = \frac{N_D}{\frac{1}{g_D} e^{\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

电中性条件 $n = N_D - n_D$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D - n_D = \frac{N_D}{g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

温度较低时， $E_F > E_D$，T又很小，因此 $g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} \gg 1$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D - n_D \sim \frac{N_D}{g_D} e^{\frac{E_D - E_F}{k_B T}} \ll N_D$$

杂质电离很弱，叫做低温弱电离区

用巧解法得到电子浓度 $n = N_D - n_D = \left(\frac{N_C N_D}{g_D}\right)^{1/2} e^{-\frac{E_C - E_D}{2 k_B T}}$ 和哪些量成正比？

解电中性条件可得费米能级 $E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_D + k_B T \log \frac{N_D}{N_C g_D})$

1. 低温弱电离区

$$n = N_D - n_D = \left(\frac{N_C N_D}{g_D}\right)^{1/2} e^{-\frac{E_C - E_D}{2k_B T}}$$

$$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_D + k_B T \log\frac{N_D}{N_C g_D})$$

T=0，$E_F = \frac{1}{2}(E_C + E_D)$

N_C正比于$T^{3/2}$

$$\frac{dE_F}{dT} = \frac{1}{2}k_B(\log\frac{N_D}{N_C g_D} - \frac{3}{2})$$

通常半导体$g_D = 2$

$N_C < 0.11N_D$时，E_F上升；
$N_C > 0.11N_D$时，E_F下降

$N_C = 0.11N_D$时，E_F取极大值

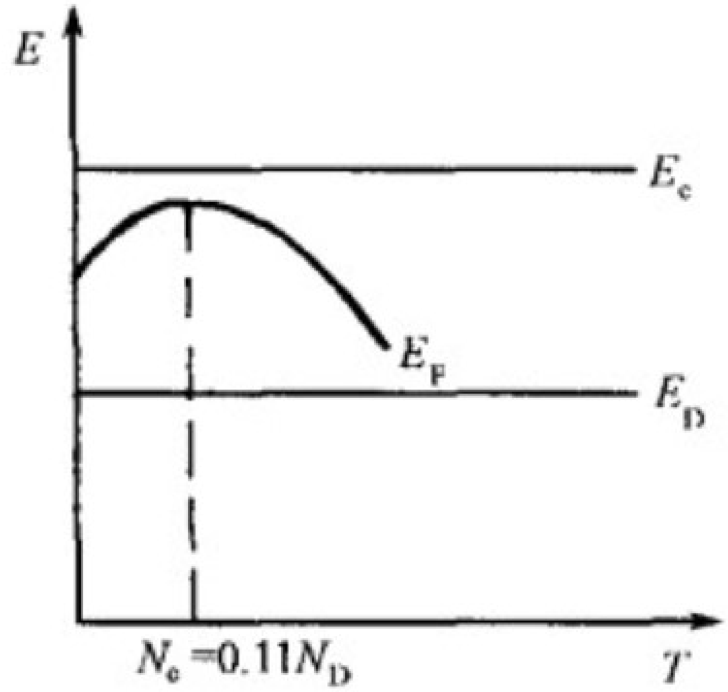


图 3-9 低温弱电离区 E_F 与 T 的关系

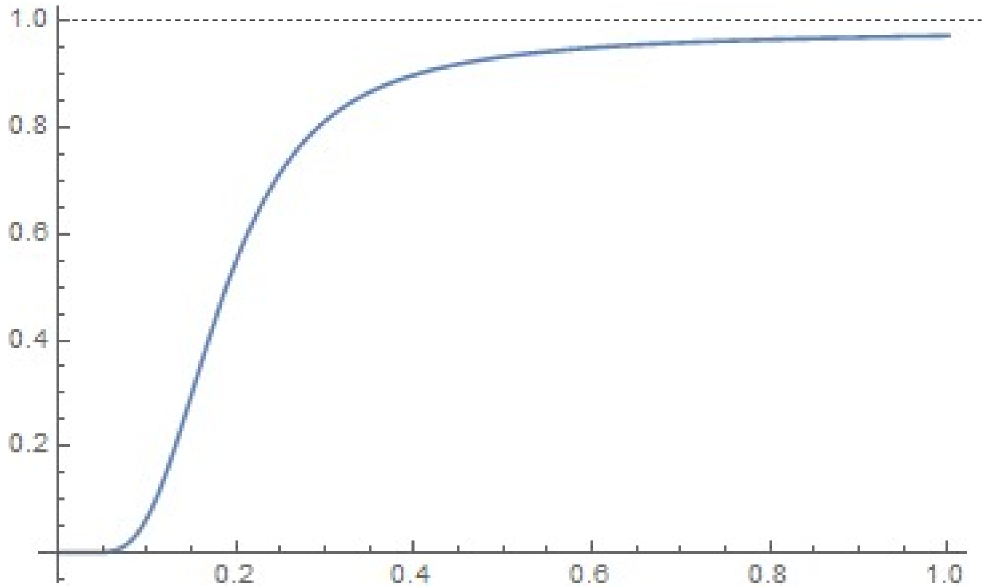
例题：简化的施主电离模型

- 假设电子能占据2个能级，能量间隔为ΔE。从低到高每个能级的状态数为g_1和g_2（$g_1 \ll g_2$）。电子总数为g_1。求温度为T时电子占据高能级的数目。

假设$g_2/g_1 = 100$

t（激发率）

占据高能级的数目为tg_1

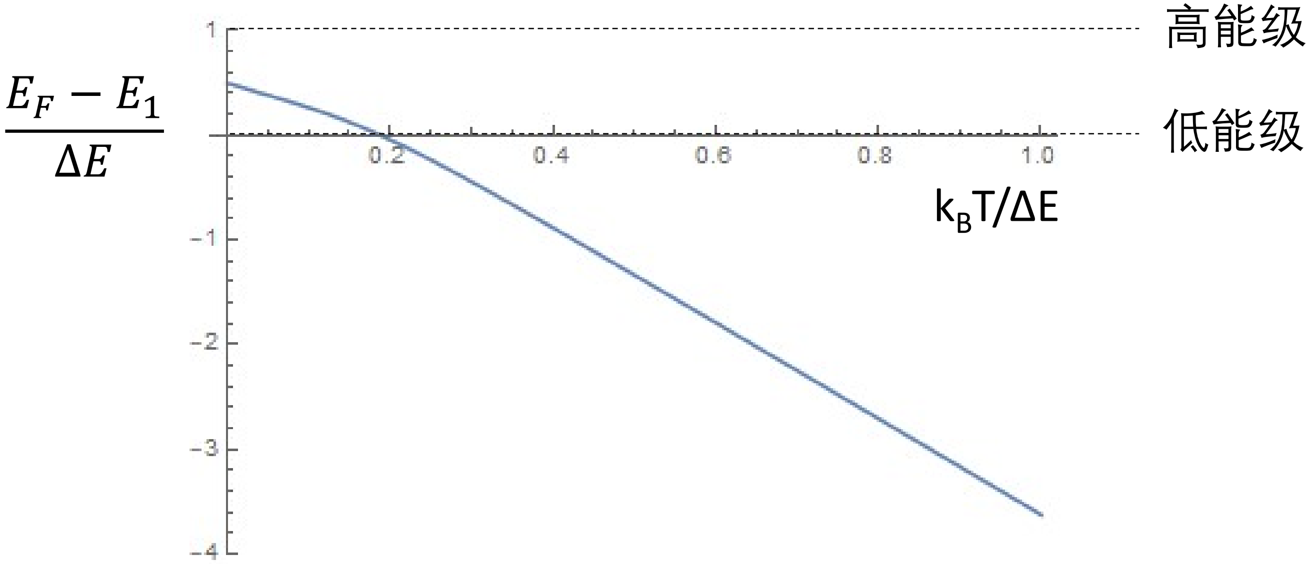


$k_B T/\Delta E$

例题：简化的施主电离模型

- 假设电子能占据2个能级，能量间隔为ΔE。从低到高每个能级的状态数为g_1和g_2（$g_1 \ll g_2$）。电子总数为g_1。求温度为T时电子占据高能级的数目。

假设$g_2/g_1 = 100$



简化模型中，没有E_F先增加后减小的现象；因为N_C是温度的函数

2. 中间电离区

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} \qquad n_D = \frac{N_D}{\frac{1}{g_D} e^{\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

电中性条件 $n = N_D - n_D$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D - n_D = \frac{N_D}{g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

温度适中时， $E_F \sim E_D$，因此 $g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} \sim 1$

此时不能进行进一步近似，叫做中间电离区

解电中性条件可得费米能级和电子浓度n。和简化的施主电离模型类似

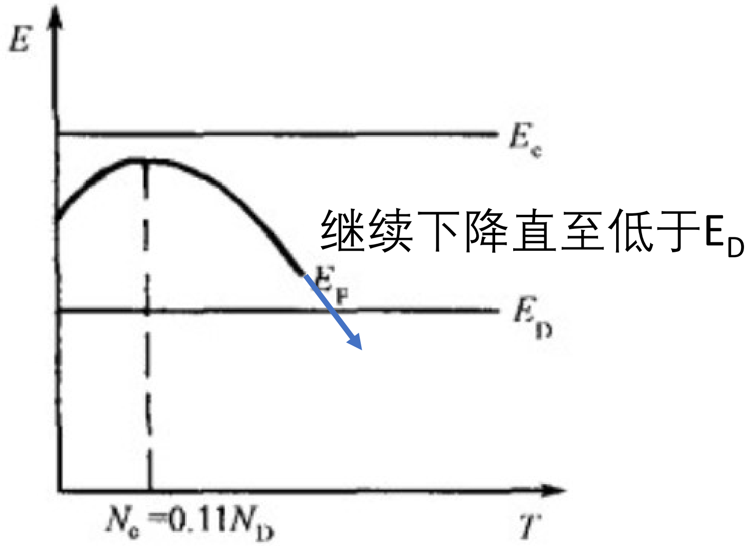
2. 中间电离区

解为 $$E_F = k_B T \log\left(\frac{\sqrt{1+\frac{4g_D N_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_B T}}}-1}{2g_D}\right)+E_D$$

$$n = \frac{N_C}{2g_D}e^{-\frac{E_C-E_D}{k_B T}}\left(\sqrt{1+\frac{4g_D N_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_B T}}}-1\right)$$

E_F继续下降

n继续上升



3. 强电离区（饱和区）

$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$　　$n_D = \dfrac{N_D}{\frac{1}{g_D} e^{\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$　　电中性条件　　$n = N_D - n_D$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D - n_D = \frac{N_D}{g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

温度升高时，$E_F < E_D$，E_F可降得很低，此时　$g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} \ll 1$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D - n_D \sim N_D$$

即施主完全电离（饱和）。解电中性条件可得费米能级

$$E_F = E_C - k_B T \log \frac{N_C}{N_D}$$

注意：N_C正比于$T^{3/2}$，不是常数　　E_F随着T上升继续下降　　$n \sim N_D$保持恒定

1.2.3.低温施主激发区

$$n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} \qquad n_D = \frac{N_D}{\frac{1}{g_D} e^{\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

电中性条件 $n = N_D - n_D$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D - n_D = \frac{N_D}{g_D e^{-\frac{E_D - E_F}{k_B T}} + 1}$$

1.2.3.三个区域的通解为 $E_F = k_B T \log\left(\frac{\sqrt{1 + \frac{4 g_D N_D}{N_C} e^{\frac{E_C - E_D}{k_B T}}} - 1}{2 g_D}\right) + E_D$

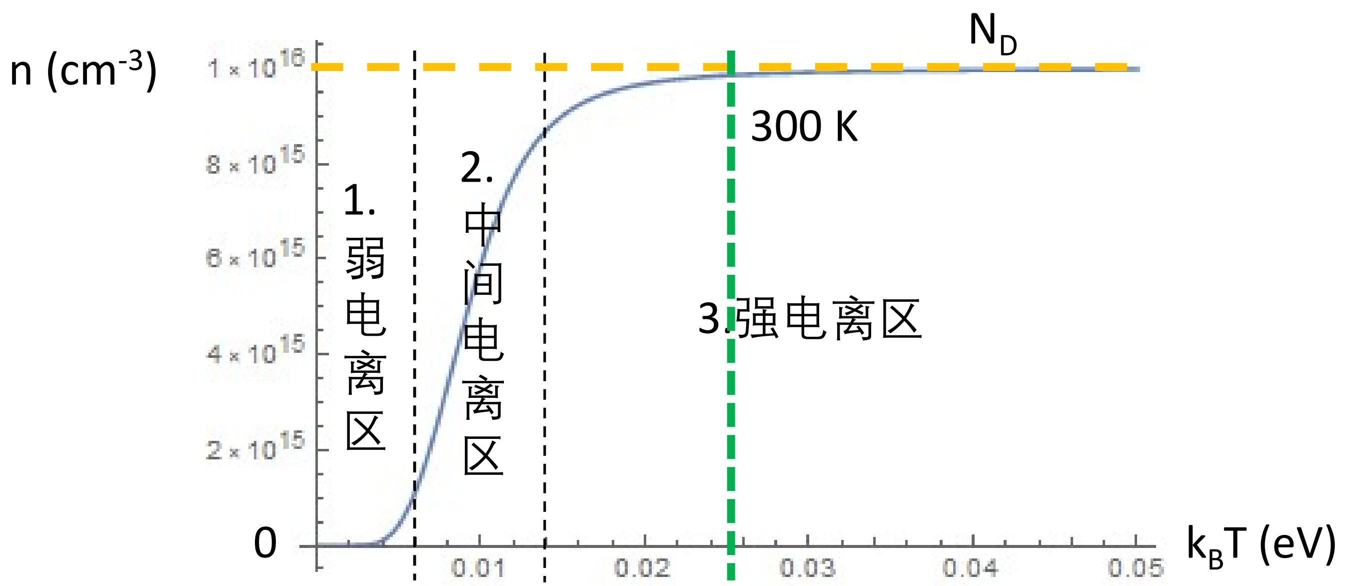
$$n = \frac{N_C}{2 g_D} e^{-\frac{E_C - E_D}{k_B T}} \left(\sqrt{1 + \frac{4 g_D N_D}{N_C} e^{\frac{E_C - E_D}{k_B T}}} - 1\right)$$

1.2.3.低温施主激发区

表 3-2　300K 下锗、硅、砷化镓的本征载流子浓度

各项参数	E_g(eV)	m_n^* (m_{dn})	m_p^* (m_{dp})	N_c(cm^{-3})	N_v(cm^{-3})	n_i (cm^{-3}) (计算值)	n_i(cm^{-3}) (测量值)
Ge	0.67	$0.56m_0$	$0.29m_0$	1.05×10^{19}	3.9×10^{18}	1.7×10^{13}	2.33×10^{13}
Si	1.12	$1.062m_0$	$0.59m_0$	2.8×10^{19}	1.1×10^{19}	7.8×10^{9}	1.02×10^{10}
GaAs	1.428	$0.068m_0$	$0.47m_0$	4.5×10^{17}	8.1×10^{18}	2.3×10^{6}	1.1×10^{7}

- 对于硅，取N_D=1e16 cm^{-3}，N_C（300 K）=1e19 cm^{-3}，E_C-E_D=50 meV，可算得



1.2.3.低温施主激发区

表 3-2　300K 下锗、硅、砷化镓的本征载流子浓度

各项参数	E_g(eV)	m_n^* (m_{dn})	m_p^* (m_{dp})	N_c(cm^{-3})	N_v(cm^{-3})	n_i (cm^{-3}) (计算值)	n_i(cm^{-3}) (测量值)
Ge	0.67	$0.56m_0$	$0.29m_0$	1.05×10^{19}	3.9×10^{18}	1.7×10^{13}	2.33×10^{13}
Si	1.12	$1.062m_0$	$0.59m_0$	2.8×10^{19}	1.1×10^{19}	7.8×10^{9}	1.02×10^{10}
GaAs	1.428	$0.068m_0$	$0.47m_0$	4.5×10^{17}	8.1×10^{18}	2.3×10^{6}	1.1×10^{7}

在哪个区域的判定标准

$$n=\frac{N_C}{2g_D}e^{-\frac{E_C-E_D}{k_BT}}\left(\sqrt{1+\frac{4g_DN_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_BT}}}-1\right)$$

T比较小， $\dfrac{4g_DN_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_BT}}\gg 1$ $\quad n\sim\left(\dfrac{N_CN_D}{g_D}\right)^{1/2}e^{-\frac{E_C-E_D}{2k_BT}}$ 为弱电离区

T比较大， $\dfrac{4g_DN_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_BT}}\ll 1$ $\quad n\sim\dfrac{N_C}{2g_D}e^{-\frac{E_C-E_D}{k_BT}}\left(1+\dfrac{2g_DN_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_BT}}-1\right)=N_D$

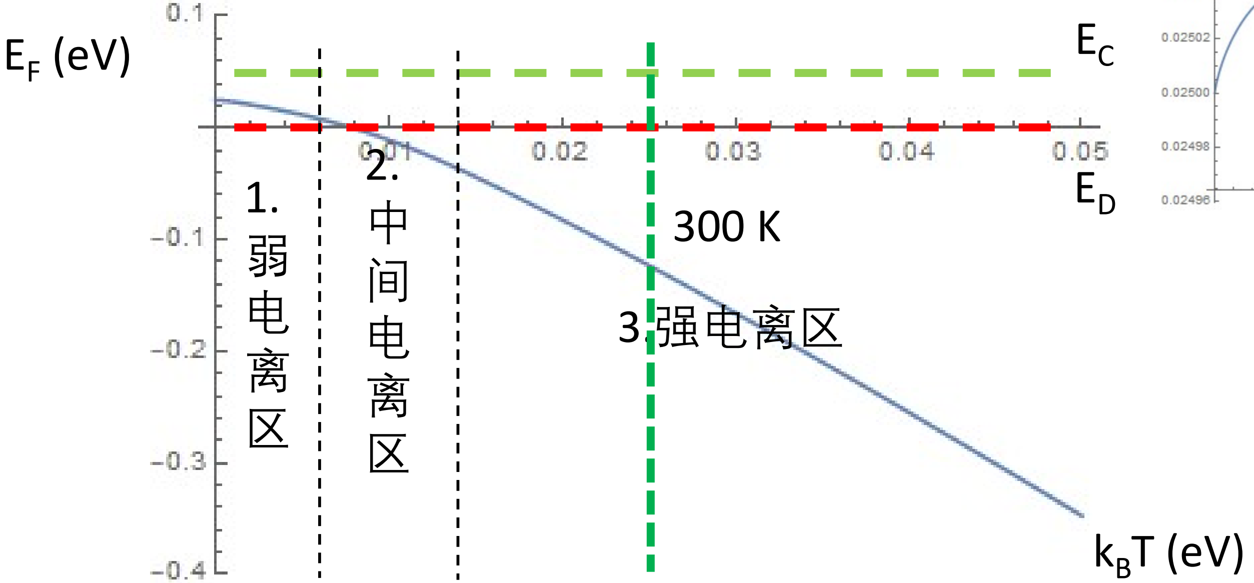
为强电离区

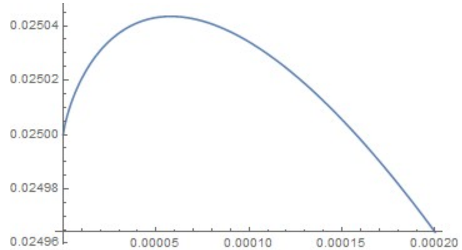
1.2.3.低温施主激发区

表 3-2　300K 下锗、硅、砷化镓的本征载流子浓度

各项参数	E_g(eV)	m_n^* (m_{dn})	m_p^* (m_{dp})	N_c(cm^{-3})	N_v(cm^{-3})	n_i (cm^{-3}) (计算值)	n_i(cm^{-3}) (测量值)
Ge	0.67	$0.56m_0$	$0.29m_0$	1.05×10^{19}	3.9×10^{18}	1.7×10^{13}	2.33×10^{13}
Si	1.12	$1.062m_0$	$0.59m_0$	2.8×10^{19}	1.1×10^{19}	7.8×10^{9}	1.02×10^{10}
GaAs	1.428	$0.068m_0$	$0.47m_0$	4.5×10^{17}	8.1×10^{18}	2.3×10^{6}	1.1×10^{7}

- 对于硅， 取N_D=1e16 cm^{-3}， N_C（300 K）=1e19 cm^{-3}， E_C-E_D=50 meV， 可算得





左上角放大

n型半导体的载流子浓度

$$n = p + (N_D - n_D)$$

- 分情况讨论：温度从低到高
- T=0，无激发
- 低温，依照感性认识，施主容易激发，价带导带激发可忽略：$p \ll N_D - n_D$，$n = N_D - n_D$
  - 1. 低温弱电离区（杂质电离也很弱）
  - 2. 中间电离区
  - 3. 强电离区（杂质完全电离）
- 高温，价带导带激发不可忽略
  - 4. 过渡区（$p \sim N_D - n_D$）
  - 5. 高温本征激发区（$p \gg N_D - n_D$，$n = p$）

4.5. 高温价带激发区

玻尔兹曼

施主能级电子浓度 $n_D = 0$

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$VN_D f_D(E_D)$

简并因子修正过的费米分布

受主A：状态数VN_A

N_D：受主浓度

暂时不看受主

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

4. 过渡区

导带电子浓度 $n = N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}}$ 施主能级电子浓度 $n_D = 0$

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

电中性条件 $n = (N_D - n_D) + p = N_D + p$

$$N_C e^{-\frac{E_C - E_F}{k_B T}} = n = N_D + p = N_D + N_V e^{-\frac{E_F - E_V}{k_B T}}$$

注意： $np = n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_C - E_V}{k_B T}}$ 还是成立

此时可直接解一元二次方程$n = N_D + n_i^2/n$，得到

$$n = \frac{N_D}{2}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2}}\right) \quad p = n - N_D = \frac{N_D}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2}}\right)$$

也可算出 $E_F = E_i + k_B T \operatorname{arcsh} \frac{N_D}{2n_i} = \frac{1}{2}(E_C + E_V - k_B T \log \frac{N_C}{N_V}) + k_B T \operatorname{arcsh} \frac{N_D}{2n_i}$

4. 过渡区

$$n = \frac{N_D}{2}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2}}\right) \quad p = n - N_D = \frac{N_D}{2}\left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{N_D^2}}\right)$$

如果温度较低　$N_D \gg 2n_i$　$(n_i^2 = N_C N_V e^{-\frac{E_C - E_V}{k_B T}})$

则　$n \sim \frac{N_D}{2}\left(1 + 1 + \frac{2n_i^2}{N_D^2}\right) = N_D + \frac{n_i^2}{N_D}$　　$p = n - N_D \sim \frac{n_i^2}{N_D}$

即：电子浓度约等于施主浓度+本征激发浓度，空穴浓度约等于本征激发浓度

此时　$E_F = E_i + k_B T \operatorname{arcsh} \frac{N_D}{2n_i}$　远离本征费米能级E_i

比较靠近3.强电离区/饱和区

4. 过渡区

$$n=\frac{N_D}{2}\left(1+\sqrt{1+\frac{4n_i^2}{N_D^2}}\right) \quad p=n-N_D=\frac{N_D}{2}\left(-1+\sqrt{1+\frac{4n_i^2}{N_D^2}}\right)$$

如果温度较高 $N_D \ll 2n_i \quad (n_i^2=N_C N_V e^{-\frac{E_C-E_V}{k_B T}})$

则 $n=\frac{N_D}{2}\left(1+\frac{2n_i}{N_D}\right)\sim\frac{N_D}{2}+n_i \qquad p=n-N_D\sim-\frac{N_D}{2}+n_i$

即：电子浓度约等于本征激发浓度+施主浓度/2，
空穴浓度约等于本征激发浓度-施主浓度/2

此时 $E_F=E_i+k_B T\mathrm{arcsh}\frac{N_D}{2n_i}\sim E_i$ 靠近本征费米能级E_i

比较接近本征激发

5. 高温本征激发区

$N_D \ll 2n_i$ 的时候，p>>N_D

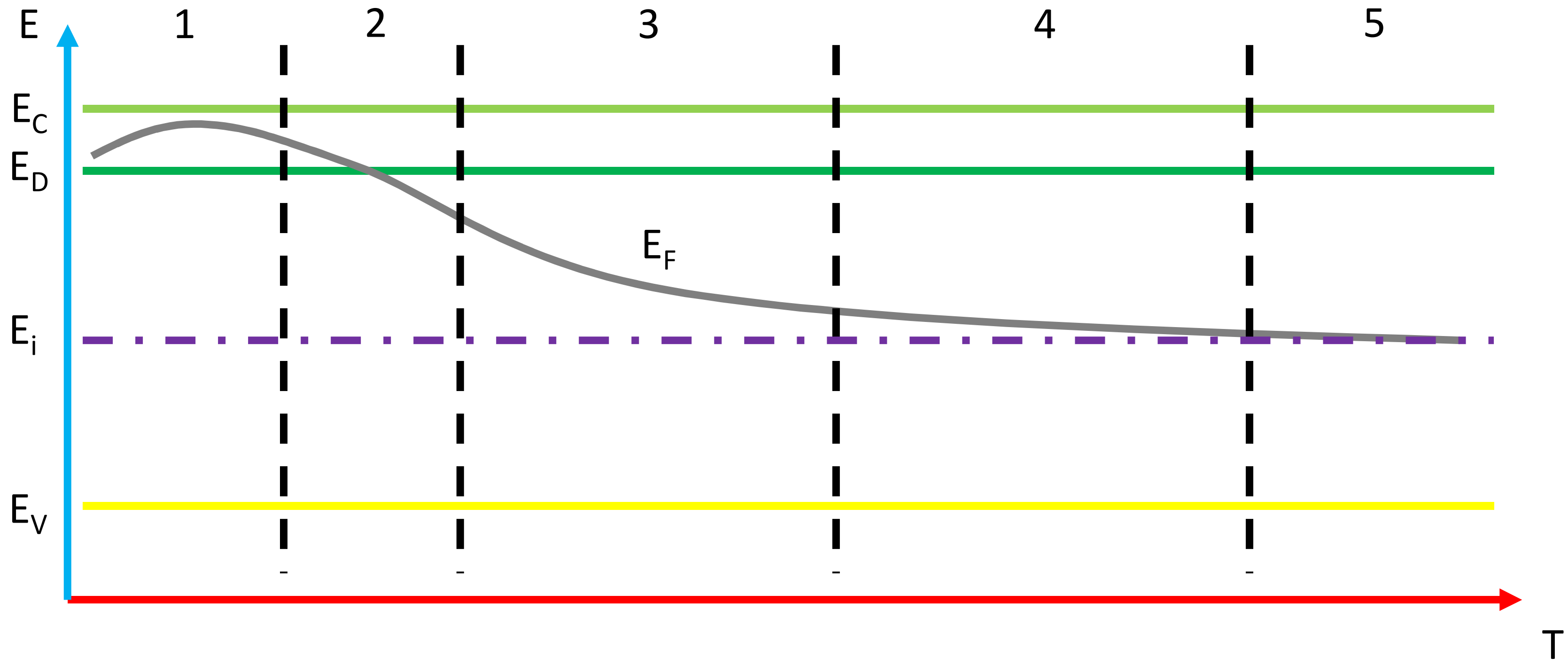
此时杂质作用可忽略， $n \sim p \sim n_i$

$$E_F = \frac{1}{2}\left(E_C + E_V - k_B T \log\frac{N_C}{N_V}\right) = E_i$$

$$n_i = \sqrt{N_C N_V e^{-\frac{E_g}{k_B T}}} = \frac{(m_n^* m_p^*)^{3/4}}{\sqrt{2}\pi^{3/2}\hbar^3}(k_B T)^{3/2} e^{-\frac{E_g}{2k_B T}}$$

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型半导体的载流子浓度

- 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
- 空穴浓度：$p=n_i^2/n$

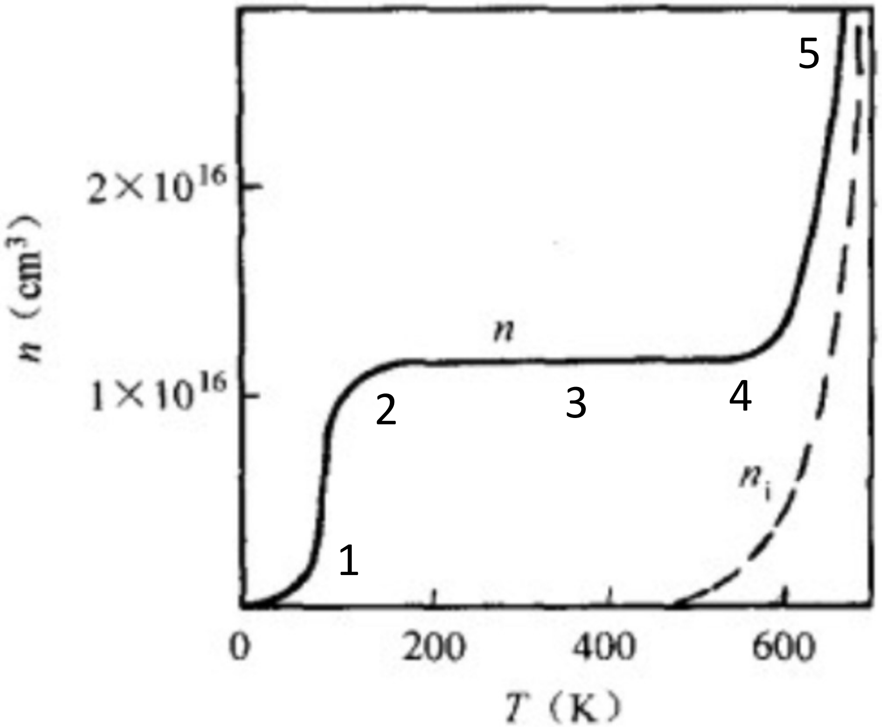


图 3-11　n 型硅的电子浓度与温度的关系[8,9]曲线

n型半导体处于哪个区的判定

- A.比较p和N_D。这是看本征激发是否有主要贡献。远小于（低温）→B，相当→4.过渡区，远大于→5.本征激发区。
- B. 比较$\frac{4g_D N_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_BT}}$和1。这是看施主激发的强度。远小于→1.施主弱电离，相当→2.中间电离，远大于→3.强电离

$$n=\frac{N_C}{2g_D}e^{-\frac{E_C-E_D}{k_BT}}\left(\sqrt{1+\frac{4g_D N_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_BT}}}-1\right)$$

例题：室温半导体处于哪个区？

- 对磷掺杂的硅有：
  - E_C-E_D = 0.05 eV；N_C（300 K）=3e19 cm^{-3}；n_i（300 K）=1e10 cm^{-3}
- 请判定，300 K时它处于哪个区？

比较p和N_D

比较$\frac{4g_D N_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_B T}}$和1

例题：室温半导体处于哪个区？

- 对磷掺杂的硅有：
  - E_C-E_D = 0.05 eV；N_C（300 K）=3e19 cm^{-3}；n_i（300 K）=1e10 cm^{-3}
- 请判定，300 K时它处于哪个区？
  - N_D = 10^{13}-10^{20} cm^{-3}，$p < n_i << N_D$，因此肯定属于1.2.3.低温施主激发区中的一种
  - $\frac{4g_D N_D}{N_C} e^{\frac{E_C - E_D}{k_B T}}$和$N_D$的大小有关。当$N_D$<$10^{17}$ cm^{-3}时，$\frac{4g_D N_D}{N_C} e^{\frac{E_C - E_D}{k_B T}}$远大于1，属于强电离区；$N_D$=$10^{17}$-$10^{19}$ cm^{-3}时，属于中间电离区；施主再多则属于弱电离区

n型半导体在室温的载流子浓度

- 3.强电离区/饱和区的优势
- 载流子浓度随温度基本不变
  - 适合制备半导体器件
  - 制备器件的基本（并非全部）都是掺杂半导体
- 但E_F仍然剧烈变化

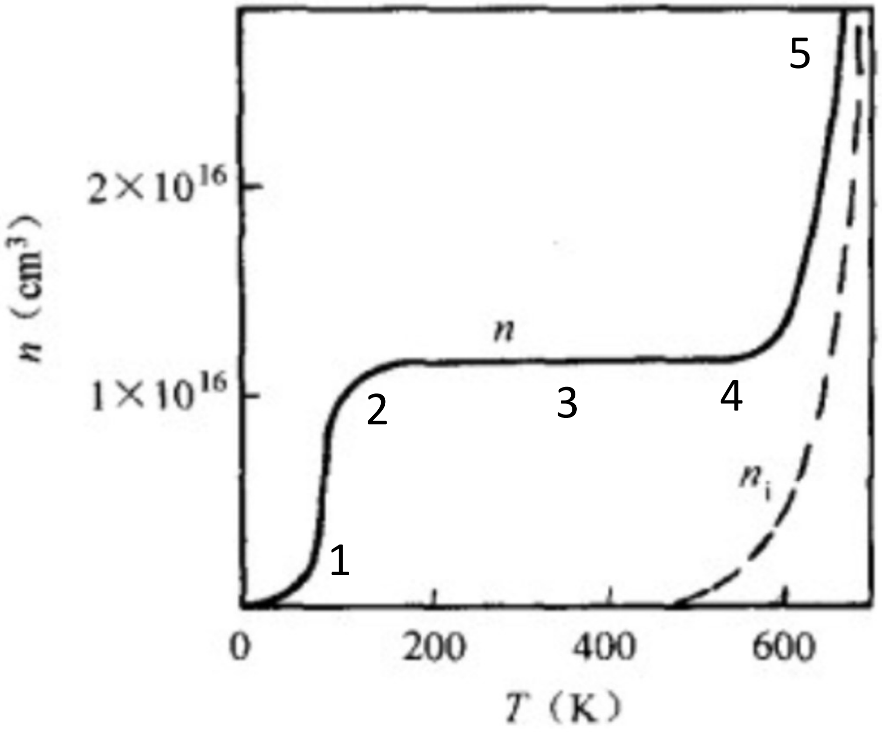


图 3-11　n 型硅的电子浓度与温度的关系[8,9]曲线

n型半导体在室温的E_F

$$E_F = E_C - k_B T \log\frac{N_C}{N_D}$$

E_F随着T上升而下降；掺杂浓度越高，E_F越靠近带边

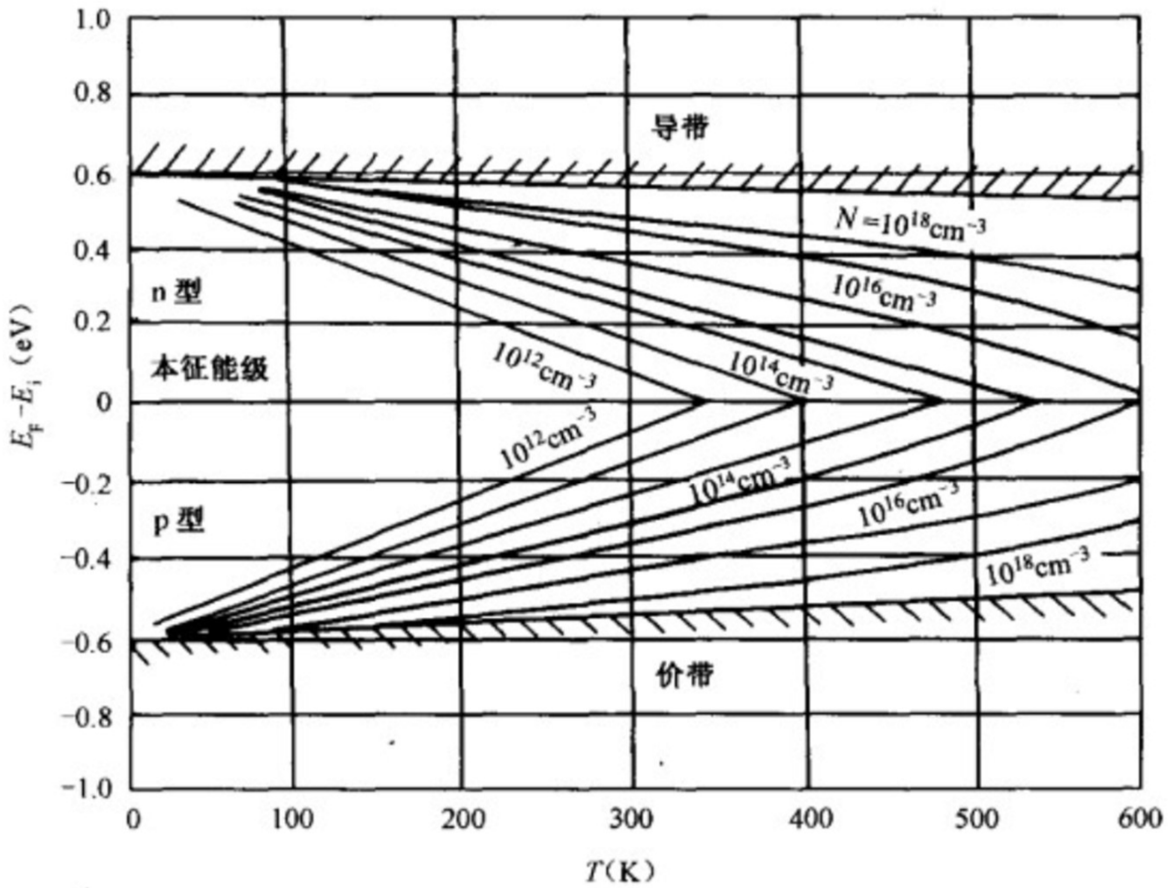


图 3-10　硅的费米能级与温度及杂质浓度的关系[5]

例题：室温半导体处于哪个区？

- 对硅掺杂的氮化镓有：
  - E_C-E_D = 0.02 eV；N_C（300 K）=6e18 cm^{-3}；n_i（300 K）=5e-10 cm^{-3}
- 请判定，300 K时它处于哪个区？

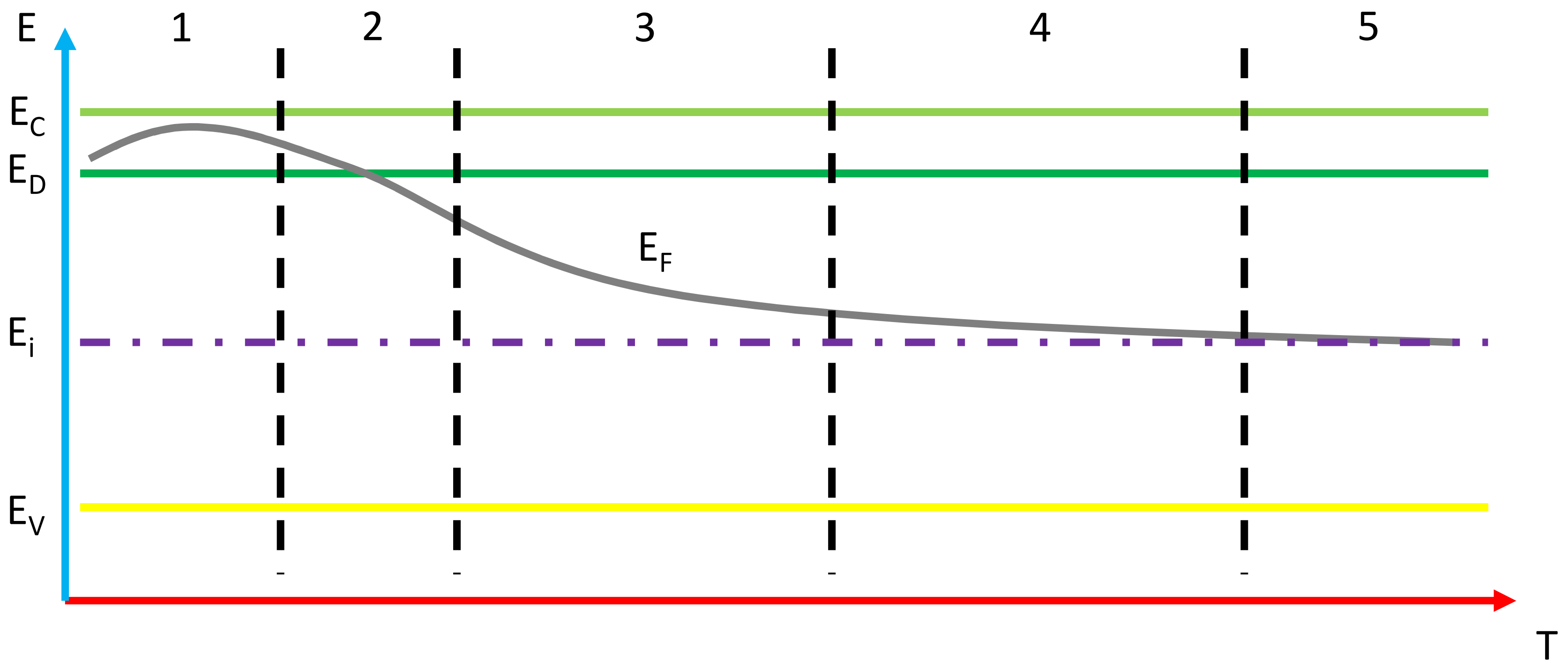
比较p和N_D

比较$\frac{4g_D N_D}{N_C}e^{\frac{E_C-E_D}{k_B T}}$和1

例题：室温半导体处于哪个区？

- 对硅掺杂的氮化镓有：
  - E_C-E_D = 0.02 eV；N_C（300 K）=6e18 cm^{-3}；n_i（300 K）=5e-10 cm^{-3}
- 请判定，300 K时它处于哪个区？
  - $N_D = 10^{13}$-10^{20} cm^{-3}，$p < n_i << N_D$，因此肯定属于1.2.3. 低温施主激发区中的一种
  - $\frac{4g_D N_D}{N_C} e^{\frac{E_C - E_D}{k_B T}}$和$N_D$的大小有关。当$N_D<10^{17}$ cm^{-3}时，$\frac{4g_D N_D}{N_C} e^{\frac{E_C - E_D}{k_B T}}$远大于1，属于强电离区；$N_D=10^{17}$-$10^{19}$ cm^{-3}时，属于中间电离区；施主再多则属于弱电离区
  - 和硅类似。不管禁带宽窄，杂质能级浅的基本都属于这一类

掺杂半导体的非简并条件



非简并条件：导带、价带费米分布能近似为玻尔兹曼分布，便于积分

$$E_C - E_F > 2.5k_BT \qquad E_V - E_F < -2.5k_BT$$

对常见半导体，在3.饱和区、4.过渡区、5本征激发区能满足非简并条件

在室温下，通常半导体能满足非简并条件，但重掺杂半导体不满足，称为简并半导体