

# 总复习

2024年1月4日 12:48

## 目录

绪论

固体的晶体结构

└ 计算题

计算原子体密度(面密度)、密勒指数计算

补充

量子力学导论

└ 计算题

补充

固态电子论基础

└ 计算题

补充

半导体器件原理

└ 计算题

补充

光电子学和光电子器件

└ 计算题

磁电子学

超导电子学

## 绪论 (页首)

1. 信息电子学以电子电荷为基础，属于弱电范畴
2. 围绕电荷运动而产生电荷电子学；以电子自旋为基础→自旋电子学→具有许多电荷电子学所没有的特性
3. 电子在固体中的形态与运动方式：
  - 金属：价电子在（晶格）空隙中自由运动
  - 半导体：载流子（导带电子与价带空穴）的激发与复合的迁移运动

- 超导体：超导态电子无晶格散射、零熵、零电阻运动
  - 磁体：电子/流的旋转
  - 电介质：正负电荷的相对移动
4. 电子：费米子，自旋  $1/2$
  5. 光子：玻色子，自旋 1
  6. 固体材料：化学组分（结构基元）→原子排列（空间点阵）→晶体结构

## 固体的晶体结构（页首）

### 1. 固体类型

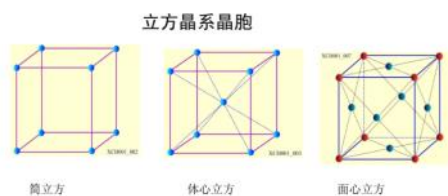
- 无定形：原子排列在多个原子尺度内有序，各向同性
- 多晶：在许多原子尺度的区域内短程有序，各向异性
- 单晶：在整个材料内具有高度的长程有序，各向异性

### 2. 晶体的内部结构可以看成一些相同的点在空间做规则的周期性的无限分布，即晶体结构=基元+点阵

### 3. 简单晶格/复式晶格：简单晶格必须由同种原子组成，同种原子组成的不一定是简单晶格。

### 4. 晶体结构=结构基元+空间点阵

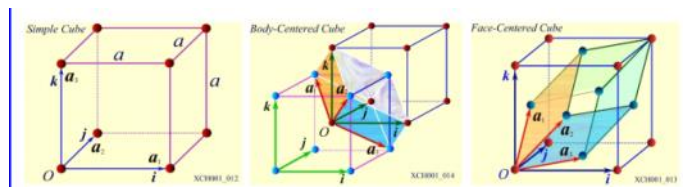
- 高级晶族—立方晶系—简单立方、体心立方、面心立方



### 5. 原胞：体积最小的元胞，周期性结构单元、格点只存在于平行六面体顶角、选取方式不唯一（体积相等）、只含有一个基元、反映周期性，但不反映晶体的对称性

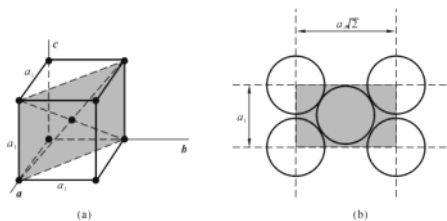
### 6. 晶胞：在能保持晶格对称性的前提下，构成晶体的最小周期性结构单元，体积可为原胞整数倍（一般不同），结点可以在顶点、体心或面心

### 7. 晶胞/原胞的异同



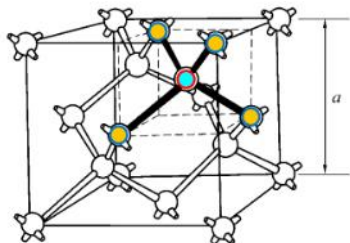
### 8. 密勒指数：晶面与坐标轴截距的倒数的整数比

### 9. 晶面原子表面密度：原子数/晶面面积



10. 方向指数：直线上任意两格点坐标相减的互质整数比

11. 金刚石结构元胞(金刚石、Si、Ge、GaAs)



基元：碳原子；结构：正四面体

键长： $\frac{\sqrt{3}}{4}a$ ；键角： $109^{\circ}28'$

12. 键

- 原子键：原子间相互作用的表现形式
- 离子键：电离能很小的金属原子与电子亲和能很大的非金属原子，电子云相斥达到平衡
- 共价键：同种原子或者电负性相差很小的原子，电子云重叠形成共价键
- 金属键：正电子与自由电子之间相互作用
- 范德瓦尔斯键：键能小，比上述键小 1-2 个数量级

13. 固体缺陷：

- 原子热振动（晶格振动）
- 点缺陷，理想化学键破坏，电学性质改变
- 线缺陷：缺少整列原子
- 晶格缺陷：杂质

## 计算题（页首）

### 计算原子体密度(面密度)、密勒指数计算（页首）

例 1.2.1 有一单晶材料是体心立方体，它的晶格常数  $a=5\text{ \AA}=5\times 10^{-8}\text{ cm}$ ，求晶体的原子体密度。

$$\text{体密度} = \frac{\text{元胞实含原子数}}{\text{元胞体积}} = \frac{8 \times 1/8 + 1}{(5 \times 10^{-8})^3} = 1.6 \times 10^{22} \text{ atom/cm}^3$$

1.1 试求单位元胞中原子数：(a)面心立方体；(b)体心立方体；(c)金刚石晶格。

$$\text{面心：} 8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$$

$$\text{金刚石：} 8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 + 4 = 8$$

1.6 画出简单立方体的下列晶面：(a)(100)；(b)(011)；(c)(111)；(d)(432)。已知原子半径为  $1.34\text{ \AA}$ ：(a)计算晶面内原子体密度；(b)计算最近(110)面之间距；(c)计算(100)面内原子面密度( $\text{cm}^{-2}$ )。

边长  $a = 2\sqrt{2}r$

(a) 体密度  $= 4/(2\sqrt{2}r)^3$

(b)  $d = 2r$

(c) (100)面密度  $= (4 \times 1/4 + 1)/(2\sqrt{2}r)^2$

## 补充 (页首)

1. 计算等径圆球做金刚石最密堆积的空隙率

半径  $r = \text{键长}/2 = \frac{\sqrt{3}}{8}a$

空隙率  $= 1 - \frac{8 \times \frac{4\pi}{3} r^3}{a^3}$

2. 面心立方紧密堆积的金属晶体，其原子量为M，密度是8.94g/cm<sup>3</sup>。试计算晶格常数和最小原子间距。

原子量是每mol原子的质量。

1 mol该金属的体积  $V = M/8.94 \text{ cm}^3$

一个元胞体积  $= V/(N_A) \times 4$

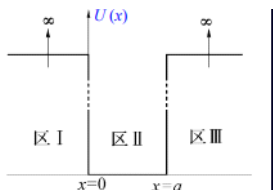
晶格常数  $a = (\frac{4M}{N_A \times 8.94}) \text{ cm}$

最小原子间距  $= a/\sqrt{2}$

## 量子力学导论 (页首)

1. 物体热辐射的能量与频率分布、温度有关
2. 振子只能一份一份地按不连续地方式辐射和吸收能量，每份能量都称为量子  $h\nu$
3. Planck 公式标志着量子力学的诞生
4. 德布罗意关系：实物粒子也有波动性， $p = h/\lambda$ ， $E = h\nu$
5. 测不准原理： $\Delta p \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$ ,  $\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}$ ,  $\Delta P \Delta \phi \geq \frac{h}{4\pi}$  ( $\hbar = h/2\pi$ )
6. 薛定谔方程
  - 一维无限深势阱

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2m}{\hbar^2} [E - U(x)]\psi(x) = 0$$



Ⅰ、Ⅲ：  $U(x) \rightarrow \infty, \psi(x) = 0$

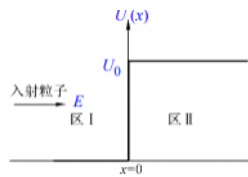
Ⅱ：  $U(x) = 0, k = \sqrt{2mE}/\hbar, \psi(x) = A_1 \cos(kx) + A_2 \sin(kx)$

(1) 边界条件  $\psi(0) = \psi(a) = 0 \Rightarrow A_1 = 0, k = n\pi/a$

(2) 归一化条件  $\int_0^a |\psi(x)|^2 dx = 1 \Rightarrow A_2 = \sqrt{2/a}$

$$\psi(x) = \sqrt{2/a} \sin(n\pi x/a), E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2}{2ma^2} n^2$$

- 阶跃位函数



区I:  $U(x) = 0, k_1 = \sqrt{2mE}/\hbar > 0, \psi_1(x) = A_1 \exp(jk_1 x) + B_1 \exp(-jk_1 x)$

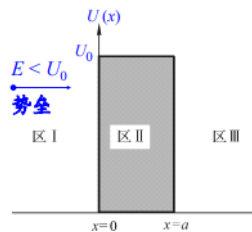
区II:  $U(x) = U_0, k_2 = \sqrt{2m(U_0 - E)}/\hbar > 0, x \rightarrow \infty, \psi_2(x) \neq \infty \Rightarrow B_2 = 0, \psi_2(x) = A_2 \exp(-k_2 x)$

(1) 边界条件  $\psi(x)$  连续,  $\frac{d\psi(x)}{dx}$  连续

反射率  $R$  为1, 透射率  $A_2 = \frac{jk_1}{jk_1 - k_2} A_1 \neq 0$

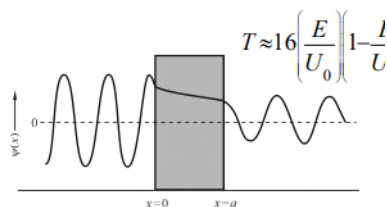
几率密度  $= \psi(x)\psi^*(x)$

- 势垒



透射率  $T = 16 \left(\frac{E}{U_0}\right) \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) \exp(-2k_2 a)$

反射率  $R = 1 - T$



隧穿效应的粒子几率密度:  $\psi(x)\psi^*(x) \approx 16 \left(\frac{E}{U_0}\right) \left(1 - \frac{E}{U_0}\right) \exp(-2k_2 a) A_1 A_1^*$

## 7. 原子波动理论

根据球坐标的薛定谔, 给出有解条件:

磁量子数  $m = 0, \pm 1, \dots, \pm l$

轨道角动量量子数  $l = 0, 1, \dots, (n - 1)$

主量子数  $n = 1, 2, \dots$

轨道角动量  $L = \sqrt{l(l+1)}\hbar$

能量量子化  $E_n = -E_1/n^2$

空间量子化  $L_z = m\hbar$

自旋角动量量子化  $S = \sqrt{s(s+1)}\hbar, s = \frac{1}{2}, S_z = \pm \frac{1}{2}\hbar$

8. 玻色子自旋为整数; 费米子自旋为半整数。

9. 能级简并:  $n$  一致, 但是  $l, m, s$  不一样

10. 泡利不相容原理：处于同一量子态（四个量子数都一样）的电子不能多于一个

## 计算题（页首）

例 2.1.1 求波长  $\lambda=0.708 \times 10^{-8} \text{ cm}$  的 X 射线的单光子能量。

光子能量  $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$

例 2.1.2 计算以速度  $v=1.00 \times 10^7 \text{ cm/s}$  运动的电子的德布罗衣波长。

德布罗意波长  $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$

例 2.3.1 计算一个电子处于宽度为  $5.00 \text{ \AA}$  的无限深势阱中的头三个分立能级。

无限深势阱的分立能量  $E_n = \frac{h^2 n^2}{8ma^2}$

例 2.3.2 若存在如图 2.3.5 所示的势垒,区域 I 内速度为  $v=1.00 \times 10^5 \text{ m/s}$  的电子正面撞击势垒,势垒高度为入射电子总能量的 2 倍,求其透入深度(离开表面的深入距离)。

阶跃位函数的透入深度  $d = 1/k_2 = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(U_0-E)}}$

例 2.3.3 若能量  $2.00 \text{ eV}$  的电子撞击高为  $U_0=20.0 \text{ eV}$  和宽为  $3.00 \text{ \AA}$  的势垒,计算电子隧穿势垒的概率。

隧穿效应的粒子几率密度:  $\psi(x)\psi^*(x) \approx 16(\frac{E}{U_0})(1 - \frac{E}{U_0})\exp(-2k_2 a)A_1 A_1^*$ , 只需要计算  $k_2$

2.3 已知金(Au)的功函数为  $4.90 \text{ eV}$ ,铯(Cs)的功函数为  $1.90 \text{ eV}$ 。试求这两种材料光电发射所需的最大光波长。

$$\lambda = \frac{hc}{E}$$

2.13 粒子处在图 2P-1 所示的势阱中。试导出与四个最低能级对应的波函数,(不用归一化),并绘出曲线。

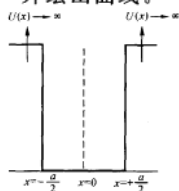


图 2P-1 题 2.13 的位函数

需要作平移, 因为  $U(x)$  在薛定谔方程中是  $[0, a]$  的, 因此  $\psi(x)$  也必然是  $[0, a]$  的

$$\text{令 } y = x + \frac{a}{2}$$

$$\text{则 } \psi(0) = \psi(a) = 0$$

$$\psi(y) = \sqrt{2/a} \sin(\frac{n\pi}{a} y)$$

$$\psi(x) = \sqrt{2/a} \sin[\frac{n\pi}{a} (x + a/2)]$$

2.22 给定图 2P-4 所示一维位函数。已知电子总能量  $E < U_0$ ,  
(a) 写出每个区的波函数; (b) 应用边界条件写出方程组; (c) 证明或清楚地说明电子能级是量子化的。

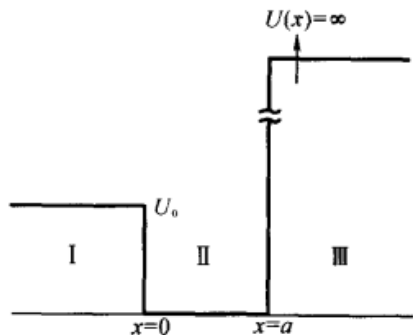


图 2P-4 题 2.22 的位函数

I\II区用边界条件+导数边界条件

II\III区用边界条件

II区波函数  $= A_2 \cos(kx) + B_2 \sin(kx)$

I区波函数  $= A_1 \exp(kx)$

补充 (页首)

1. 如果一个分子的质量为  $2.20 \times 10^{-26} \text{ kg}$ ，并被限制在一个长度为  $60.0 \text{ nm}$  的区域，求其速度的最小不确定度。

$$m\Delta v \Delta x \geq h/4\pi, \Rightarrow \Delta v \geq \frac{h}{4\pi m \Delta x}$$

2. 1) 请计算约束在图2.3.3中所示无限深势阱中的基态粒子，其状态处于  $(0, a/8)$  区间的几率（3位有效数字）；2) 如果势阱宽度增加到  $b$  ( $b = 2a$ )，请计算2种基态粒子能量的关系。

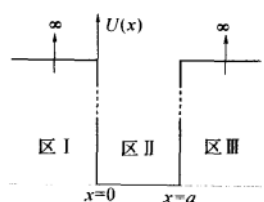


图 2.3.3 无限深势阱的位函数

(1) 基态  $n = 1$

(2) 1:4

## 固态电子论基础 (页首)

### 1. 电子分类

- 自由电子：无外力源、能量为连续谱，平面波形式自由运动
- 孤立原子中的电子：外力源单一原子核与其他电子束缚、能量为能级结构，受束缚的轨道运动
- 固体中的电子：外力源众多原子核与电子、能量为能带结构，布洛赫波的共有化运动（分立能带）

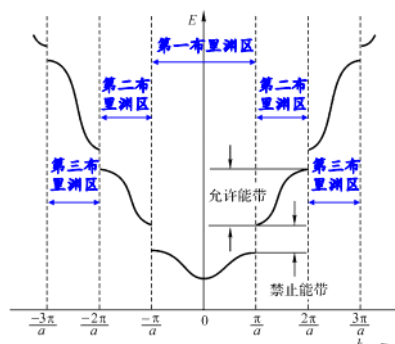


2. 原子相互靠近→电子不再局限于单个原子→共有化运动→泡利不相容原理→能级分裂→形成能带
3. 能带形成是指外层电子， $N$ 个原子组成的晶体会分裂出 $N$ 个能级组成的能带，该能带能容纳 $2N(2l+1)$ 个电子
4. KP模型：多体多电子（绝热近似，电子运动速度远大于离子，假设之间不交换能量）→单体多电子（其他电子的作用视为平均势场）→单体单电子（势场和为一个周期势场）→周期性势场中的单体单电子问题（能带理论）
5. 布洛赫定理：在一维周期性势场中的单电子波函数为一个周期性调幅的平面波，其振幅周期为晶格周期，用布洛赫函数描写状态的电子称为布洛赫电子。

布洛赫波： $\phi(x) = u(x)\exp(jkx)$ ， $\hbar k$ 是准动量， $u(x)$ 是具有晶格周期的周期函数

	自由电子	布洛赫电子	孤立原子中的电子
波函数	$A \exp(jkx)$ 平面波	$u(x) \exp(jkx)$ 布洛赫波（调制平面波）	$f(r)$ 束缚电子
运动区间	空间各点	晶体中	原子核周围
运动形式	自由运动	共有化运动	束缚运动

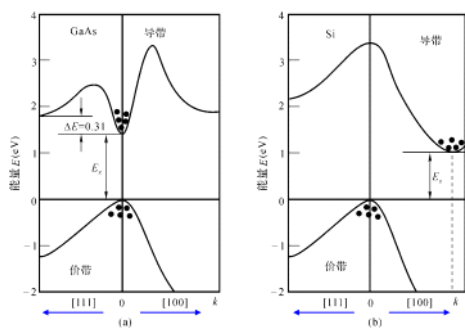
## 6. k空间图



无外力时，价带空态与导带电子在  $k$  空间的分布时对称的（电子跃迁时瞬间完成的）

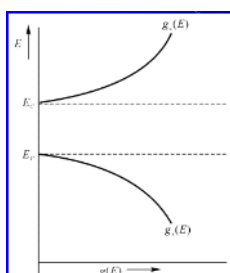
7. 能带论的其他模型
  - 自由电子模型：适用于金属价电子的近似
  - 紧束缚模型：导电性能差的晶体
8. 晶体中电子速度  $v = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk}$ ，适用布洛赫电子
9. 有效质量  $m_i^* = \hbar^2 / (\frac{\partial^2 E}{\partial k_i^2})$ ，可正可负，能带底为正（外力使电子加速），能带顶为负（外力小于势场，不足以加速）
10. 满带、空带不导电，部分填充能带导电
11. 半导体：导带、价带部分填充，室温热子平均能量， $k_B T = 0.0259 \text{ eV}$ 。
12. 直接带隙（GaAs）：导带底与价带顶具有相同的 $k$ 值，激光材料；间接带隙（Si、Ge）：不在同一个方向。





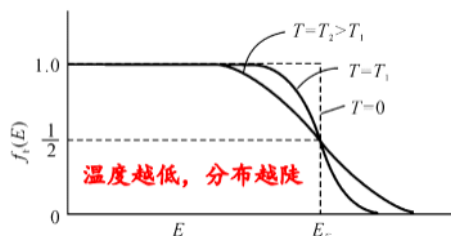
### 13. 载流子浓度

- (1) 计算单位体积单位能量的能级数目：态密度函数
  - (2) 计算每个能级被电子占据的几率
  - (3) 对整个能带积分得到电子浓度
- 态密度函数由三维无限深势阱模型得出



### 14. 粒子分布模型

- 玻尔兹曼分布：适合容器中低压气体粒子，可一一区分
- 玻色-爱因斯坦分布：不可区分，无泡利不相容
- 费米-狄拉克分布：电子为费米子，自旋为半整数倍，满足泡利不相容原理  $f(E) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{E - E_F}{k_B T})}$



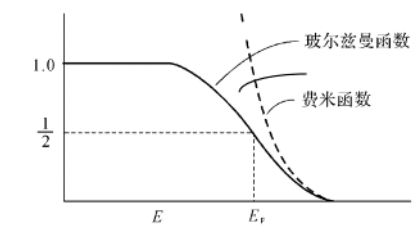
费米几率密度：温度越低、分布越陡，0K 时呈现矩形分布

费米能级：绝对零度下电子占据的最高能级；非零度，为占据一半的能级。动态。

本征半导体费米能级在禁带中间

$f_F(E)$  为粒子占据能态的几率（导带能级被电子占据的几率）； $1 - f_F(E)$  为能态空占的几率（价带能级被空穴占据的几率）

$\frac{E - E_F}{k_B T} \gg 1$  时，费米、玻尔兹曼趋近



### 15. 本征半导体的载流子

本征半导体:  $n_0 = p_0 = n_i = \sqrt{N_C N_V} \exp(-\frac{E_g}{2k_B T})$

非本征热平衡半导体:  $n_0 p_0 = n_i^2$

## 16. 杂质半导体

施主杂质 (V族元素); 受主杂质 (III族元素)

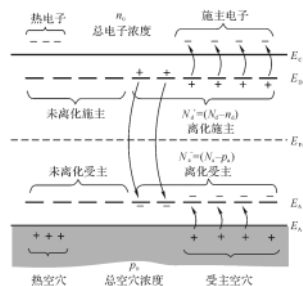
浅能级杂质: 靠近导带、价带; 深能级杂质: 在禁带中间部分

室温下, 完全离化。  $n_d = p_a = 0$

## 17. 补偿半导体: 既掺施主也掺受主

$$n_0 = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{(\frac{N_D - N_A}{2})^2 + n_i^2}$$

$$p_0 = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{(\frac{N_A - N_D}{2})^2 + n_i^2}$$

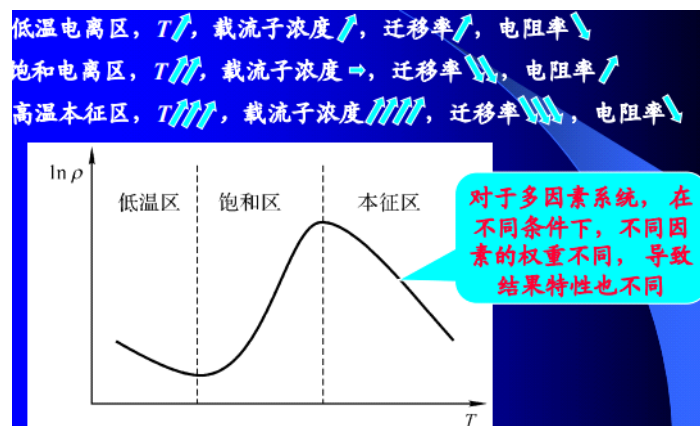


## 18. 掺杂半导体三个区: 低温弱电离区、强电离区、高温本征区

## 19. 非平衡载流子: 电子和空穴的费米能级不相等, 各自计算

## 20. 金属没有禁带, 电子的费米面对金属的物理性质有很大的影响

## 21. 半导体电阻率随温度变化:

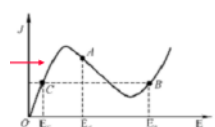


## 22. 化合物半导体需要与衬底材料晶格常数匹配, 晶格失配率 $\frac{2|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2}$

## 23. 磁电效应

- 霍尔系数可以确定载流子类型  $R_{H,n} < 0, R_{H,p} > 0$

## 24. 耿氏效应: 双能谷结构, 中心谷漂移快, 卫星谷慢, 形成负阻效应



低电场 (C区): 欧姆定律

电场增加 (后C区): 偏离欧姆定律

A区：微分负电导区（耿氏效应区）

B区：欧姆定律

工作在负阻区，产生局部高阻区，区内漂移速度慢，形成耗尽层与积累层，产生畴区从阴极移向阳极，产生周期脉冲电流

25. 俄歇电子：一个内层电子被去除，跃迁下来的电子释放能量，要么以光子形式，要么被别的电子吸收而逃逸，形成俄歇电子

26. X射线能量高，可以使内层电子逸出固体，可以鉴别分子、原子价、化合物结构

## 计算题（页首）

例 3.3.1 利用自由电子的态密度表达式(3.3.

10), 计算能量在 0 和 1.00 eV 之间单位体积的态密度。

自由电子三维无限深势阱单位体积态密度函数： $g_E(E)dE = \frac{4\pi a^3}{h^3} \cdot (2m)^{\frac{3}{2}} \cdot \sqrt{E}dE$

例 3.3.3 计算室温下( $T=300\text{ K}$ ) $E_F$  以上的  $3k_B T$  能态被 1 个电子占据的几率。

例 3.3.4 假定某种材料中的电子服从费米—狄拉克分布函数, 计算在什么温度值下, 能让费米能级以下 0.300 eV 的能态不被 1 个电子占据的几率为 1%。

3.13 已知材料分别为 Si, Ge, GaAs, 它们的  $E_F$  处于禁带中央,  $T=300\text{ K}$ , (a) 计算导带底能态被电子占据几率。(b) 计算价带顶能态空占几率。

费米狄拉克分布函数： $f_F(E) = \frac{1}{1 + \exp(\frac{E-E_F}{k_B T})}$

例 3.3.6 计算给定费米能量值的电子和空穴的热平衡浓度。假定  $T=300\text{ K}$  的 n 型硅材料的费米能级处于导带底下 0.250 eV 处, 计算热平衡载流子浓度。

$$n_0 = N_C \exp(-\frac{E_C-E_F}{k_B T}), p_0 = N_V \exp(\frac{E_V-E_F}{k_B T})$$

$$n_i^2 = N_C N_V \exp(\frac{-E_g}{k_B T})$$

注意指数部分的值永远是小于0的即可。

例 3.3.13 对处于  $T=300\text{ K}$  的硅样品, 已知它的  $N_D=1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_A=3.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ , 以及  $n_i=1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , 计算硅中热平衡载流子浓度。

$$N_D > N_A$$

$$n_0 = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{(\frac{N_D - N_A}{2})^2 + n_i^2}$$

$$p_0 = n_i^2 / n_0$$

例 3.3.14 已知 300 K 硅, 设掺磷施主  $N_D=1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $N_A=0$ , 计算 n 型半导体中费米能级相对导带底的位置。

$$E_C - E_F = -k_B T \cdot \ln(N_D / N_C)$$

例 3.3.16 对处于  $T=300\text{ K}$  的锗样品,  $n_i=2.40 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ , 已知它的掺杂浓度为  $N_D=0$  和  $N_A=1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ , 若外加电场为  $E_{\text{场}}=50.0 \text{ V/cm}$ , 求样品中漂移电流密度  $J_{\text{pdr}}$ 。

$$\text{漂移电流 } J_{\text{pdr}} = e(\mu_n n + \mu_p p)E$$

例 3.3.17 对于处在  $T=300\text{ K}$  的 n 型砷化镓半导体, 它的电子扩散系数  $D_n=225 \text{ cm}^2/\text{s}$ , 求在样品内 0.100 cm 距离内电子浓度由  $1.00 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  线性下降到  $7.00 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$  情况下, 它的扩散电流密度  $J_{\text{ndif}}$ 。

$$\text{扩散电流 } J_{\text{ndif}} = eD_n \frac{dn}{dx} \approx eD_n \frac{\Delta n}{\Delta x}$$

**例 3.3.22** 计算准费米能级。考虑某 n 型半导体  $T=300.0\text{ K}$  下有载流子浓度  $n_0=1.000 \times 10^{15}\text{ cm}^{-3}$ ,  $n_i=1.000 \times 10^{10}\text{ cm}^{-3}$ , 假定非平衡载流子浓度为  $\Delta n=\Delta p=1.000 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$ 。

热平衡下准费米能级  $E_F - E_{Fi} = k_B T \ln(n_0/n_i)$

非热平衡下电子准费米能级  $E_{Fn} - E_{Fi} = k_B T \ln((n_0 + \Delta n)/n_i)$

非热平衡下空穴准费米能级  $E_{Fi} - E_{Fp} = k_B T \ln((n_i^2/n_0 + \Delta p)/n_i)$

## 补充 (页首)

1. 假定某段金属导线的导电电子近似为自由电子气，求这些导电电子的一维量子态密度函数  $\rho(E)$ ，即单位长度单位能量的自旋量子态数。

设金属长为  $L$ ，则为两端  $U(x) \rightarrow \infty$  的一维无限深势阱模型。

$$\text{解得 } k = \frac{n\pi}{L} = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$$

$$\Rightarrow E_n = \frac{\hbar^2 \pi^2 n^2}{2mL^2}$$

$$\text{又 } dk = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} (\sqrt{1 + dE/E} - 1) = \frac{1}{\hbar} \sqrt{\frac{m}{2E}} dE$$

波矢间距  $\frac{\pi}{L}$ ，即每个自旋量子态占有的波矢范围为  $\frac{\pi}{2L}$

$$dE \text{ 范围内自旋量子态数 } dN = \frac{2L}{\pi} dk = \frac{\pi}{\hbar L} \sqrt{\frac{2m}{E}} dE$$

$$\rho(E) = dN/(LdE) = \frac{\pi}{\hbar} \sqrt{\frac{2m}{E}}$$

2. 晶体硅材料横截面积为  $1.00 \times 10^{-3}\text{ cm}^2$ ，厚度  $1.00 \times 10^{-3}\text{ cm}$ ，两端加  $10.0\text{ V}$  电压。 $T = 300\text{ K}$  时，若在硅中得到  $100\text{ mA}$  的电流，请计算：（a）所需的半导体电阻  $R$ ；（b）所需的电导率；（c）达到此电导率所需的 N 型半导体施主杂质浓度。

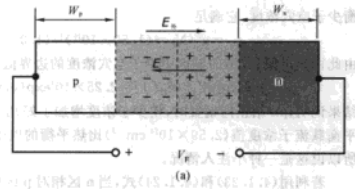
$$\text{(a) } R = \frac{V}{I} = \frac{10.0\text{ V}}{100\text{ mA}} = 100\Omega$$

$$\text{(b) } R = \frac{L}{\sigma S} \Rightarrow \sigma = \frac{L}{RS} = \frac{1 \times 10^{-3}\text{ cm}}{100\Omega \times 1 \times 10^{-3}\text{ cm}^2} = 0.01\Omega^{-1}\text{ cm}^{-1}$$

$$\text{(c) } \sigma = e\mu_n n \Rightarrow N_D \approx n = \frac{\sigma}{e\mu_n} = 4.63 \times 10^{13}\text{ cm}^{-3}$$

## 半导体器件原理 (页首)

1. 浓度差形成扩散运动，形成内建电场（耗尽区）；内建电场导致漂移运动，方向相反，动态平衡
2.  $\Phi_{Fn} = -0.0259 \ln(\frac{N_D}{n_i})eV$ ,  $\Phi_{Fp} = 0.0259 \ln(\frac{N_A}{n_i})eV$ ,  $V_D = V_T \ln(\frac{N_A N_D}{n_i^2})$
3. 空间电荷区宽度  $X_D = x_n + x_p = \sqrt{V_D (\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}) (\frac{N_A + N_D}{N_A N_D})}$ ,  $x_n = \sqrt{V_D (\frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{e}) (\frac{N_A}{N_D}) (\frac{1}{N_A + N_D})}$
4. 半导体连续性方程：非平衡少子会影响半导体性质，少子随时间的变化，与少子空间扩散、寿命影响、电场漂移和其他因素有关
5. **整流特性**：加正向电压  $V_F$ ，pn 结少子正向注入；加反向电压：pn 结少子反向抽取

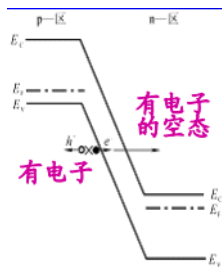


6. 肖克莱方程:  $J = J_S [\exp(\frac{eV_F}{k_B T}) - 1]$ ,  $J_S = \frac{eD_n n_{p0}}{L_n} + \frac{eD_p p_{n0}}{L_p}$ ,  $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

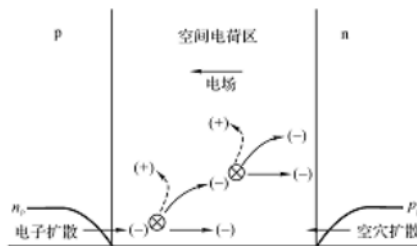
7. 电容特性: 势垒电容  $C_B$  (存在于空间电荷区), 扩散电容  $C_D$  (存在于扩散区), 正偏主要是  $C_D$ , 反偏主要是  $C_B$

8. 击穿特性

- 隧道击穿 (齐纳击穿): 高浓度掺杂, p 侧价带电子横穿禁带至 n 区导带, 形成反向电流;



- 雪崩击穿: 少子扩散到势垒区, 获得足够大能量 → 与耗尽区内晶格原子的电子碰撞, 产生二次np对 → 二次对继续漂移碰撞、倍增效应 → 雪崩击穿



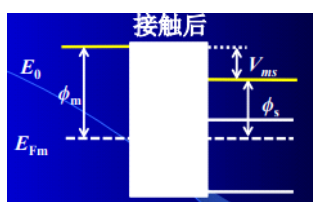
- 热电击穿 (不可利用)

9. PN结二极管

- 变容二极管 (利用 PN 结反偏势垒电容)

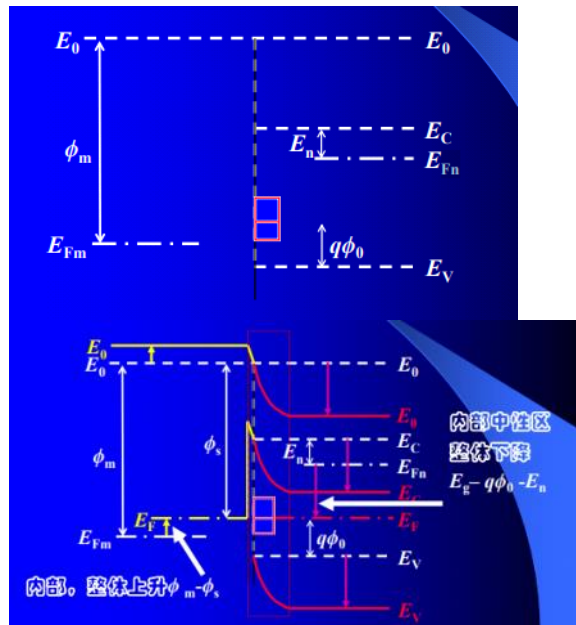
$$C_B \propto (V_D + V_R)^{-1/(m+2)}$$

- $m=0$ , 均匀掺杂结
  - $m=+1$ , 线性缓变结
  - $m=+2, +3$ , 重掺杂n+ 基片上外延低杂质浓度n层
  - $m<0$ , 超突变结
  - 开关二极管
  - 隧道二极管 (重掺杂、高频)
  - 雪崩二极管 (微波频率下的负阻效应, 微波振荡源)
10. 双极型晶体管: 两个背靠背的 pn 结互相影响: 基区宽度比少子扩散区短, 具有放大作用
11. 肖特基结



肖特基势垒:  $V_{Dm} = (\phi_m - \chi)/e$

能级图绘制



- 真空能级 $E_0$ 连续
- 电子亲和势 $\chi = E_0 - E_c$ 保持不变

肖特基结微观机理为多子、热电子发射，宏观特征为：反向电流密度大，正向时无扩散电容，高频特性好，导通电压低；

PN 结二极管，微观机理为少子注入与扩散，宏观特性与上相反

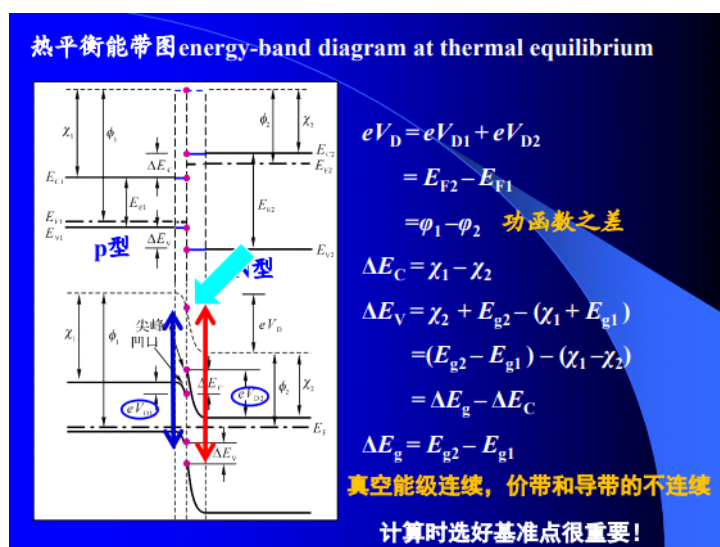
$$J_{ST} = AT^2 \exp\left(-\frac{eV_{Dm}}{k_B T}\right), J = J_{ST} \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1\right]$$

## 12. 欧姆接触

金属与重掺杂半导体接触，接触电阻由势垒高度、掺杂浓度决定

非整流势垒型接触：金属费米能级高于半导体，形成反阻挡层和非整流层，中性区电阻大，结两边 不再水平；隧道势垒型接触：形成势垒，重掺杂使势垒区宽度下降，容易发射隧穿

## 13. 异质结



爱因斯坦关系:  $\frac{D_n}{\mu_n} = \frac{D_p}{\mu_p} = \frac{k_B T}{e}$

## 14. 能量在一个方向是量子化的，另外两个方向是连续的（针对二维电子气）



15. 量子阱：在与薄层平行平面内自由运动、量子线：在线上自由运动、量子点

16. 超晶格：势垒很薄的周期性量子阱，势阱耦合，第一类电子空穴势阱在同一材料，第二类在不同材料

## 计算题 (页首)

**例 4.1.1** 已知硅 pn 结的掺杂浓度  $N_A = 1.00 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_D = 1.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，并设  $n_i = 1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ，试求 pn 结在  $T = 300 \text{ K}$  内建势垒的电压值。

内建电势： $V_D = V_T \ln\left(\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right) = 0.0259 \ln(\dots) = 0.754 \text{ V}$

**例 4.1.2** 对掺杂浓度  $N_A = 1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_D = 1.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的 Si-pn 结，计算  $T = 300 \text{ K}$  的空间电荷区宽度和电场。

**例 4.1.4** 考虑一个掺杂量为  $N_A = 1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_D = 1.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  的硅 pn 结处在  $T = 300 \text{ K}$  下，设  $n_i = 1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  和反偏电位  $V_R = 5.00 \text{ V}$ 。计算反偏 pn 结的空间电荷区宽度。

**例 4.1.9** 对图 4.1.15 所示的硅 pn 结，掺杂浓度为  $N_D = 5.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  和  $N_A = 5.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，并处于  $T = 300 \text{ K}$ ， $n_i = 1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。计算产生最大电场值  $|E_{\text{场max}}| = 1.25 \times 10^5 \text{ V/cm}$  所需的反偏电压值。

空间电荷区宽度： $W = \sqrt{\frac{2\epsilon_S(V_D \pm V_R)}{e} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$  (正偏压减，反偏压加)

空间电荷区电场： $E_{\text{场max}} = \frac{-e N_D x_n}{\epsilon_S} = -1.34 \times 10^4 \text{ V/cm}$

**例 4.1.3** 考虑硅 pn 结处在  $T = 300 \text{ K}$  下， $n_i = 1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 。假定 pn 结的 n 型掺杂浓度  $N_D = 1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ，并设正偏电压为  $0.600 \text{ V}$ 。计算空间电荷区边缘处的少子空穴浓度。

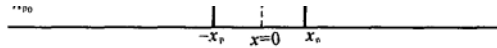


图 4.1.8 正偏 pn 结载流子产生的非平衡

多子电子计算少子电子： $n_{p0} = n_{n0} \exp\left(\frac{-eV_D}{k_B T}\right) \approx N_D \exp\left(\frac{-eV_D}{k_B T}\right) = n_i^2 / N_A$

加正偏压后： $n_p = n_{p0} \exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right)$

多子就是  $N_A, N_D$ ，n 区少子空穴  $p_{n0}$ ，p 区少子电子  $n_{p0}$

**例 4.1.5** 若硅 pn 结的参数为： $N_A = N_D = 1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ， $n_i = 1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ， $D_n = 25.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $D_p = 10.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $\tau_{p0} = \tau_{n0} = 5.00 \times 10^{-7} \text{ s}$ ，求理想反向饱和电流密度。

**例 4.1.6** 若硅 pn 结处在  $T = 300 \text{ K}$  下，外加正偏电压  $V_F = 0.600 \text{ V}$ ，p 区掺杂为  $N_A = 3.00 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ，少子电子的有关参量为  $D_n = 25.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $\tau_{n0} = 1.00 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。试求空间电荷区边缘处的电子扩散电流密度。

**例 4.1.7** 考虑一个硅 pn 结处在  $T = 300 \text{ K}$  下，外加正向偏压  $V_F = 0.650 \text{ V}$ ，已知结有如下参量值： $N_A = N_D = 1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ， $n_i = 1.50 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ， $D_n = 25.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $D_p = 10.0 \text{ cm}^2/\text{s}$ ， $\tau_{p0} = \tau_{n0} = 5.00 \times 10^{-7} \text{ s}$ ，计算此种情况下的多子漂移电流密度值及其相应的电场。

理想反向饱和电流密度  $J_S = \frac{e D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{e D_p p_{n0}}{L_p}$

扩散 (漂移?) 电流密度  $J = J_S [\exp\left(\frac{eV_F}{k_B T}\right) - 1]$

电场  $J_n = e \mu_n N_D E_{\text{场}}$

**例 4.4.1** 考虑钨和掺杂量  $N_D = 1.00 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  的 n-Si 之间的接触，计算该金属-半导体二极管在  $T = 300 \text{ K}$  零偏置情况下的理论势垒高度、内建电压和最大电场。

理想势垒是金属功函数-硅的电子亲和势： $e\phi_{bn} = e\phi_m - \chi = 0.540 \text{ eV}$

导带底与费米能级差  $\phi_n = E_C - E_F = k_B T \ln(N_C / N_D) = 0.206 \text{ eV}$

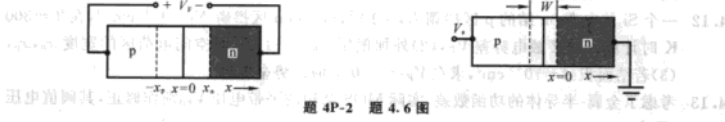
肖特基势垒  $V_D = \phi_{bn} - \phi_n = 0.334 \text{ V}$

均匀掺杂半导体 $p^+n$ , 空间电荷区宽度 $W \approx x_n = \sqrt{2\epsilon_S(V_D + V_R)/(eN_D)}$

$$|E_{max}| = \frac{eN_D x_n}{\epsilon_S}$$

例 4.4.5 测出钨在硅上的势垒高度 $\phi_{bn}=0.607$  eV,有效理查逊常数 $A^*=114$  A/(K<sup>2</sup> cm<sup>2</sup>), 设 $T=300$  K, 计算肖特基势垒二极管和 pn 结二极管中的反向饱和电流密度。

$$J_{ST} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{\phi_{bn}}{k_B T}\right)$$



4.6 (a) pn 结如图 4P-2 所示,  $N_A=5 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup> 和  $N_D=1 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>,  $D_n=25$  cm<sup>2</sup>/s,  $D_p=10$  cm<sup>2</sup>/s, 结面积  $A=10^{-4}$  cm<sup>2</sup>,  $\tau_{n0}=0.4$   $\mu$ s,  $\tau_{p0}=0.1$   $\mu$ s, 求:

① 空穴和电子的反向饱和电流;

② 求正向偏压  $V_F = \frac{1}{2} V_D$  时, 在  $x_n$  处的空穴浓度;

③ 求  $V_F = \frac{1}{2} V_D$ , 在  $x = x_n + \frac{1}{2} L_p$  处的空穴电流。

(b) Si-pn 结长型二极管,  $T=300$  K, 已知 n 区掺杂  $N_D=10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, p 区掺杂  $N_A=5 \times 10^{16}$  cm<sup>-3</sup>, 少数寿命  $\tau_{n0}=0.01$   $\mu$ s,  $\tau_{p0}=0.05$   $\mu$ s, 少数扩散系数  $D_n=23$  cm<sup>2</sup>/s 和  $D_p=8$  cm<sup>2</sup>/s, 正偏电压  $V_F=0.610$  V, 计算:

①  $\Delta p(x)$  ( $x \geq 0$ ); ②  $x=3 \times 10^{-4}$  cm 处空穴扩散电流密度和电子电流密度。

(a) (1)  $J_{sn} = e D_n n_{p0} / L_n = e n_i^2 / N_D \sqrt{D_n / \tau_n}$

(2)  $n_p = n_{p0} \exp(e V_F / (k_B T)) = n_{p0} \sqrt{\exp(e V_D / (k_B T))} = n_{p0} \sqrt{N_A N_D / n_i^2}$

(3) p/n区的电流  $J_p(x) = \frac{e D_p p_{n0}}{L_p} [\exp(\frac{e V_F}{k_B T}) - 1] \exp(\frac{x_n - x}{L_p})$

(b) (1)  $\Delta p(x) = p_{n0} [\exp(\frac{e V_F}{k_B T}) - 1] \exp(\frac{x_n - x}{L_p})$

4.9 (a) 已知肖特基二极管和 pn 结二极管的截面积均为  $A=5 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>, 反向饱和电流分别为  $3 \times 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> 和  $3 \times 10^{-12}$  A/cm<sup>2</sup>,  $T=300$  K, 要获得相同的正向电流 1 mA, 则正向偏压为多少?

(b) 已知肖特基二极管反向饱和电流为  $5 \times 10^{-8}$  A, 而 pn 结为  $10^{-12}$  A,  $T=300$  K, 两管并联, 以恒定电流 0.5 mA 驱动, 求每个管子内电流值以及电压降落。两管串联时, 每管的电流和电压又为多大?

## 补充 (页首)

1. 温度为 300K, Ge 掺杂主杂质 $\diamond$  (6&"\$N41MM0XM1B eezElfVwgY21eey0zfQ==" )  $4.50 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>, GaAs 掺杂主杂质  $8.00 \times 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>, 假定杂质完全电离。求: (a) Ge 与 GaAs 材料分别是什么导电类型? 由此组成什么结? (b) 理想条件下的晶格失配率; (c) “冶金结”处导带能级差; (d) “冶金结”处价带能级差; (e) GaAs 中性区的费米能级与最近允带之差的位置; (f) Ge 中性区的费米能级与最近允带之差的位置; (g) Ge 与 GaAs 中性区真空能级差; (h) “冶金结” 2 侧 2 种材料的耗尽层厚度; (i) “冶金结” 2 侧 2 种材料的内建电位。

(a) Ge 掺杂主, p 型; GaAs 掺杂主, n 型; 异质结。 (b) 晶格失配率  $2|a_1 - a_2| / (a_1 + a_2)$

(c) 冶金结处导带能级差  $\Delta E_C = \chi_1 - \chi_2$  (d) 冶金结处价带能级差  $\Delta E_V = \Delta E_g - \Delta E_C$

(e)  $E_F - E_V = -k_B T \ln(N_A / N_V)$  (f) 同理

(g) 真空能级差  $\Delta E_0 = \Delta[\chi + E_g - (E_F - E_V)]$ , 就是真空能级到费米能级的差

(h) 只用算一个  $x_n$ ,  $x_p = (N_D / N_A) x_n$  (i) 内建电位就是真空能级差。

2.



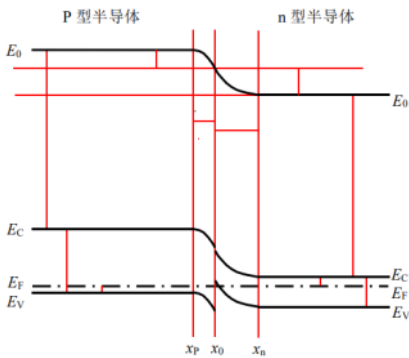
作业题 4. 假定某异质结特性如下：禁带宽度分别为  $E_{gp} = 1.43 \text{ eV}$ 、 $E_{gn} = 0.66 \text{ eV}$ ；电子亲和势分别为  $\chi_p = 4.07 \text{ eV}$ 、 $\chi_n = 4.13 \text{ eV}$ ；半导体内部中性区的费米能级位置分别为  $E_{FP} - E_{VP} = 0.150 \text{ eV}$ 、 $E_{Fn} - E_{Cn} = -0.200 \text{ eV}$ ；P 型半导体内部中性区与“冶金结”的导带能级变化量为  $|eV_{DP}| = 0.400 \text{ eV}$ 、n 型半导体内部中性区与“冶金结”的导带能级变化量为  $|eV_{Dn}| = 0.600 \text{ eV}$ ；如果“冶金结”的位置  $x_0 = 0$ ，则半导体内部中性区边界的位置分别为  $x_p = -250 \text{ nm}$ 、 $x_n = 500 \text{ nm}$ 。请按能量比例 1.00 cm 代表 1.00 eV 和尺度比例 1.00 cm 代表 500 nm 画出能带图，并标出相应能级差、相应边界的位置。

11个符号，2个半导体导电类型的标注；

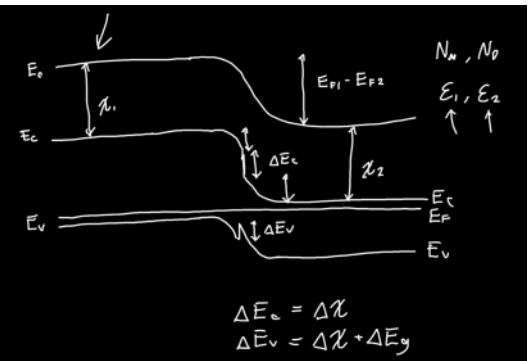
中性区8个能级差，结区8个能级差；

中性区3个位置的曲线；

结区8段曲线。



步骤：确定真空能级差-确定真空能级-确定导带位置-确定价带位置-确定费米能级位置-确定导带价带和  $x_0$  的四个交点（ $V_{Dp}/V_{Dn} = eN_D x_n^2 / (2\epsilon_n)$ ）



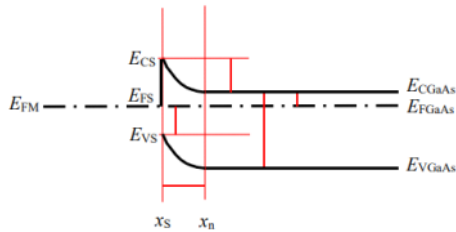
作业题 5. 假定工作温度为 300 K，某 n 型砷化镓与金属接触的表面费米能级在价带顶上方 0.530 eV，半导体内部中性区的费米能级在导带下方 0.250 eV，半导体界面附近的过渡层厚度 400 nm。请按能量比例 1.00 cm 代表 1.00 eV 和尺度比例 1.00 cm 代表 500 nm 画出金属区、半导体表面过渡层、半导体内部中性区的能带图，包括金属的费米能级，半导体的导带底能级、价带顶能级、费米能级，并标出相应能级差、相应边界的位置。

9个符号标注；

金属区1段线，半导体过渡区3段线，半导体中性区3段线

7段线能级的曲线形状

半导体过渡层的厚度

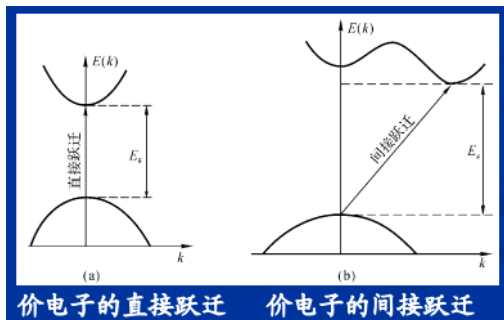


这题看题干画就好。

## 光电子学和光电子器件（[页首](#)）

1. 光照射固体改变运动状态，电子仍在固体内部，半导体光电效应；逸出固体，光电效应
2. 光吸收

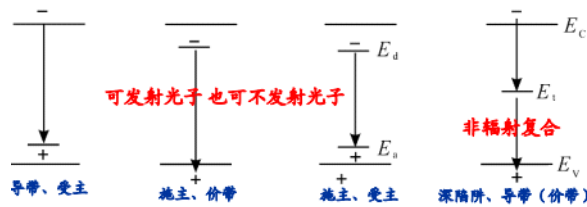
- 本征吸收： $h\nu \geq E_g$ ，电子从价带跃迁到导带，产生电子空穴对



直接跃迁：直接带隙半导体；间接跃迁：间接带隙半导体

间接跃迁需要声子参与，吸收系数小于直接跃迁；

- 激光吸收：价带电子与导带空穴通过库仑力束缚-电中性激子不能传导电流。再激励会得到自由电子和空穴。
  - 自由载流子吸收：导带电子、价带空穴吸收光能量能带内部跃迁
  - 杂质缺陷吸收：束缚在杂质、缺陷上电子/空穴吸收光子能量
  - 晶格吸收：晶格振动，吸收能量
3. 电子空穴对产生速率  $g(x) = \alpha \frac{I(x)}{h\nu}$ ，光通量  $= \frac{I(x)}{h\nu}$
  4. 固体的光发射（热平衡电子激发后回到热平衡，多余的能量释放）
    - 光致发光：电子向上跃迁再向下跃迁
    - 阴极射线发光：电子束或阴极射线轰击发光物体引起发光
    - 电致发光：pn结或肖特基势垒发光；注入载流子复合导致的发光
    - 此外还有放射线发光、生化发光
  5. 复合类型
    - 带间复合：导带底电子和价带顶空穴复合， $h\nu \approx E_g$
    - 杂质缺陷复合：导带与受主、价带与施主、施主与受主、深势阱



- 俄歇复合（非辐射）：电子空穴复合，转移能量给同一能带的高能态自由载流子，再跃迁激发声子，晶体发热

## 6. 发光效率 $\eta \approx$ 辐射效率 = 辐射复合速率 $R_r$ / 总复合速率 $R$

复合速率与寿命成反比，带间电子与空穴的复合速率： $R_r = Bnp$

## 7. pn结伏特效应：光照产生电子空穴对—p区电子和n区空穴在内建电场得作用下在对面边界积累—电动势，与内建电场方向相反，相当于PN结正偏压

## 8. 光电池的IV特性

正偏导致电流  $I_F = I_S [\exp(\frac{eV}{k_B T}) - 1]$ ，净电流  $I = I_L - I_F$ ，电压  $V = \frac{k_B T}{e} \ln[1 + \frac{I_L - I}{I_S}]$

短路电流  $I_{SC} = I_L$

开路电压  $V_{OC} = V_T \ln(\frac{I_L + I_S}{I_S})$

填充因子  $FF = (I_m V_m) / (I_{SC} V_{OC})$

光电池的光电转换效率： $\eta = (I_m V_m) / P_{in}$

## 9. 非均匀吸收效应：光照半导体表面，载流子非均匀

## 10. 非增益型半导体光电探测器：光能→电能；要反偏，把载流子抽取出来

载流子在耗尽区漂移，空穴向p区漂移，电子向n区漂移；电子空穴复合的电流减小，光电流增加

量子效率  $\eta = \frac{I_{ph} h\nu}{eP}$ ， $I_{ph}$  平均输入光电流， $P$  平均入射光功率

响应度  $R = \frac{I_{ph}}{P}$

噪声：散粒噪声（光电子或载流子的随机跃迁）、热噪声（载流子的热运动）【内部】

光电二极管（PN 结型，PIN 管：增长耗尽区，提高响应速度；肖特基型：量子效率高、响应时间短

## 11. 光电导效应： $\lambda \leq \frac{1.24}{E_g}$ 单位 $\mu m$

## 12. 增益型光电探测器

- 雪崩光电二极管（APD）：增益高、灵敏度高，利用雪崩倍增效应

稳定工作要求：仅有一种载流子引起碰撞电离（ $K = 0 \text{ or } \infty$ ）常为电子

增益与带宽制约：增益带宽积  $f_T = MB$

过剩噪声：雪崩过程中碰撞电离的随机性引起的附加噪声

雪崩倍增导致噪声倍增比信号倍增更强。

- 异质结光电二极管

窗口效应：能量被限制在两个禁带宽度之间，光波长受限（选择响应窗口）

## 13. 雪崩、PIN、PN结

工作时反偏、光子能量大于禁带宽度、产生电流；

PN响应速度慢，响应度低、PIN耗尽层厚，扩散区薄，响应速度和响应度提高、雪崩需要加大反偏电压，出

现内部电流增益。

14. 发光二极管：自发辐射（非相干）、受激辐射（相干）

15. 半导体激光器（LD）

粒子数分布反转：保证光受激辐射比吸收多

谐振腔：纵模条件，保证来回一次相移为 $2k\pi$

阈值条件：保证来回一次增益大于损耗

## 计算题（页首）

5.4  $T=300\text{ K}$  的长  $n^+p$  结型 GaAs 太阳电池，已知  $N_D=10^{19}\text{ cm}^{-3}$ ,  $\tau_{n0}=\tau_{p0}=5\times 10^{-8}\text{ s}$ ,  $D_n=225\text{ cm}^2/\text{ s}$ ,  $D_p=7\text{ cm}^2/\text{ s}$ , 假定均匀产生载流子和光电流密度为  $J_L=300\text{ mA}/\text{ cm}^2$ , 要求绘制开路电压  $V_{oc}\sim N_A$  关系曲线。受主浓度  $10^{15}\leq N_A\leq 10^{18}\text{ cm}^{-3}$ 。

$$\text{开路电压 } V_{oc} = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L}{J_S} + 1\right) = \frac{k_B T}{e} \ln\left(\frac{J_L}{J_S} + 1\right)$$

作业题 2：已知 Si-PIN 光电二极管，量子效率为 0.750，波长为  $1.10\text{ }\mu\text{m}$ 。请问作为探测器，该二极管需要正偏还是反偏？并且计算响应度。

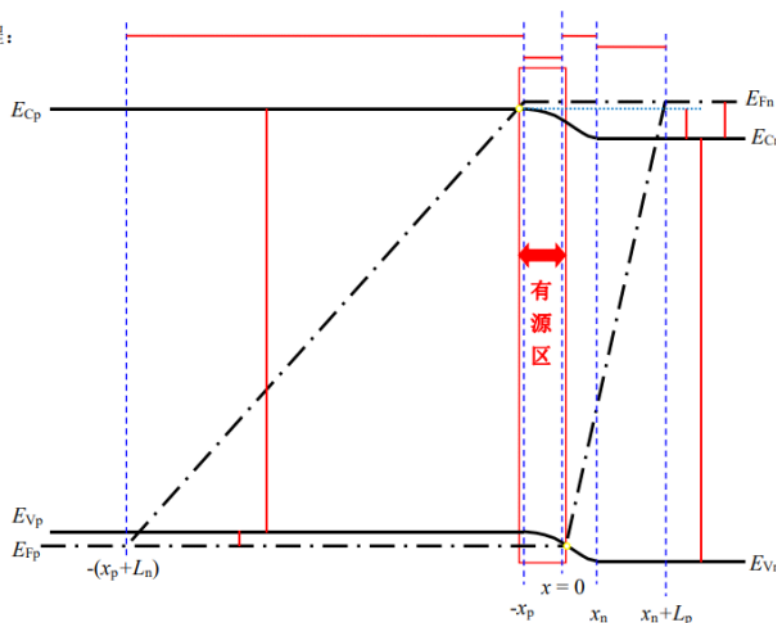
$$\text{反偏。响应度 } R = \frac{I_p}{P_0} = \frac{\eta e}{h\nu} = \frac{\eta\lambda}{1.24}$$

作业题 5：请画出以下参数的 GaAs- $p^+n^+$  同质结半导体激光器能带图，该能带图包括准费米能级（但不含真空能级），标出有源区、能级符号、位置符号：中性区  $n^+$  费米能级在导带底  $0.120\text{ eV}$  上方  $E_{Fn} - E_{Cn} = 0.122\text{ eV}$ ，中性区  $p^+$  费米能级在价带顶  $0.0490\text{ eV}$  下方  $E_{Vp} - E_{Fp} = 0.0492\text{ eV}$ ；GaAs- $p^+n^+$  结的接触电位差  $V_D = 1.60\text{ V}$ ，其中冶金结  $n^+$  侧的电位差  $V_{Dn} = 0.801\text{ V}$ ，正向偏置电压  $V_F = 1.50\text{ eV}$ ； $n^+$  区结边缘与冶金结的距离  $x_n = 1.15\times 10^{-7}\text{ cm}$ ， $p^+$  区结边缘与冶金结的距离  $x_p = 1.27\times 10^{-7}\text{ cm}$ ； $p^+$  区少子（导带电子）的扩散长度  $L_n = 3.35\times 10^{-3}\text{ cm}$ ， $n^+$  区少子（价带空穴）的扩散长度  $L_p = 5.92\times 10^{-4}\text{ cm}$ 。

结区、中性区 8 段；费米能级和准费米能级 6 段；有源区；11 个能级与位置符号

EFP ( $-x_p - L_n, -x_p$ ), EFN ( $0, x_n + L_p$ )

过程：



# 磁电子学 (页首)

1. 轨道运动产生轨道磁矩，自旋运动产生自旋磁矩，还有原子磁矩（很小）

2. 材料磁性

逆磁性：所有材料的共性，本征磁矩为0时可观察到，几乎与温度无关。（简单绝缘体，惰性气体，一般简单金属）

顺磁性： $\chi > 0$ ，正常顺磁性（温度倒数）；自由电子顺磁性（温度无关）

铁磁性：过渡金属，稀土金属；过居里温度后呈现顺磁性

亚铁磁性：非金属磁性材料（铁氧体）过居里温度后呈现顺磁性

反铁磁性：MnO, MnF<sub>2</sub>, NiO, CoF<sub>2</sub>, FeCO<sub>3</sub>；晶面间磁矩抵消，很小，过了奈尔温度呈现顺磁性  
温度过高都会呈现顺磁性。

3. 分子场是一种很强的内场，不是磁场，是一种量子效应和能量交换作用，是相邻电子间的能量交换作用

4. 电子的轨道磁矩： $\mu_i = -\frac{e}{2m}P_i = -\sqrt{l(l+1)}\frac{e\hbar}{2m}$

电子自旋量子磁矩： $\mu_s = -\frac{e}{m}P_s = -\frac{\sqrt{3}e}{2m}\hbar$

电子总磁矩  $= \mu_i + \mu_s$

5. 原子磁矩：被电子占满的壳层，总角动量和磁矩为0，只考虑为占满的。

JJ耦合模型： $Z > 82$ ， $\mu_J = \sum \mu_j$  电子磁矩之和

LS耦合模型： $Z < 32$ ，轨道磁矩和自旋磁矩分别合成，再耦合成总磁矩。（有向）

6. 朗德因子反映了原子中轨道磁矩和自旋磁矩对总磁矩的贡献大小

$L = 0, J = S, g_J = 2$ ，磁矩来自于自旋运动； $S = 0, J = L, g_J = 1$ ，磁矩来自轨道运动； $1 < g_L < 2$ ，磁矩由轨道磁矩和自旋磁矩共同贡献。

7. 洪德定则：

- 总自旋角动量量子数  $S = \sum m_s$  取泡利原理的最大值
- 总轨道角动量量子数  $L = \sum m_L$
- 总角动量量子数  $J$ ，若 壳层电子不到半满， $J = |L - S|$ ；若超过半满， $J = |L + S|$ ；若正好半满， $L = 0, J = S$ ，如三价铈离子 ( $Er^{3+}$ )

8. 分子场是一种很强的内场，不是磁场，是一种量子效应和能量交换作用，是相邻电子间的能量交换作用

9. 磁畴：内部多种能量平衡产生磁畴，总自由能最低

# 超导电子学 (页首)

1. 超导性质：完全导电性（直流电阻为 0，交流存在电阻）；完全逆磁性（迈纳斯），超导存在一个转变宽度

(90%→10%)

2. 完全逆磁性：外加电场在表面感生出超导电流（迈纳斯电流），电流与外加磁场穿透深度均为伦敦深度  
表面超导电流产生的磁化强度与外磁场完全抵消，形成一个完全逆磁体
3. 二流体模型：唯象模型
4. 常导电子（受晶体散射、熵、电阻、比热）  
超导电子（凝聚态，无晶体散射、零熵、无电阻、无比热）
5. 伦敦方程
  - 第一方程  $\frac{\partial \mathbf{J}_s}{\partial t} = \frac{1}{\Lambda^2} \mathbf{E}$ ，电场决定超导电流的时间变化率
  - 第二方程  $\nabla^2 \mathbf{B} - \mathbf{B}/\lambda_L^2 = 0$  超导电流由磁场维持， $\lambda_L = \Lambda/\mu_0^{1/2}$
6. 金茨堡-朗道方程：实际超导电子浓度与温度、位置、磁场均有关系
7. 库柏电子对：两电子自旋相反、动量大小相等、方向相反，依靠晶格局域畸变，结合配对（虚声子）、费米能级附近  
电子 A 将动量传给虚声子，虚声子再将动量传给电子 B；晶格振动固有（本征）频率  $\omega_0$ ，电子 A 能量子频率  $\omega$ ， $\omega < \omega_0$  时，相互吸引，大于时相互排斥  
波矢空间中，费米面附近的电子凝聚成库柏电子对；0K 时费米面附近全是库柏电子对  
库柏电子对的能量比两个常导电子的能量低，（低温才能变超导，能量降低才能超导），获得外界能量后会退化成两个常导电子  
不受泡利不相容原理限制  
超导体的能隙就是拆开库柏电子对的能量，因此超导体会产生宽度为  $2\Delta$  的能隙  
温度上升，库柏电子对数目减少，常导电子数目上升，上升到临界温度后超导电子完全消失
8. 隧道效应与约瑟夫效应：
  - 正常金属与正常金属之间：有一个薄绝缘层，隧穿线性，I-V 曲线直线
  - 正常金属与超导体：由于能隙，IV 特性变得不一样
  - 超导体与超导体：两个能隙，IV 特性比较复杂
9. 不加任何电场与磁场时，有直流电流；外加直流电压时，会产生交流（高频电流振荡）