

- C. 非平衡载流子浓度成反比； D. 平衡载流子浓度成反比。
8. $n_0 p_0 = n_i^2$ 标志半导体处于 (A) 状态, 当半导体掺入的杂质含量改变时, 乘积 $n_0 p_0$ 是否改变: (D); 当用波长和半导体带隙相当的光照射半导体表面时, $n_0 p_0$ 变大还是变小 (C)。
- A. 平衡; B. 非平衡; C. 是; D. 否; E. 大 F. 小
9. 对于 n 型硅材料, 在研究其载流子输运过程的散射机构时发现, 当温度升高时, 电离杂质散射的概率和晶格振动散射概率的变化分别是 (B)。
- A. 变大, 变小; B. 变小, 变大;
C. 变小, 变小; D. 变大, 变大。
10. 掺杂可以在半导体的禁带中引入能级, 对于非平衡载流子而言, 最有利陷阱作用的能级位置在 (C) 附近, 最有效的复合中心能级位置在 (D) 附近; 此外, 陷阱效应中, 常见的是 (E) 陷阱。
- A. E_A B. E_D C. E_F
D. E_i E. 少子 F. 多子
11. 半导体材料中的载流子的有效质量包含了晶体内部势场对载流子的作用, 可通过 (B) 实验来测量; 半导体的电阻率可以通过 (D) 直接测量。
- A. 霍尔效应 B. 回旋共振 C. 光衰减法 D. 四探针法
12. 半导体的禁带宽度决定了载流子本征激发能力, 以下 4 种半导体中最适合于制作高温器件的是 (D)。
- A. Si B. Ge C. GaAs D. GaN
13. 以下四种材料, 在室温时, 功函数最大的半导体材料是 (A)。
- A. 含硼 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ 的硅 B. 含磷 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的硅
C. 含硼 $1 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$, 磷 $1 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的硅 D. 纯净的硅
14. 某 N 型 Si 半导体的功函数 W_s 是 4.3eV, 金属 Al 的功函数 W_m 是 4.2 eV, 该半导体和金属接触时的界面将会形成 (B)。
- A. 阻挡层接触 B. 反阻挡层接触 C. PN 结 D. 低电导区
15. 在磷掺杂浓度为 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 的硅衬底 (功函数约为 4.25eV) 上要做出欧姆接触, 下面四种金属最适合的是 (A)。
- A. In ($W_m=3.8\text{eV}$) B. Cr ($W_m=4.6\text{eV}$)
C. Au ($W_m=4.8\text{eV}$) D. Al ($W_m=4.2\text{eV}$)
16. 在硅基 MOS 器件中, 硅衬底和 SiO_2 界面处的固定电荷是 (B), 它的存在使得半导体表面

的能带（ **C** ）弯曲，在 C-V 曲线上造成平带电压（ **F** ）偏移。

- A. 钠离子 B. 过剩的硅离子 C. 向下；
D. 向上 E. 向正向电压方向 F. 向负向电压方向。

17. MIS 结构的表面发生强反型时，其半导体材料的表面的导电类型与对应的体材料的（ **B** ）。若增加半导体的掺杂浓度，MIS 结构的开启电压将（ **C** ）。

- A. 相同 B. 不同
C. 增加 D. 减少

得 分

二、简答题（共 28 分）

1. 本征半导体中进行有意掺杂各种元素，可改变材料的各种电学性能。请解释什么是浅能级杂质、深能级杂质，它们分别影响半导体哪些主要性质；什么是杂质补偿以及它的意义何在？（本题 6 分）

答：浅能级杂质是指其杂质电离能远小于本征半导体的禁带宽度的杂质。它们电离后将成为带正电（电离施主）或带负电（电离受主）的离子，并同时向导带提供电子或向价带提供空穴。它可有效地提高半导体的导电能力。掺杂半导体又分为 n 型半导体和 p 型半导体。（2 分）

深能级杂质是指杂质所在的能级位置在禁带中远离导带或价带，在常温下很难电离，不能对导带的电子或价带的空穴的浓度有所贡献，但它可以提供有效的复合中心，在光电子开关器件中有所应用。（2 分）

当半导体中既有施主又有受主时，施主和受主将先互相抵消，剩余的杂质最后电离，这就是杂质补偿。（1 分）

利用杂质补偿效应，可以根据需要改变半导体中某个区域的导电类型，制造各种器件。（1 分）

2. 什么叫复合中心？何谓非平衡载流子的间接复合？间接复合有哪四个微观过程？试说明间接复合的每个微观过程与哪些参数有关。（本题 6 分）

答：半导体内的杂质和缺陷能够促进复合，称这些促进复合的杂质和缺陷为复合中心；（1 分）

间接复合：非平衡载流子通过复合中心的复合；（1 分）

四个微观过程如下：

俘获电子：和导带电子浓度和空复合中心浓度有关。（1分）

发射电子：和复合中心能级上的电子浓度。（1分）

俘获空穴：和复合中心能级上的电子浓度和价带空穴浓度有关。（1分）

发射空穴：和空的复合中心浓度有关。（1分）

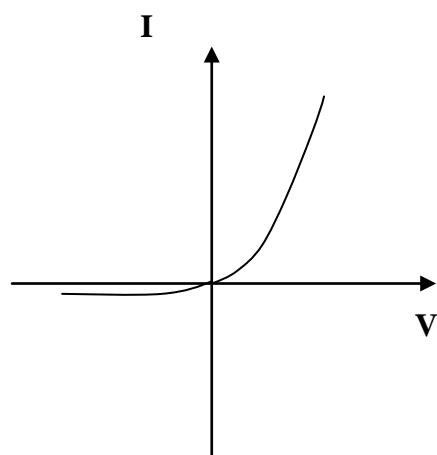
3. 如金属和 n 型硅形成金属/半导体接触，请简述在什么条件下，形成的哪两种不同电学特性的接触，说明半导体表面的能带情况，并画出对应的 I-V 曲线。（此处忽略表面态的影响）（本题 8 分）

答：在金属和 n 型半导体接触时，如金属的功函数为 ϕ_m ，半导体的功函数为 ϕ_s 。

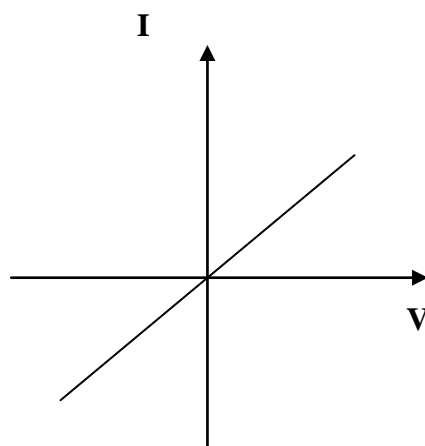
当 $\phi_m > \phi_s$ 时，在半导体表面形成阻挡层接触，是个高阻区，半导体表面的能带向上弯曲；（2分）

当 $\phi_m < \phi_s$ 时，在半导体表面形成反阻挡层接触，是个高电导区，半导体表面的能带向下弯曲；（2分）

对应的 I-V 曲线分别为：



（2分）

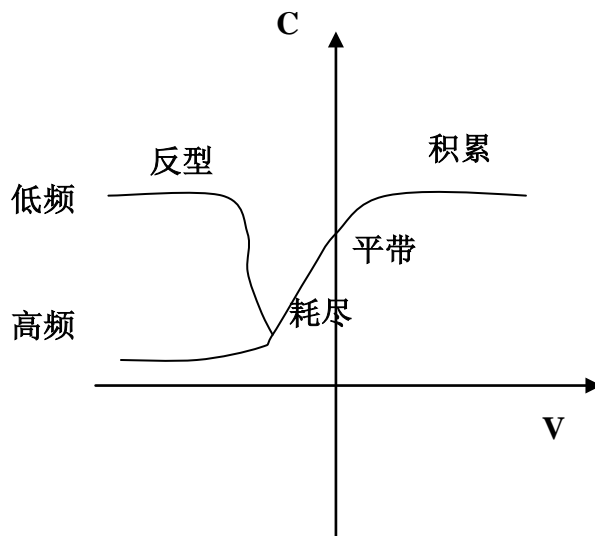


（2分）

4. 以 n 型 Si 为衬底制备出 MIS 结构，试画出在理想条件下，高频和低频的电容—电压（C-V）曲线，并在曲线上分别注明积累、平带、耗尽和反型状态下的区域和位置。

如果绝缘层中存在正电荷，正电荷在什么位置时对高频 C-V 没有影响？通过什么方法处理可以消除可移动正电荷的影响？（本题 8 分）

答：C-V 曲线如下所示：



（积累、平带、耗尽和反型各 1 分，共 4 分）

当绝缘层中存在正电荷时，会使得 C-V 向负偏压方向偏移（1 分）。但当正电荷处于金属和绝缘层之间时，对 C-V 没有影响。（1 分）

可移动正电荷的影响可以通过温度—偏压实验（B-T 实验），把可移动正电荷赶到金属和绝缘层之间。（2 分）

得 分

三、证明题（共 8 分）

由金属—SiO₂—P 型 Si 组成的 MOS 结构，当外加电压使得半导体表面少数载流子浓度 n_s与半导体内部多数载流子浓度 p_{p0}相等时作为临界强反型条件。（本题 8 分）

（1）试证明临界强反型时，半导体的表面势为：（5 分）

$$V_s = 2V_B = \frac{2k_0T}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}, \quad \text{其中} \quad V_B = \frac{E_i - E_F}{q}$$

（2）画出临界强反型时半导体的能带图，标明相关符号，并把反型、耗尽、中性区各部分用竖线分开，并用文字指明。（3 分）

解：（1）设半导体表面势为 V_s，则表面处的电子浓度为：

$$n_s = n_{p0} e^{\frac{qV_s}{k_0T}} = \frac{n_i^2}{p_{p0}} e^{\frac{qV_s}{k_0T}} \quad (2 \text{ 分})$$

在临界强反型情况下，有 n_s=p_{p0}，

$$\text{即 } p_{p0}^2 = n_i^2 e^{\frac{qV_s}{k_0T}}, \text{ 或 } p_{p0} = n_i e^{\frac{qV_s}{2k_0T}} \quad (1 \text{ 分})$$

此外，在平衡状态下半导体体内的多子空穴浓度为：

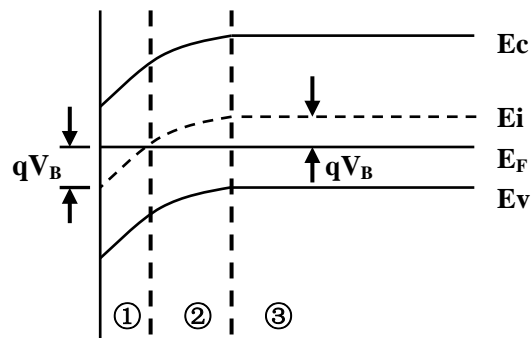
$$p_{p0} = N_v e^{-\frac{E_F - E_v}{k_0T}} = n_i e^{-\frac{E_i - E_F}{k_0T}} = n_i e^{\frac{qV_B}{k_0T}} \quad (1 \text{ 分})$$

所以，比较以上两个式子，可得到：

$$V_s = 2V_B$$

$$V_s = 2V_B = \frac{2k_0T}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} \quad (1 \text{ 分})$$

(2)



在上图中，①为反型区，②为耗尽区，③为中性区

(3 分)

得分

四、计算题 (共 34)

1. 有一块足够厚的 p 型硅样品，在室温 300K 时电子迁移率 $\mu_n = 1200 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ，电子的寿命 $\tau_n = 10 \mu\text{s}$ 。如在其表面处稳定地注入的电子浓度为 $\Delta n(0) = 7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ 。试计算在离开表面多远地方，由表面扩散到该处的非平衡载流子的电流密度为 1.20 mA/cm^2 。(表面复合忽略不计)。

($k_0 = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), $q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $k_0T = 0.026 \text{ eV}$) (此题 10 分)

解：由爱因斯坦关系，可得到室温下少子电子的扩散系数：

$$D_n = \frac{k_o T}{q} \mu_n = \frac{0.026 eV}{e} \times 1200 cm^2 / V.S = 31.2 \times 10^{-4} m^2 / s \quad (2 \text{ 分})$$

电子的扩散长度 $L_n = \sqrt{D_n \tau_n} = \sqrt{31.2 \times 10^{-4} \times 10 \times 10^{-6}} = 1.76 \times 10^{-4} (m) \quad (2 \text{ 分})$

非平衡载流子的扩散方程为:

$$S_n(x) = -D_n \frac{d\Delta n(x)}{dx}, \quad \text{其中 } \Delta n(x) = \Delta n(0) e^{-\frac{x}{L_n}} \quad (2 \text{ 分})$$

所以, 扩散电流 $J = \left| -q S_n(x) \right| = \frac{q D_n \Delta n(0)}{L_n} e^{-\frac{x}{L_n}} \quad (2 \text{ 分})$

由上式可得到: $x = L_n \ln \left[\frac{q D_n \Delta n(0)}{J L_n} \right] \quad (1 \text{ 分})$

把 $\Delta n(0) = 7 \times 10^{12} cm^{-3}$, $J = 1.20 mA / cm^2$, $L_n = 1.76 \times 10^{-4} m$, 以及 D_n 的值代入上式, 得到:

$$x = 1.76 \times 10^{-4} \ln \left(\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 31.2 \times 10^{-4} \times 7 \times 10^{18}}{1.76 \times 10^{-14} \times 12} \right) = 8.7 \times 10^{-5} (m) \quad (1 \text{ 分})$$

2. 假设有 n 型单晶硅片和某一金属接触形成肖特基二极管, 已知其金半接触结构的参数为

$W_m = 4.7 eV$, $\chi_s = 4.0 eV$, $N_c = 10^{19} / cm^3$, $N_D = 10^{15} / cm^3$, 半导体硅的相对介电常数为

$\epsilon_r = 12$, 如忽略表面态的影响, 请计算在室温下: (此题 10 分)

(1) 零偏时半导体表面的势垒高度和势垒宽度;

(2) 正偏为 0.2V 时的热发射电流。设 $A^* / A = 2.1$, $A = 120 A / cm^2$ 。

解: (1) 由

$$N_D = n_0 = N_c \exp \left(-\frac{E_c - E_F}{k_o T} \right) \quad (1 \text{ 分})$$

可求得

$$E_c - E_F = k_o T \ln \frac{N_c}{N_D} = 0.026 \ln \frac{10^{19}}{10^{16}} = 0.17 (eV) \quad (1 \text{ 分})$$

所以 $W_s = \chi_s + (E_c - E_F) = 4.17 (eV) \quad (1 \text{ 分})$

势垒高度为 $qV_D = W_m - W_s = 4.7 - 4.17 = 0.53 (eV) \quad (1 \text{ 分})$

自建电势差为 $V_D = 0.53 (V) \quad (1 \text{ 分})$

势垒宽度为

$$d = \left(\frac{2\epsilon_r\epsilon_0 V_D}{qN_D} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{2 \times 12 \times 8.85 \times 10^{-14} \times 0.53}{1.6 \times 10^{-19} \times 10^{16}} \right)^{\frac{1}{2}} = 2.6 \times 10^{-5} (cm) \quad (2 \text{ 分})$$

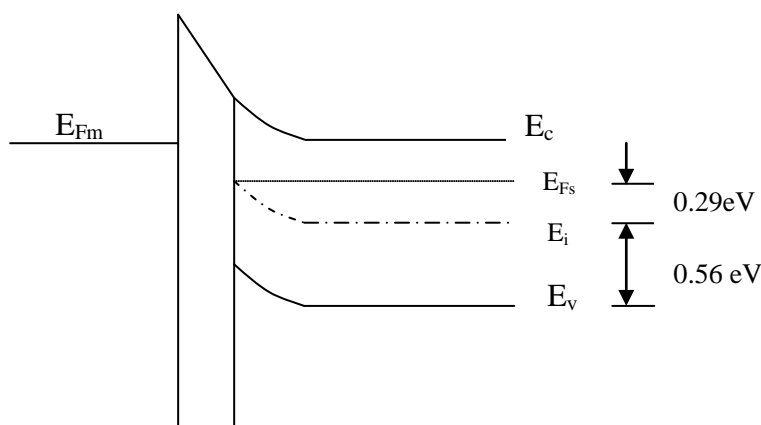
$$(2) \quad q\phi_{ns} = qV_D + E_n = 0.53 + 0.17 = 0.7 (eV) \quad (1 \text{ 分})$$

所以

$$I = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0 T}\right) \left(\exp\left(\frac{qV}{k_0 T}\right) - 1 \right) =$$

$$2.1 \times 120 \times (300)^2 e^{-\frac{0.7}{0.026}} \left(e^{\frac{0.2}{0.026}} - 1 \right) = 8.4 \times 10^{-2} A/cm^2 \quad (2 \text{ 分})$$

3. 室温下，有一硅基 MOS 电容结构。在理想条件下，其能带图如下图所示。在金属电极上施加的栅极偏压半导体表面的能带发生弯曲，在 Si-SiO₂ 界面使得 E_F=E_i。Si 的电子亲合势为 4.0 eV，N_c=10¹⁹ cm⁻³。试解答下列问题：（此题 14 分）



- (1) 求出半导体 Si-SiO₂ 界面 E_F=E_i 处的电子浓度？同时绘出与该能带图对应的定性电荷块图。（5 分）
 - (2) 求出半导体硅的掺杂浓度 N_D（3 分）
 - (3) 求出该器件中硅的功函数 W_S。（2 分）
 - (4) 如果用两种金属制备栅电极，形成两种器件。器件 1 是 Al，器件 2 是 Au。这两个 n 型半导体构成的 MOS 结构除了栅不同，其它参数都一样。请阐述这两个 MOS 结构的高频 C-V 特性曲线发生什么定性变化？（2 分）
- 并试绘出定性高、低频 C-V 特性曲线。已知 W_{Al}=4.2 eV，W_{Au}=4.8 eV。（2 分）

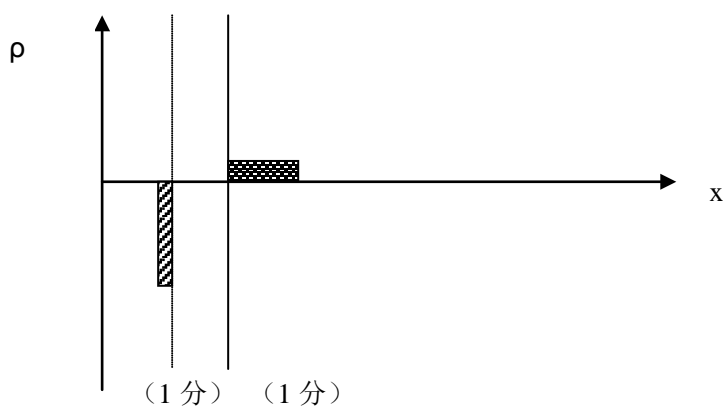
解：(1)半导体 Si-SiO₂界面 E_F=E_i 处的电子浓度：

$$n_0 = N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} = 10^{19} e^{-\frac{0.56}{0.026}} = 4.43 \times 10^9 \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

(2 分)

(0.5 分) (0.5 分)

电荷块图见下图：



(1 分)

(1 分)

(2)半导体硅为 n 型硅，杂质完全电离时，多子电子浓度等于掺杂浓度 N_D：

$$N_D \approx N_c e^{-\frac{E_c - E_F}{kT}} = N_c e^{-\frac{E_g - (E_{Fs} - E_v)}{kT}} = 10^{19} e^{-\frac{1.12 - (0.29 + 0.56)}{0.026}} \approx 3.09 \times 10^{14} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

(2 分)

(0.5 分)

(0.5 分)

(3) W_s=x+En=4.0+(0.56-0.29)=4.27 (eV)

(1 分)

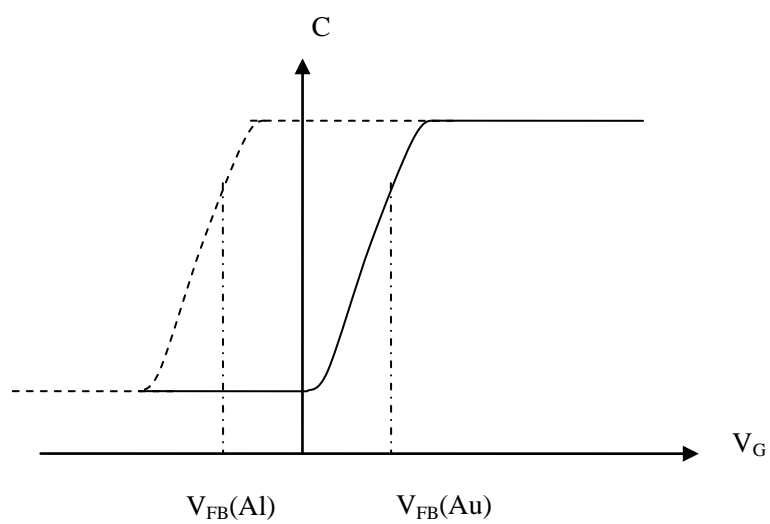
(1 分)

(4) 因为 V_{FB}(Al)=W_m(Al)-W_s=-0.27<0, V_{FB}(Au)=W_m(Au)-W_s=0.53>0

所以，C-V 曲线分别为左偏 (Al) 和右偏 (Au)

(1 分)

(1 分)



(1 分)

(1 分)