第七章题解

思考题

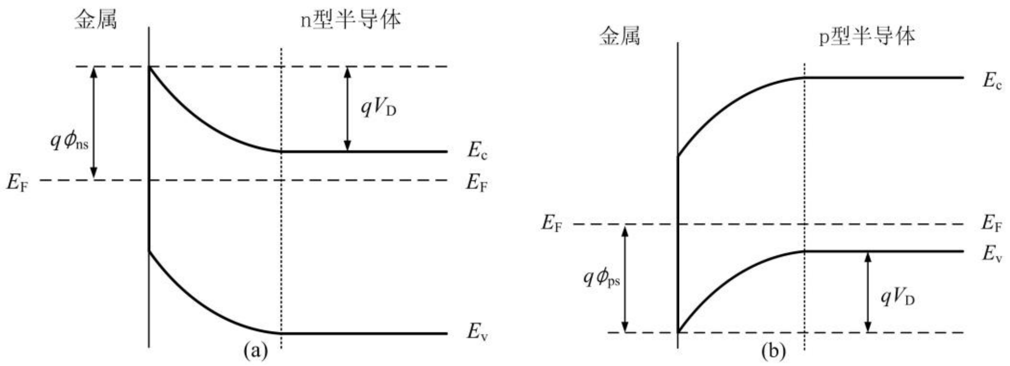
1. 定性说明半导体功函数随掺杂浓度的变化趋势。

答：n 型半导体，随着掺杂浓度的增大，费米能级更靠近导带，所以功函数随着掺杂浓度的增加而减少。

P 型半导体，随着掺杂浓度的增加，费米能级更靠近价带，所以功函数随着掺杂浓度的增加而增加。

2. 画出金属和 n 型以及 p 型半导体接触形成肖特基结在无外加偏压时平衡状态的能带图。

答：

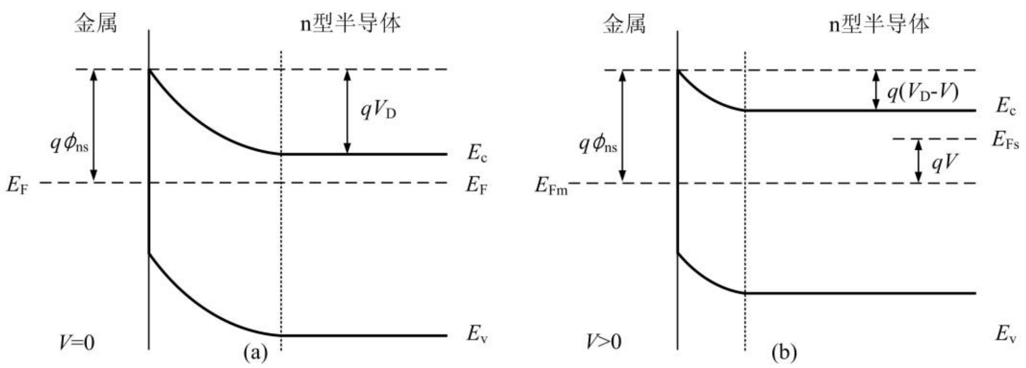


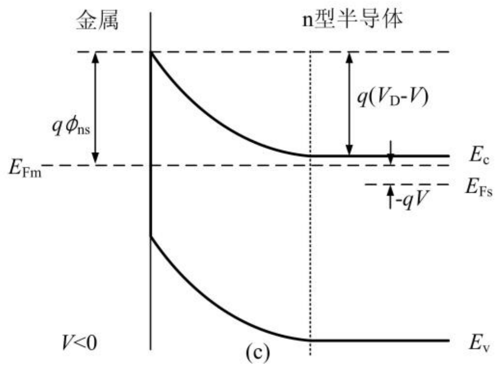
3. 以金属-n 型半导体形成的肖特基势垒为例，解释肖特基结的整流特性，并画出能带图。

答：零偏压时，从半导体进入金属的电子流和从金属进入半导体的电子流大小相等，方向相反，无净电流。

答：正向偏压时，半导体侧的势垒高度降低，金属端的肖特基势垒高度不变，因此从半导体到金属的电子数目超过从金属到半导体的电子数，形成的正向电流方向从金属到半导体。正向电压越大，势垒下降越多，正向电流越大。

在金属端加负向偏压时，半导体侧的势垒高度增高，而金属端的肖特基势垒高度不变，从半导体到金属的电子数目减少，金属到半导体的电子流占优势，形成从半导体到金属的反向电流。反向电流很小且恒定。





4. 比较热电子发射理论和扩散理论。

答：热电子发射理论：适用于迁移率较大的半导体，反向饱和电流对温度敏感，与外加偏压无关。

$$J = J_{s\to m} + J_{m\to s} = A^*T^2\exp(-\frac{q\varphi_{ns}}{k_0T})[\exp(\frac{qV}{k_0T})-1]$$

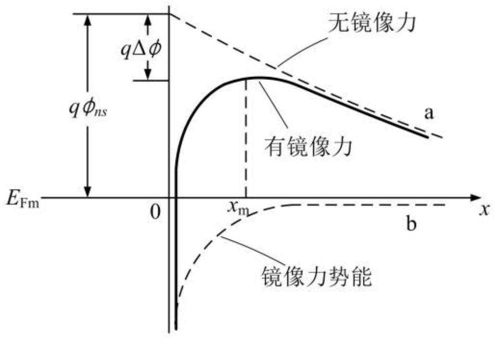
$$= J_{ST}[\exp(\frac{qV}{k_0T})-1]$$

扩散理论：适用于迁移率较小的半导体，反向饱和电流对电压敏感。

$$J = \frac{q^2D_nN_c}{k_0T}\left\{-\frac{2qN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}[(V_s)_0+V]\right\}\left[\exp\left(\frac{qV}{k_0T}\right)-1\right]$$

5. 用能带图简要说明镜像力引起肖特基势垒的降低的原理。

答：如图所示，曲线 a 为不考虑镜像力的电子势能，曲线 b 为镜像力引入的附加势能，所以考虑了镜像力后，电子势能降低，势垒高度下降值用 $q\Delta\phi$ 表示。



6. 解释欧姆接触的形成原理。

答：上主要采用金属和重掺杂半导体接触，利用隧道效应形成欧姆接触。半导体材料重掺时，势垒区宽度很薄，由隧道效应产生的隧道电流占主导地位时，金属-半导体的接触电阻很小，可以用作欧姆接触。

7．如何测试肖特基二极管的肖特基势垒高度。列出实验方法，并说明测试原理。

答：可通过测试基二极管的电流-电压特性和电容-电压特性来求得二极管的肖特基势垒高度。

电流-电压特性如下：$J_{ST} = A^*T^2\exp(-\frac{q\varphi_{ns}}{k_0T})$，通过变温测试 *I-V* 特性，可得到

$\ln(\frac{J_{ST}}{T^2}) = \ln A^* + \frac{q\varphi_{ns}}{k_0T}$。由图 $\ln(\frac{J_{ST}}{T^2}) \sim \frac{1}{T}$ 可以得到肖特基势垒高度。

电容-电压测试：$C = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V} = \left[\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0 qN_{\mathrm{D}}}{2(V_{\mathrm{D}}-V)}\right]^{1/2}$，可得到 $\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0 qN_{\mathrm{D}}}(V_{\mathrm{D}}-V)$，作图 $\frac{1}{C^2}-V$ 为一条直线，延长 $\frac{1}{C^2}-V$ 直线与 V 轴相交，即 $\frac{1}{C^2}=0$ 时，得到 V_{D}。$q\varphi_{\mathrm{ns}} = qV_{\mathrm{D}} + E_{\mathrm{n}} - q\Delta\phi$ 可求得 $q\phi_{ns}$，其中 $q\Delta\phi$ 为由于镜像力或隧道效应所引起的势垒降低量。

习题

1、施主浓度为 $N_{\mathrm{D}} = 5\times10^{16}/\mathrm{cm}^3$ 的 n 型硅，室温下功函数为多少？忽略表面态的影响，它分别同 Al, Au 和 Mo 接触时，形成阻挡层还是反阻挡层？硅的电子亲合能取 4.05eV。设 $W_{\mathrm{Al}} = 4.18\mathrm{eV}, W_{\mathrm{Au}} = 5.20\mathrm{eV}, W_{\mathrm{Mo}} = 4.21\mathrm{eV}$。

解：设室温下杂质全部电离，则

$$n_0 = N_{\mathrm{D}} = N_c \exp(-\frac{E_{\mathrm{c}}-E_{\mathrm{F}}}{k_0T})$$

所以 $E_{\mathrm{F}} = E_{\mathrm{c}} + k_0T\ln\frac{N_{\mathrm{D}}}{N_c} = E_{\mathrm{c}} + 0.026\ln\frac{5\times10^{16}}{2.8\times10^{19}} \approx E_{\mathrm{c}} - 0.165(\mathrm{eV})$

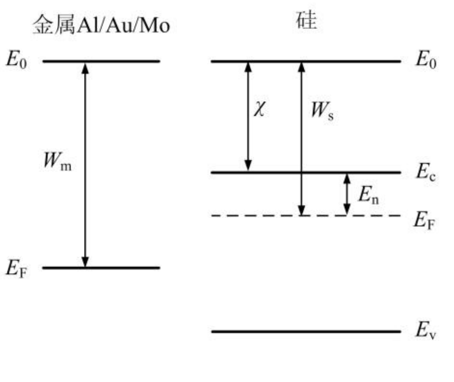
$n-Si$的功函数为 $W_{\mathrm{s}} = \chi + (E_{\mathrm{c}}-E_{\mathrm{F}}) = 4.05 + 0.165 = 4.215(\mathrm{eV})$

已知： $W_{\mathrm{Al}} = 4.18(\mathrm{eV})$， $W_{\mathrm{Al}} < W_{\mathrm{s}}$，二者形成反阻挡层

$W_{\mathrm{Au}} = 5.20(\mathrm{eV})$， $W_{\mathrm{Au}} > W_{\mathrm{s}}$，二者形成阻挡层

$W_{\mathrm{Mo}} = 4.21(\mathrm{eV})$， $W_{\mathrm{Mo}} < W_{\mathrm{s}}$，二者形成反阻挡层

能带图见：



2、受主浓度为 $N_{\mathrm{A}} = 5\times10^{16}/\mathrm{cm}^3$ 的 p 型锗，室温下功函数为多少？忽略表面态的影响，它分别同 Al, Au 和 Pt 接触时，形成阻挡层还是反阻挡层？Ge 的电子亲合能取 4.13eV。设 $W_{\mathrm{Al}} = 4.18\mathrm{eV}, W_{\mathrm{Au}} = 5.20\mathrm{eV}, W_{\mathrm{Pt}} = 5.43\mathrm{eV}$。

解：设室温下杂质全部电离，则

$$p_0 = N_A = N_v \exp(-\frac{E_F - E_v}{k_0 T})$$

所以 $E_F = E_v + k_0 T \ln\frac{N_v}{N_A} = E_v + 0.026\ln\frac{3.9\times10^{18}}{5\times10^{16}} \approx E_v + 0.11(\text{eV})$

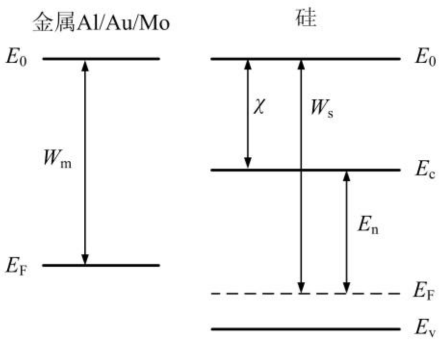
$p-Ge$的功函数为 $W_s = \chi + (E_c - E_F) = \chi + E_g - (E_F - E_v) = 4.13 + 0.67 - 0.11 = 4.69(\text{eV})$

已知： W_{Al} =4.18(eV)， $W_{Al} < W_s$，二者形成阻挡层

W_{Au} =5.20(eV)， $W_{Au} > W_s$，二者形成反阻挡层

W_{Pt} =5.43(eV)， $W_{Pt} > W_s$，二者形成反阻挡层

能带图见：



3、掺杂浓度为 N_D=10^{16}cm^{-3} 的 n 型单晶硅材料和金属 Au 接触，忽略表面态的影响，已知：W_{Au}=5.20eV, χ=4.05eV, N_c=10^{19}cm^{-3},ln10^3=6.54 在室温下 k_0T=0.26eV,半导体介电常数 ε_r=12, 试计算：

⑴ 半导体的功函数；

⑵ 在零偏压时，半导体表面的势垒高度，并说明是哪种形式的金半接触，半导体表面能带的状态；

⑶ 半导体表面的势垒宽度。

解：⑴由 $N_D = n_0 = N_c \exp(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T})$

$$E_c - E_F = k_0 T \ln\frac{N_c}{N_D} = 0.026\ln\frac{10^{19}}{10^{16}} = 0.17\text{eV}$$

$$\therefore W_s = \chi + (E_c - E_F) = 4.05 + 0.17 = 4.22\text{eV}$$

⑵ 在零偏压下，半导体表面的势垒高度为：

$$qV_D = W_m - W_s = 5.20 - 4.22 = 0.98\text{eV}$$

对 n 型半导体，因为 W_m＞W_s，所以此时的金半接触是阻挡层接触，半导体表面能带向上弯曲。

⑶ 势垒的宽度为：

$$x_{\mathrm{d}}=(\frac{2\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0 V_{\mathrm{D}}}{qN_{\mathrm{D}}})^{1/2}$$
$$=(\frac{2\times12\times8.85\times10^{-14}\times0.98}{1.6\times10^{-19}\times10^{16}})^{1/2}$$
$$=3.61\times10^{-5}(\mathrm{cm})$$

4、考虑室温 Au 与 n 型 Si 接触，掺杂浓度为 $N_{\mathrm{D}}=10^{17}$ cm^{-3}, T=300K。（a）画出两种材料接触前的能带图；（b）画出接触后零偏时的理想能带图；（c）计算（b）中的 $q\varphi_{\mathrm{ns}}$，x_{d} 和 $E_{\max}$。硅的电子亲合能取 4.05eV。设 $W_{\mathrm{Au}}=5.20\mathrm{eV}$，$\varepsilon_{\mathrm{r}}(\mathrm{Si})=11.9$。

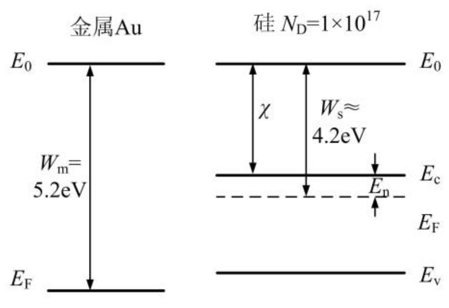
解：（a）设室温下杂质全部电离，则

$$n_0=N_{\mathrm{D}}=N_c\exp(-\frac{E_{\mathrm{c}}-E_{\mathrm{F}}}{k_0T})$$

所以 $\quad E_{\mathrm{F}}=E_{\mathrm{c}}+k_0T\ln\frac{N_{\mathrm{D}}}{N_c}=E_{\mathrm{c}}+0.026\ln\frac{10^{17}}{2.8\times10^{19}}\approx E_{\mathrm{c}}-0.147(\mathrm{eV})$

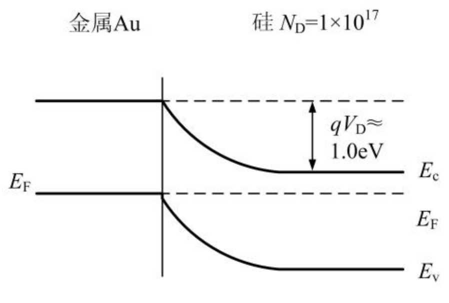
$n-Si$的功函数为 $\quad W_{\mathrm{s}}=\chi+(E_{\mathrm{c}}-E_{\mathrm{F}})=4.05+0.147=4.197(\mathrm{eV})$

已知： $W_{\mathrm{Au}}=5.20(\mathrm{eV})$, $\quad W_{\mathrm{Au}}>W_{\mathrm{s}}$，二者形成阻挡层



(a)

（b）



(b)

（c） $q\phi_{ns}=qV_D+E_n=-qV_s+E_n=W_m-W_s+E_n=W_m-\chi=5.2-4.05=1.15(\mathrm{eV})$

$$qV_D = -qV_s = W_m - W_s = 5.2 - 4.197 = 1.003(\text{eV})$$

$$x_d\big|_{V=0} = x_{d0} = [-\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0 (V_s)_0}{qN_D}]^{1/2} = \left[\frac{2\times 11.9\times 8.85\times 10^{-14}\times 1.003}{1\times 10^{17}\times 1.6\times 10^{-19}}\right]^{1/2} = 0.115\text{um}$$

$$|E_{max}| = \frac{qN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}x_d = \frac{1.6\times 10^{-19}\times 1\times 10^{17}\times 0.115\times 10^{-4}}{11.9\times 8.854\times 10^{-14}} = 1.75\times 10^5\,\text{V/cm}$$

5、PtSi 肖特基二极管在 T=300K 时生长在掺杂浓度为 $N_D=10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型<100>Si 上。肖特基势垒高度为 0.89eV。计算 1）$E_n=E_c-E_F$，2）qV_D，3）忽略势垒降低时的 J_{ST}，4）使 $J=2\text{A/cm}^2$ 时的外加偏压 V。

解：1) $N_D = N_c \exp(-\dfrac{E_c - E_F}{k_0 T})$

$$\Rightarrow E_c - E_F = k_0 T \ln\frac{N_c}{N_D}$$

$$\Rightarrow E_c - E_F = 0.026\times\ln\frac{2.8\times 10^{19}}{10^{16}} = 0.206\text{eV}$$

2) $qV_D = \varphi_{ns} - E_n = 0.684eV$

3) $J_{ST} = A^* T^2 \exp(-\dfrac{q\varphi_{ns}}{k_0 T})$

$$= 2.1\times 120\times 300^2 \exp(-\frac{0.89}{0.026}) = 3.09\times 10^{-8} A/cm^2$$

4) $J = J_{ST}\left[\exp(\dfrac{qV}{k_0 T}) - 1\right]$

$$\Rightarrow \quad V = \frac{k_0 T}{q}\ln(\frac{J}{J_{ST}} + 1) = 0.026\times\ln(\frac{2}{3.09\times 10^{-8}} + 1) = 0.467V$$

6、有一块施主浓度 $N_D = 10^{16}\text{cm}^{-3}$ 的 n 型锗材料，在它的（111）面上与金属接触制成肖特基势垒二极管。已知：V_D=0.4V，求加上 0.3V 电压时的正向电流密度。

解：镜像力影响使得势垒高度降低量为

$$q\Delta\phi=\frac{1}{4}[\frac{2q^7N_{\mathrm{D}}}{\pi^2\varepsilon_r^3\varepsilon_0^3}(V_{\mathrm{D}}-V)]^{1/4}=\frac{1}{4}[\frac{2\times(1.6\times10^{-19})^7\times10^{16}}{3.14^2\times16^3\times(8.85\times10^{-14})^3}\times(0.4-0.3)]^{1/4}$$

$$=\frac{1}{4}[\frac{2\times26.84\times10^{-133}\times10^{16}\times10^{-1}}{4\times10^4\times6.9\times10^2\times10^{-42}}]^{1/4}=9.3\times10^{-22}(\mathrm{J})=\frac{9.3\times10^{-22}}{1.6\times10^{-19}}\approx0.006(\mathrm{V})$$

所以实际势垒高度 $qV_{\mathrm{D}}^{'}=qV_{\mathrm{D}}-q\Delta\phi=q(0.4-0.006)=0.394(\mathrm{eV})$

因为 $E_{\mathrm{n}}=E_c-E_{\mathrm{F}}=k_0T\ln\frac{N_{\mathrm{c}}}{N_{\mathrm{D}}}=0.026\ln\frac{1.05\times10^{19}}{10^{16}}=0.181(\mathrm{eV})$

实际肖特基势垒高度 $q\varphi_{\mathrm{ns}}^{'}=qV_{\mathrm{D}}^{'}+E_{\mathrm{n}}=0.394+0.181=0.575(\mathrm{eV})$

正向电流密度为

$$J=A^{*}T^2\exp(-\frac{q\varphi_{\mathrm{ns}}}{k_0T})[\exp(\frac{qV}{k_0T})-1]=1.11\times120\times300^2\times e^{-\frac{0.574}{0.026}}(e^{\frac{0.3}{0.026}}-1)=317.6(\mathrm{A/cm^2})$$

7、某金-半接触构成的阻挡层，其中半导体中施主浓度为 2.5×10^{16}cm^{-3}，半导体一边的势垒高度为 0.64eV，金属一边的势垒高度为 0.67eV。计算

（1）分别加上 0.44V 的正向电压和 3V 的反向电压时，半导体一边的势垒宽度之比；

（2）室温下的反向饱和电流。

已知：A*=114 A/（cm^2·K^2），q=1.602×10^{-19}C，1eV=1.602×10^{-19}J。

解：(1)

由$x_{\mathrm{d}}=\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{s}}(V_{\mathrm{D}}-V)}{qN_{\mathrm{D}}}}$

得到$\frac{x_{\mathrm{d1}}}{x_{\mathrm{d2}}}=\frac{\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{s}}(V_{\mathrm{D}}-V_1)}{qN_{\mathrm{D}}}}}{\sqrt{\frac{2\varepsilon_0\varepsilon_{\mathrm{s}}(V_{\mathrm{D}}-V_2)}{qN_{\mathrm{D}}}}}=\sqrt{\frac{V_{\mathrm{D}}-V_1}{V_{\mathrm{D}}-V_2}}=\sqrt{\frac{0.64-0.44}{0.64+3}}=\sqrt{\frac{20}{364}}=\sqrt{\frac{5}{91}}$

(2)

$$J_{\mathrm{ST}}=A^{*}T^2e^{-\frac{q\varphi_{\mathrm{ns}}}{k_0T}}=114\times300^2\times e^{-\frac{0.67}{0.026}}=6.6\times10^{-5}\left(\mathrm{A/cm^2}\right)$$

8、Au-Si 结的掺杂浓度为 $N_{\mathrm{D}}=5\times10^{15}\mathrm{cm}^{-3}$，接触面积为 $A=5\times10^{-4}$ cm^2，$T=300K$。(a) 求出 $V_{\mathrm{R}}=4\mathrm{V}$ 时的结电容；(b) 如果掺杂浓度变为 N_{D}=5×10^{16}cm^{-3}，重复（a）。已知 ε_{r}(Si)=11.9。

解：(a) N_{D}=5×10^{15}cm^{-3} 时，设室温下杂质全部电离，则

$$n_0 = N_D = N_c \exp(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T})$$

所以 $$E_F = E_c + k_0 T \ln\frac{N_D}{N_c} = E_c + 0.026\ln\frac{5\times10^{15}}{2.8\times10^{19}} \approx E_c - 0.224(\text{eV})$$

$n-Si$的功函数为 $W_s = \chi + (E_c - E_F) = 4.05 + 0.224 = 4.254$

$$qV_D = -qV_s = W_m - W_s = 5.2 - 4.254 = 0.946(\text{eV})$$

$$C = \frac{dQ}{dV} = [\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 q N_D}{2(V_D - V)}]^{1/2} = [\frac{11.9\times8.854\times10^{-14}\times1.6\times10^{-19}\times5\times10^{15}}{2\times(0.946+4)}]^{1/2} = 9.23\times10^{-9}\,\text{F/cm}^2$$

（b）$N_D=5\times10^{16}\text{cm}^{-3}$时

$$E_F = E_c + k_0 T \ln\frac{N_D}{N_c} = E_c + 0.026\ln\frac{5\times10^{16}}{2.8\times10^{19}} \approx E_c - 0.165(\text{eV})$$

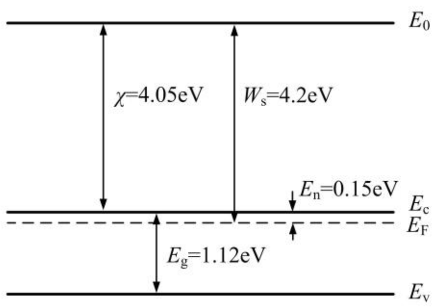
n-Si的功函数为 $W_s = \chi + (E_c - E_F) = 4.05 + 0.165 = 4.215$

$$qV_D = -qV_s = W_m - W_s = 5.2 - 4.215 = 0.985(\text{eV})$$

$$C = [\frac{\varepsilon_r\varepsilon_0 q N_D}{2(V_D - V)}]^{1/2} = [\frac{11.9\times8.854\times10^{-14}\times1.6\times10^{-19}\times5\times10^{16}}{2\times(0.985+4)}]^{1/2} = 2.91\times10^{-8}\,\text{F/cm}^2$$

9、功函数为$q\varphi_{ns} = 4.2\text{eV}$的金属沉积在 n 型硅半导体上，半导体的电子亲合能为 4.05eV，禁带宽度$E_g = 1.12\text{eV}$。假定不存在表面态的影响，T=300K。（a）当结中不存在耗尽区时，大致绘出零偏压时的能带图。 （b）计算满足步骤（a）中条件的 N_D 值。

解：（a）



由题意 $E_c - E_F = 0.15\text{eV}$，假定杂质全部电离

$$N_D = N_c \exp(-\frac{E_c - E_F}{k_0 T}) = 2.8\times10^{19}\exp(-\frac{0.15}{0.026}) = 8.74\times10^{16}\,\text{cm}^{-3}$$

测试题及参考解答

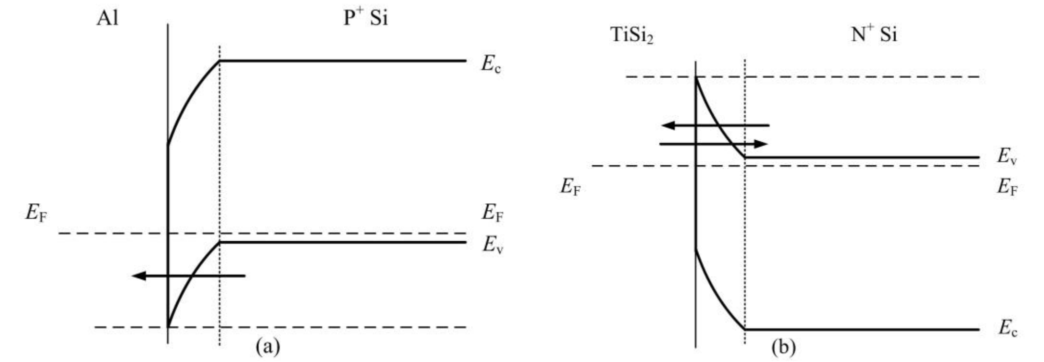
1. 画出下列各种情况的能带图，并说明对下列各种情况，重掺杂的半导体是否必要。

1）P^+-Si 和 Al 形成欧姆接触

2）N^+-Si 和 $TiSi_2$ 形成欧姆接触

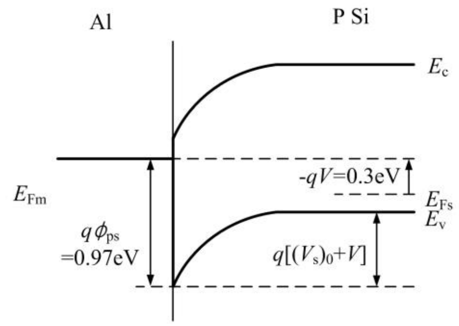
3）P-Si 和 Al 形成整流接触，加反向偏压 0.3V。

解：1）和 2）非常有必要重掺杂，主要利用隧道效应形成欧姆接触。



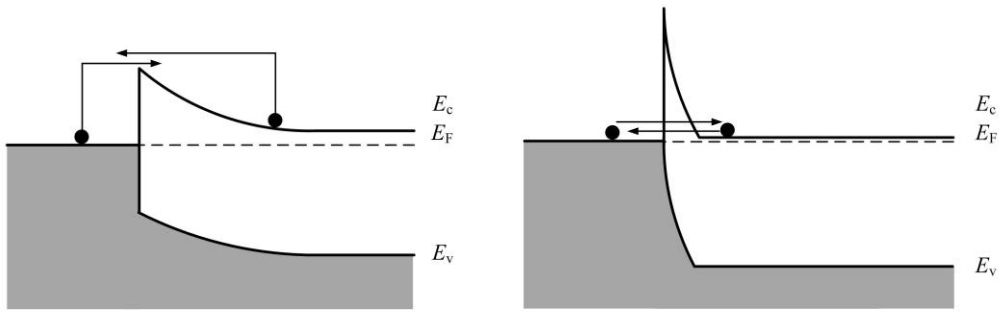
(a) (b)

3）不需要重掺杂



(c)

2. 如图所示为金属-半导体接触后的平衡能带图。



(a) (b)

1） 判断图 a(肖特基势垒)和图 b（欧姆接触）中半导体的掺杂浓度之间的关系并定性分析其原因。

2） 分别画出 a 和 b 两种掺杂情况下外加偏压下的对应的 I-V 特性。

答：

1、$N_a < N_b$

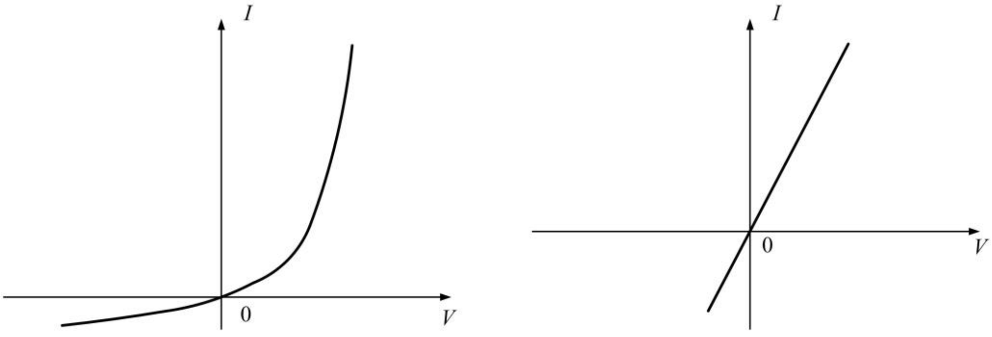
原因：

$\because x_d = \sqrt{\dfrac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_D - V)}{qN_D}}$

又$x_{d1} > x_{d2}$

$\Rightarrow N_a < N_b$

2、分别具有如下的 I-V 特性



(a) (b)

3. 1）金属和 n 型 Si 接触形成肖特基势垒，金属功函数为 4.8eV，Si 掺杂浓度为 $10^{16}cm^{-3}$。画出加 0.4V 正向偏压的能带图（包括真空能级），并在能带图上标明金属功函数W_m、肖特基势垒高度$q\phi_{ns}$、$q(V_D - V)$、χ_{Si}具体数值。

2）画出第一问中所描述器件的电荷ρ、电场E以及电势V分布图。每个图画两条曲线：平衡态以及正向偏压 0.4V 时两种情况。不需要标明具体数值，画出相对值即可。

解：1）对于掺杂浓度为 $10^{16}cm^{-3}$ 的 Si 半导体

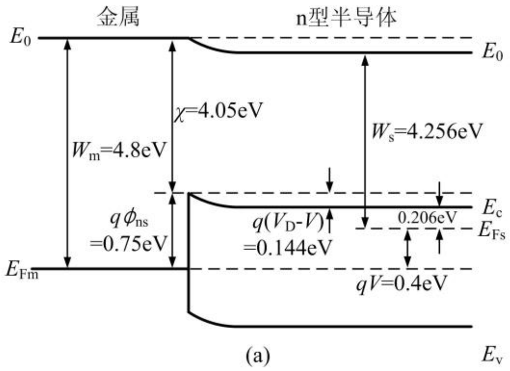
$$E_F = E_c + k_0T\ln\frac{N_D}{N_c} = E_c + 0.026\ln\frac{10^{16}}{2.8\times10^{19}} = E_c - 0.206(\text{eV})$$

$$\therefore \text{半导体功函数} W_s = \chi_{Si} + (E_c - E_F) = 4.05 + 0.206 = 4.256\text{eV}$$

$$\text{肖特基势垒高度} q\phi_{ns} = W_m - \chi_{Si} = 4.8 - 4.05 = 0.75\text{eV}$$

$$q(V_D - V) = qV_D - qV = W_m - W_s - qV = 4.8 - 4.256 - 0.4 = 0.144\text{eV}$$

能带图为



(a)

2）采用耗尽层近似

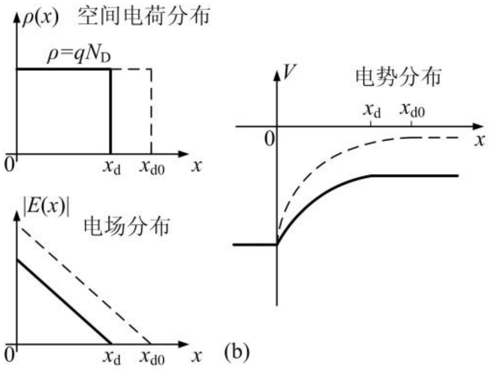
无外加电压时：

$$x_{d0}=[-\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0(V_s)_0}{qN_D}]^{1/2}=[\frac{2\varepsilon_r\varepsilon_0V_D}{qN_D}]^{1/2}$$

因为加的是正向偏压，$x_{d0}>x_d$

$$|E(x)|=\frac{qN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x-x_d)$$

$$V(x)=\frac{qN_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0}(x_dx-\frac{x^2}{2})-\varphi_{ns}$$



(b)

4. 设 p 型硅的掺杂浓度 $N_A=10^{17}/cm^3$,已知：W_{Ag} =4.18eV, W_{Pt}=5.36eV, $N_V=10^{19}/cm^3$，E_g=1.12eV，硅半导体的电子亲合能 χ=4.05eV,试求：

1)室温下费米能级 E_F 的位置和功函数 W_s;

2)不计表面态的影响，该 p 型硅半导体和 Pt、Ag 接触能否形成阻挡层？

3)若能形成阻挡层，求半导体一边势垒高度 qV_D。

解：

1) $p_0=N_A=N_v\exp(-\frac{E_F-E_v}{k_0T})$

$$\Rightarrow E_F-E_v=k_0T\ln\frac{N_v}{N_A}=0.026\times\ln\frac{10^{19}}{10^{17}}=0.12eV$$

$$W_s=\chi+E_c-E_F=\chi+E_g-(E_F-E_v)=4.05+1.12-0.12=5.05eV$$

2）对$\mathrm{Ag}: W_{\mathrm{m}} = 4.18eV < W_{\mathrm{s}}$　阻挡层

对$\mathrm{Pt}: W_{\mathrm{m}} = 5.36eV > W_{\mathrm{s}}$　反阻挡层

3） $qV_{\mathrm{D}} = W_{\mathrm{s}} - W_{\mathrm{m}} = 5.05 - 4.18 = 0.87\mathrm{eV}$

5. 理想情况下由 Cr 与 n 型硅半导体形成的肖特基二极管，T=300K。假定半导体均匀掺杂，N_D=5×10^{15}cm^{-3}。(W_{Cr}=4.54eV, χ=4.05eV，N_c=2.8×10^{19}cm^{-3})，求：

1）理想肖特基势垒高度

2）内建电势差 V_D

3）加 V_R=5V 反向偏压时的电场强度的峰值

4）加 V_R=5V 反向偏压电压时的单位面积结电容。

解：1） $E_{\mathrm{F}} = E_{\mathrm{c}} + k_0 T \ln \frac{N_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{c}}} = E_{\mathrm{c}} + 0.026 \ln \frac{5 \times 10^{15}}{2.8 \times 10^{19}} = E_{\mathrm{c}} - 0.224(\mathrm{eV})$

$\therefore$ 半导体功函数$W_{\mathrm{s}} = \chi_{\mathrm{Si}} + (E_{\mathrm{c}} - E_{\mathrm{F}}) = 4.05 + 0.224 = 4.274\mathrm{eV}$

肖特基势垒高度$q\phi_{\mathrm{ns}} = W_{\mathrm{m}} - \chi_{\mathrm{Si}} = 4.54 - 4.05 = 0.49\mathrm{eV}$

2）内建电势差为：$V_{\mathrm{D}} = \frac{W_{\mathrm{m}} - W_{\mathrm{s}}}{q} = \frac{4.54 - 4.274}{q} = 0.266\mathrm{V}$

3）电场强度为：$|E(x)| = \frac{qN_{\mathrm{D}}}{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0}(x - x_{\mathrm{d}})$

$$x_{\mathrm{d}} = \left\{ -\frac{2\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0[(V_{\mathrm{s}})_0 + V]}{qN_{\mathrm{D}}} \right\}^{1/2} = \left\{ \frac{2\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0[V_{\mathrm{D}} - V]}{qN_{\mathrm{D}}} \right\}^{1/2}$$

$$= [\frac{2 \times 11.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 5.266}{1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{15}}]^{1/2} = 1.17 \times 10^{-4}\,\mathrm{cm}$$

$$\therefore |E(x)|_{\max} = \frac{qN_{\mathrm{D}}x_{\mathrm{d}}}{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{15} \times 1.17 \times 10^{-4}}{11.9 \times 8.854 \times 10^{-14}} = 8.88 \times 10^4\,\mathrm{V/cm}$$

4）单位结面积电容为：

$$C = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}V} = \left[\frac{\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0 qN_{\mathrm{D}}}{2(V_{\mathrm{D}} - V)} \right]^{1/2}$$

$$= [\frac{11.9 \times 8.854 \times 10^{-14} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5 \times 10^{15}}{2 \times (0.266 + 5)}]^{1/2} = 8.95 \times 10^{-9}\,\mathrm{F/cm^2}$$

6. 有[100]晶向的 n 型 Si 和某一金属接触形成肖特基二极管，其相关参数为 W_m=4.7eV，χ$_{Si}$=4.05eV，N_c=2.8×10^{19}cm^{-3}，N_D=10^{15}cm^{-3}，$\varepsilon_{\mathrm{r}}(\mathrm{Si}) = 11.9$。忽略表面态，室温下：

1）计算零偏压下的势垒高度和接触电势差；

2）用高斯定理求零偏压下的势垒宽度；

3）计算正偏 0.3V 下的热发射电流密度。（有效理查逊常数取 240A/cm² K²）

解：1） $E_F = E_c + k_0T\ln\dfrac{N_D}{N_c} = E_c + 0.026\ln\dfrac{10^{15}}{2.8\times10^{19}} = E_c - 0.266(\text{eV})$

$\therefore$ 半导体功函数 $W_s = \chi_{Si} + (E_c - E_F) = 4.05 + 0.266 = 4.32\text{eV}$

半导体侧的势垒高度：$qV_D = W_m - W_s = 4.7 - 4.32 = 0.38\text{eV}$

肖特基势垒高度：$q\phi_{ns} = W_m - \chi = 4.7 - 4.05 = 0.65\text{eV}$

接触电势差：$V_D = 0.38\text{V}$

2）在 x 处作一高斯面，耗尽区由电离施主提供正电荷。

$$E(x) = -\frac{\sigma}{\varepsilon_r\varepsilon_0} = -\frac{qN_D(x_d - x)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}$$

$$V_s = \int_0^{x_d} E(x)dx = \int_0^{x_d}\frac{qN_D(x - x_d)}{\varepsilon_r\varepsilon_0}dx = \frac{qN_D}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}x^2\Big|_0^{x_d} - \frac{qN_D x_d}{\varepsilon_r\varepsilon_0}x\Big|_0^{x_d} = -\frac{qN_D}{2\varepsilon_r\varepsilon_0}x_d^2$$

$$\Rightarrow x_d = \sqrt{\frac{2|V_s|\varepsilon_r\varepsilon_0}{qN_D}} = \sqrt{\frac{2\times0.38\times11.9\times8.854\times10^{-14}}{1.6\times10^{-19}\times10^{15}}} = 7.07\times10^{-5}\text{cm}$$

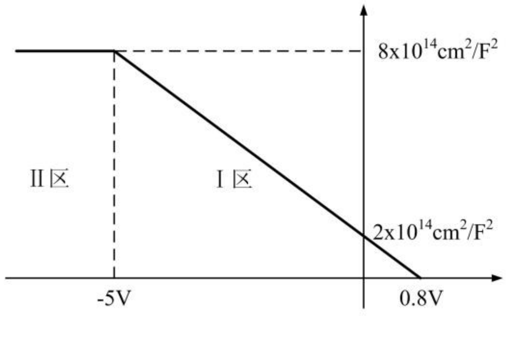
3) $$J\big|_{V=0.3} = A^*T^2\exp\left(-\frac{q\phi_{ns}}{k_0T}\right)[\exp(\frac{qV}{k_0T}) - 1]$$

$$= 240\times300^2\exp(-\frac{0.65}{0.026})[\exp(\frac{0.3}{0.026}) - 1] = 30.77\,\text{A/cm}^2$$

7. （111）面的 n 型 Si 与金属接触形成肖特基二极管。已知肖特基势垒高度 $q\phi_{ns}$ =0.78eV，计算室温下的反向饱和电流 J_{sT}。

解：$J_{ST} = A^*T^2\exp\left(-\dfrac{q\phi_{ns}}{k_0T}\right) = 240\times300^2\exp(-\dfrac{0.78}{0.026}) = 2.02\times^{-6}\,\text{A/cm}^2$

8. 一金属/n 型半导体形成的肖特基二极管具有如图所示的 C-V 特性。



1） 求 n 型半导体的掺杂浓度。
2） 求半导体侧内建电势差。

解：1）由$\dfrac{1}{C^2}=\dfrac{2}{\varepsilon_r\varepsilon_0 qN_D}(V_D-V)$

$$\Rightarrow \frac{2}{\varepsilon_r\varepsilon_0 qN_D}=\frac{6\times10^{14}}{5}$$

即$\dfrac{2}{11.9\times8.854\times10^{-14}\times1.6\times10^{-19}\times N_D}=\dfrac{6\times10^{14}}{5}$

求得N_D=9.89×10^{16} cm^{-3}

2）由 V=0 时的$1/C^2$可求得 V_D。

$$\frac{1}{C^2}=\frac{2V_D}{\varepsilon_r\varepsilon_0 qN_D}=2\times10^{14}$$

$$\begin{aligned}&\Rightarrow V_D=\frac{2\times10^{14}\varepsilon_r\varepsilon_0 qN_D}{2}\\&=10^{14}\varepsilon_r\varepsilon_0 qN_D\\&=10^{14}\times11.9\times8.854\times10^{-14}\times1.6\times10^{-19}\times9.89\times10^{16}\\&=1.67\text{V}\end{aligned}$$