第四章 金属-半导体结

一、简答题

1、 肖特基势垒具有单向导电性（即整流特性），试进行分析。

答：如果在半导体上相对于金属加一负电压 V，则半导体金属之间的电势差减少 φ_0－V，半导体中的电子能级相对金属的向上移动 qV，势垒高度则由 $q\varphi_0$ 变成 q（φ_0－V）。由于金属一侧的空间电荷层相对地很薄，ϕ_b 基本上保持不变，这种偏压方式称为正向偏压。半导体一边势垒的降低使得半导体中的电子更易于移向金属，能够流过大的电流。

相反地，如果半导体一侧相对于金属加上正电压 V_R，这便是反向偏压条件。在反向偏压条件下，半导体中的电子能级相对金属向下移动 qV_R。ϕ_b 同样基本上保持不变。半导体金属之间的电势差增加为 φ_0＋V_R。被提高的势垒阻挡电子由半导体向金属渡越，流过的电流很小。

以上分析说明肖特基势垒具有单向导电性，即整流特性。

2、 什么是肖特基二极管的界面态（表面态）？界面态（表面态）有哪些特点？

答：在实际的肖特基二极管中，在界面处，晶格的断裂产生大量能量状态，称为界面态或表面态，位于禁带内。

界面态通常按能量连续分布，并可用一中性能级 E_0 表征。如果被占据的界面态高达 E_0，而 E_0 以上空着，则这时的表面为电中性。当 E_0 以下的状态空着时，表面带正电，类似于施主的作用。当 E_0 以上的状态被占据时，表面带负电，类似于受主的作用。若 E_0 与费米能级对准，则净表面电荷为零。

在实际的 M-S 接触中，当 $E_0 > E_F$ 时，界面态的净电荷为正，类似于施主。这些正电荷和金属表面的负电荷所形成的电场在金属和半导体之间的微小间隙 δ 中产生电势差，所以耗尽层内需要较少的电离施主以达到平衡。结果使得内建电势差被显著降低，并且势垒高度也被降低。更小的 ϕ_b 使 E_F 更接近 E_0。与此类似，若 $E_0 < E_F$，则在界面态中有负电荷，并使 ϕ_b 增加，还是使 E_F 和 E_0 接近。因此，界面态的电荷具有负反馈效应，它趋向于使 E_F 和 E_0 接近。若界面态密度很大，则费米能级实际上被箝位在 E_0（称为费米能级钉扎效应），而变成与金属和半导体的功函数无关。

3、 什么是肖特基效应？解释肖特基效应的物理机制。

答：镜像力使理想肖特基势垒的电子能量下降，也就是使肖特基势垒高度下降，这种效

应称为肖特基效应。

物理机制：在半导体中，金属表面附近 x 处的电子会在金属上感应出正电荷。电子与感应正电荷之间的吸引力等于位于 x 处的电子和位于－x 处的等量正电荷之间的静电引力，这个正电荷称为镜像电荷，静电引力称为镜像力。这个镜像力会在距金属表面 x 处感应出电势能，对于肖特基势垒，这个势能将叠加到理想肖特基势垒能带图上，使原来的理想肖特基势垒的电子能量曲线在 x=0 处下降，也就是说，使肖特基势垒高度下降，这种现象称为肖特基势垒的镜像力降低，又称为肖特基效应。

4、 什么是欧姆接触？如何形成欧姆接触？对于金属-p 型半导体，什么情况下是欧姆接触？什么情况是整流结？如果是金属-n 型，什么情况下是欧姆接触？什么情况是整流结？

答：欧姆接触：定义为这样一种接触，所使用的结构不会添加较大的寄生阻抗，且不足以改变半导体内的平衡载流子浓度使器件特性受到影响。

实际上，不论 n 型还是 p 型半导体，由于在界面态上的电荷效应，理想的欧姆接触只能是种近似，在金属和半导体之间的直接接触一般不形成欧姆结。但如果半导体为重掺杂，那么金属半导体接触为欧姆接触。金属和重掺杂半导体之间形成欧姆接触的物理机制：载流子可以隧道穿透而不是越过势垒。

金属－n 型半导体：

$\varphi_m > \varphi_s$：整流结

$\varphi_m < \varphi_s$：欧姆结

金属－p 型半导体：

$\varphi_m > \varphi_s$：欧姆结

$\varphi_m < \varphi_s$：整流结

二、计算题

1、一个硅肖特基势垒二极管有 $0.01\ cm^2$ 的接触面积，半导体中施主浓度为 $10^{16}\ cm^{-3}$，设 $\varphi_0 = 0.7\ V$，$V_R = 10.3\ V$。计算：（1）耗尽层厚度；（2）势垒电容；（3）表面处的电场。（硅相对介电常数 $k = 11.9$，$\varepsilon_0 = 8.85\times10^{-14}$，$q = 1.6\times10^{-19}\ C$）。

解：（1）耗尽层厚度：

$$W = \left[\frac{2k\varepsilon_0(\varphi_0 + V_R)}{qN_d}\right]^{\frac{1}{2}} = \left[\frac{2\times11.9\times8.85\times10^{-14}(0.7+10.3)}{1.6\times10^{-19}\times10^{16}}\right]^{\frac{1}{2}} = 1.2\times10^{-4}\ (cm)$$

（2）势垒电容：

$$C=\frac{dQ}{dV_R}=\left[\frac{qk\varepsilon_0 N_d}{2(\varphi_0+V_R)}\right]^{\frac{1}{2}}A=0.01\times\left[\frac{1.6\times10^{-19}\times11.9\times8.85\times10^{-14}\times10^{16}}{2(0.7+10.3)}\right]^{\frac{1}{2}}$$

$$=8.75\times10^{-11}\,(F)$$

（3）表面处的电场：

$$\varepsilon=-\frac{qN_dW}{k\varepsilon_0}=-\frac{1.6\times10^{-19}\times10^{16}\times1.2\times10^{-4}}{11.9\times8.85\times10^{-14}}=-1.82\times10^{5}\,(V/cm)$$

2、已知肖特基二极管的下列参数：$\boldsymbol{\phi_m=5.0\,eV}$，$\boldsymbol{\chi_s=4.05\,eV}$，$\boldsymbol{N_c=10^{19}\,cm^{-3}}$，$\boldsymbol{N_d=10^{15}\,cm^{-3}}$。忽略界面态密度，室温下计算：（1）零偏时的势垒高度、内建电势差、耗尽层宽度；（2）$\boldsymbol{0.3\,V}$ 正偏时的热电子发射电流密度。（$\boldsymbol{V_T=0.026\,V}$，硅相对介电常数 $\boldsymbol{k=11.9}$，$\boldsymbol{\varepsilon_0=8.85\times10^{-14}}$，$\boldsymbol{q=1.6\times10^{-19}\,C}$，$\boldsymbol{R^*=120}$）。

解：（1）

$$q\varphi_b=q\phi_m-\chi_s=5.0-4.05=0.95\,(eV)$$

$$V_n=V_T ln\frac{N_c}{N_d}=0.026ln\frac{10^{19}}{10^{15}}=0.24\,(eV)$$

$$\varphi_0=\varphi_b-V_n=0.95-0.24=0.71\,(eV)$$

$$W=\left[\frac{2k\varepsilon_0(\varphi_0+V_R)}{qN_d}\right]^{\frac{1}{2}}=\left[\frac{2\times11.9\times8.85\times10^{-14}\times0.71}{1.6\times10^{-19}\times10^{15}}\right]^{\frac{1}{2}}=9.67\times10^{-5}\,(cm)$$

（2）

$$J=R^*T^2e^{-\varphi_b/V_T}\left(e^{V/V_T}-1\right)=120\times(300)^2\times e^{-0.95/0.026}\left(e^{0.3/0.026}-1\right)$$

$$=1.50\times10^{-4}\,(A/cm^2)$$

3、在一个金属-硅的接触中，势垒高度为 $\boldsymbol{q\phi_b=0.8\,eV}$，有效理查森常数为 $\boldsymbol{R^*=10^2\,A/(cm^2\cdot K^2)}$，$\boldsymbol{E_g=1.1\,eV}$，$\boldsymbol{N_d=10^{16}\,cm^{-3}}$，$\boldsymbol{N_c=N_v=10^{19}\,cm^{-3}}$。计算：（1）室温 300 K，零偏时半导体的体电势 $\boldsymbol{V_n}$ 和内建电势差；（2）假设 $\boldsymbol{D_p=15\,cm^2/s}$，$\boldsymbol{L_p=10\,\mu m}$，计算多数载流子电流对少数载流子电流的注入比。（$\boldsymbol{V_T=0.026\,V}$，$\boldsymbol{q=1.6\times10^{-19}\,C}$）。

解：（1）

$$V_n=V_T ln\frac{N_c}{N_d}=0.026ln\frac{10^{19}}{10^{16}}=0.18\,(eV)$$

$$\varphi_0=\varphi_b-V_n=0.8-0.18=0.62\,(eV)$$

（2）

$$J=R^*T^2e^{-\varphi_b/V_T}\left(e^{V/V_T}-1\right)$$

$$J_p=J_{p0}\left(e^{-V/V_T}-1\right)$$

所以：

$$\frac{J_0}{J_p}=\frac{R^*T^2e^{-\varphi_b/V_T}\left(e^{V/V_T}-1\right)}{J_{p0}(e^{-V/V_T}-1)}=\frac{R^*T^2e^{-\varphi_b/V_T}}{J_{p0}}=\frac{R^*T^2e^{-\varphi_b/V_T}}{\frac{qD_pN_vN_c}{N_dL_p}e^{-E_g/V_T}}$$

$$=\frac{100\times(300)^2e^{-0.8/0.026}}{\frac{1.6\times10^{-19}\times15\times10^{19}\times10^{19}}{10^{16}\times10\times10^{-4}}e^{-1.1/0.026}}=3.85\times10^4$$