# 物理工学専攻院試解答集
# 2019 年度物理学 II 第 4 問

政岡凜太郎

## [1.1] 化学ポテンシャルと電荷移動

内部エネルギーを $U(S,V,N)$ とすると化学ポテンシャルは

$$dU = T\,dS - p\,dV + \mu\,dN, \qquad \mu = \left(\frac{\partial U}{\partial N}\right)_{S,V} \tag{1}$$

で定義される。孤立した M の電子化学ポテンシャルは $-W$、S では $-\phi_s$ である。接続すると電子は化学ポテンシャルの高い側から低い側へ移り、平衡では静電エネルギーを含む電気化学ポテンシャルが両側で一致する。$W > \phi_s$ なら S から M へ移って M 側が負、S 側が正になり、逆の大小関係なら電荷の向きは反転する。[1] では両方を含む電荷量の大きさを求める。

## [1.2] 誘起表面電荷

面積 $A$ の平行板容量は $C = \varepsilon_0 A/d$ である。S 側の符号付き電荷を $q$ と置く（$q > 0$ なら電子は S から M へ移る）。静電エネルギーは

$$U_{\mathrm{es}} = \frac{q^2}{2C} = \frac{dq^2}{2\varepsilon_0 A}. \tag{2}$$

電子が移ることで化学自由エネルギーは $-(W-\phi_s)q/e$ だけ変化する。従って全エネルギー

$$U(q) = \frac{dq^2}{2\varepsilon_0 A} - \frac{W-\phi_s}{e}q \tag{3}$$

を最小にする条件 $\partial U/\partial q = 0$ から、S 側の符号付き面電荷密度は $q/A = \varepsilon_0(W-\phi_s)/(ed)$ である。求める大きさは

$$\boxed{\rho = \frac{\varepsilon_0}{ed}|W-\phi_s|}. \tag{4}$$

ここでは $\rho$ を大きさとして用いた。原問の $M$ 側 $-\rho$、$S$ 側 $+\rho$ という記号を符号付き密度と読めば、$W < \phi_s$ のとき $\rho$ の符号が反転する。

## [1.3] 板間の引力

一方の板が作る電場は $\rho/(2\varepsilon_0)$ である。もう一方の板に働く圧力は $\rho$ とこの電場の積だから

$$F = A\frac{\rho^2}{2\varepsilon_0} = \boxed{\frac{\varepsilon_0 A}{2e^2d^2}|W-\phi_s|^2}. \tag{5}$$

圧力の次元は $\mathrm{N/m^2}$ で、面積を掛けると力になる。

## [1.4] 振動する間隔と電流

瞬時の平衡電荷密度は

$$\frac{q(t)}{A} = \frac{\varepsilon_0(W-\phi_s)}{e[d+\delta\sin(\Omega t)]} \simeq \frac{\varepsilon_0(W-\phi_s)}{ed}\left[1-\frac{\delta}{d}\sin(\Omega t)\right] \tag{6}$$

である。符号付き電荷の時間変化から $I(t) = dq/dt$ となり、振幅は

$$\boxed{I_0 = \frac{\varepsilon_0 A\delta\Omega}{ed^2}|W-\phi_s|}. \tag{7}$$

ここでは $\delta/d$ の一次まで残した。

## [2.1] 半導体側のバンド曲がり

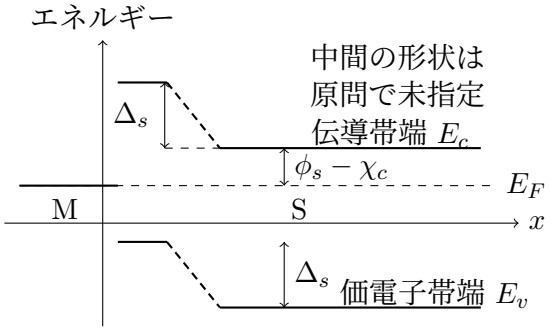
金属側の静電ポテンシャルを $\Phi_M$、半導体の十分内部のものを $\Phi_S$ とし、同じ基準から測る。電子の静電エネルギーは $-e\Phi$ なので、平衡での電気化学ポテンシャルの一致は

$$-W - e\Phi_M = -\phi_s - e\Phi_S, \qquad e(\Phi_S - \Phi_M) = W - \phi_s. \tag{8}$$

界面固有の状態による追加のエネルギー変化を無視する原問の理想接合では、伝導帯端も静電エネルギーだけシフトする。従って界面と十分内部との伝導帯端の差は

$$\boxed{\Delta_s = -e(\Phi_M - \Phi_S) = W - \phi_s}. \tag{9}$$

これは半導体内部から界面までの伝導帯端の上昇である。$E_F$ から界面伝導帯端までの障壁は $\Delta_s + (\phi_s - \chi_c) = W - \chi_c$。図ではこの二つの差を分けて示し、同じ静電シフトを価電子帯端にも適用した。図の縦横の長さは縮尺を表さず、異なるエネルギー差の大小比較には用いない。破線は端点を結ぶ案内で、空乏領域内の詳細な電位分布は原問で定まらない。




## [2.2] 熱活性化と整流性

半導体内部のフェルミ準位は伝導帯端より $\phi_s - \chi_c > 0$ だけ低い。伝導帯内の状態のエネルギーを $E$、フェルミ準位を $E_F$ とすると、非縮退近似でその状態の占有因子は $\exp[-(E-E_F)/(k_BT)]$ である。界面では伝導帯端が $\Delta_s$ だけ高くなるため、十分内部と同じ伝導帯端からのエネルギーを持つ状態同士の占有因子の比は

$$\frac{\exp[-(E+\Delta_s-E_F)/(k_BT)]}{\exp[-(E-E_F)/(k_BT)]} = \exp\left(-\frac{\Delta_s}{k_BT}\right). \tag{10}$$

従って平衡での界面近傍の伝導電子は少なく、半導体から金属への電子の供給は熱活性化によって抑えられる。

平衡をゼロとする外部からの印加電圧を $V = V_M - V_S$ とする。印加電圧が主に空乏層にかかる近似では、静電ポテンシャル差 $\Phi_M - \Phi_S$ は平衡値から $V$ だけ変化する。電子の静電エネルギーは $-e\Phi$ なので、

$$\Delta_s(V) = \Delta_s(0) - eV. \tag{11}$$

以下では半導体内部の温度と電子密度を一定とし、障壁を越える熱放出が電流を支配する範囲を考える。障壁が残り、界面を通過する割合の電圧依存を無視できるとき、S から M への電子流は平衡時に比べて

$$\frac{\exp[-\Delta_s(V)/(k_BT)]}{\exp[-\Delta_s(0)/(k_BT)]} = \exp\left(\frac{eV}{k_BT}\right) \tag{12}$$

倍となる。一方、M のフェルミ準位と界面の伝導帯端はともに $-e\Phi_M$ だけ動くため、その間の障壁 $W - \chi_c$ は変わらず、M から S への電子流はほぼ一定である。

平衡では両向きの電子流が釣り合う。M を正にすると S から M への流れが増え、その差として正味の電子流が S から M へ生じる。M を負にすると S から M への流れが抑えられ、ほぼ一定の M から S への流れが残る。この非対称な電圧依存によって整流性が生じ、順方向の通常の電流は電子流と逆の M から S へ流れる。