

半導体工学(10)

金属と半導体の接合

レポート課題

- 来週授業開始時に回収する
- 教科書p.57演習問題4において下記の変更を行ったものを課題とする。
 - アクセプタ密度 $N_A = 1.5 \times 10^{22} [m^{-3}]$
 - ドナー密度 $N_D = 1 \times 10^{20} [m^{-3}]$
 - 電子の移動度 $\mu_n = 0.1 [m^2/V \cdot s]$
 - 正孔の移動度 $\mu_p = 0.04 [m^2/V \cdot s]$

演習問題4・1回答

- エネルギー帯図を描くには、まずはじめに、
 - 不純物密度 \Rightarrow キャリア密度とフェルミ準位導出

$$n_i \approx 1.5 \times 10^{16} [m^{-3}] \quad k_B T = 0.0258 [eV]$$

N型	P型
$n \approx N_D \quad (3 \cdot 19) \quad p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (3 \cdot 20)$ $E_F = E_i + k_B T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) \quad (3 \cdot 21)$	$p \approx N_A \quad (3 \cdot 24) \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_A} \quad (3 \cdot 25)$ $E_F = E_i - k_B T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) \quad (3 \cdot 26)$

- $N_A = 1.5 \times 10^{22} [m^{-3}]$, $N_D = 1 \times 10^{20} [m^{-3}]$ を代入して

- N型領域では

$$E_{Fn} = E_i + k_B T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = E_i + 0.0258 \ln \left(\frac{1 \times 10^{20}}{1.5 \times 10^{16}} \right) = E_i + 0.23$$

- P型領域では

$$E_{Fp} = E_i - k_B T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = E_i - 0.0258 \ln \left(\frac{1.5 \times 10^{22}}{1.5 \times 10^{16}} \right) = E_i - 0.36$$

演習問題4・1,2回答

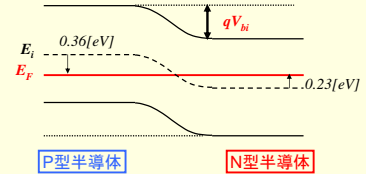
- エネルギーバンド図は

$$E_{Fn} = E_i + k_B T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = E_i + 0.0258 \ln \left(\frac{1 \times 10^{20}}{1.5 \times 10^{16}} \right) = E_i + 0.227 [eV]$$

$$E_{Fp} = E_i - k_B T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) = E_i - 0.0258 \ln \left(\frac{1.5 \times 10^{22}}{1.5 \times 10^{16}} \right) = E_i - 0.356 [eV]$$

- qV_{bi} は $0.227 + 0.356 = 0.583 [eV]$ なので V_{bi} は $0.58 [V]$ または

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) = \frac{0.0258 \ln \left(\frac{1.5 \times 10^{22} \times 1 \times 10^{20}}{(1.5 \times 10^{16})^2} \right)}{1} = 0.58 [V]$$



演習問題4・2回答

- 空乏層幅は

自身の不純物密度が分母、相手方の不純物密度が分子(不純物密度が小さいほど空乏層幅は大きい)

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{bi}}{q N_A} \frac{N_D}{N_A + N_D}} \quad (4 \cdot 26) \quad x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{bi}}{q N_D} \frac{N_A}{N_A + N_D}} \quad (4 \cdot 27)$$

- $N_A = 1.5 \times 10^{22} [m^{-3}]$, $N_D = 1 \times 10^{20} [m^{-3}]$ を代入して

- P型領域では

$$x_p = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.58}{1.6 \times 10^{-19} \times 1.5 \times 10^{22}} \times \frac{1 \times 10^{20}}{1.5 \times 10^{22} + 1 \times 10^{20}}} = 1.83 \times 10^{-8} [m]$$

0.0183 [μm]

- N型領域では

$$x_n = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 0.58}{1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{20}} \times \frac{1.5 \times 10^{22}}{1.5 \times 10^{22} + 1 \times 10^{20}}} = 2.74 \times 10^{-6} [m]$$

2.74 [μm]

- 両方の空乏層合計は

$$x_{dep} = x_p + x_n = 1.83 \times 10^{-8} + 2.74 \times 10^{-6} = 4.76 \times 10^{-6} [m] \quad \underline{2.76 [μm]}$$

$N_A x_p = N_D x_n$ (4・23)が成り立つので検算できる
 $150 \times x_p = 150 \times 0.0183 = 2.745 \approx x_n$

演習問題4・2回答

- 最大電界強度 E_{max} は

$$E_{max} = -\frac{q N_A}{\epsilon} x_p = -\frac{q N_D}{\epsilon} x_n \quad (4 \cdot 22)$$

$$\therefore E_{max} = -\frac{q N_D}{\epsilon} x_p = -\frac{1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{20}}{11.8 \times 8.854 \times 10^{-12}} \times 2.74 \times 10^{-6} = -4.20 \times 10^5 [V/m]$$

- 単位面積あたりの空乏層容量 C_{dep} は

$$C_{dep} = \frac{\epsilon}{x_{dep}} \quad (4 \cdot 31)$$

$$x_{dep} = 2.76 \times 10^{-6} [m] \text{ を代入して}$$

$$C_{dep} = \frac{11.8 \times 8.854 \times 10^{-12}}{2.76 \times 10^{-6}} = 3.79 \times 10^{-5} [F/m^2] \quad \underline{37.9 [μF/m^2]}$$

演習問題4・3回答

■ 空乏層幅 x_{dep} は

$$x_{dep} = x_p + x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{bi}}{qN_A} \frac{N_D}{N_A + N_D}} + \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{bi}}{qN_D} \frac{N_A}{N_A + N_D}}$$

$$= \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{bi}}{qN_A N_D (N_A + N_D)}} \times (N_A + N_D) = \sqrt{\frac{2\epsilon \cdot V_{bi}}{q} \frac{N_A + N_D}{N_A N_D}}$$

$V_{bi} (= V_{bi} + V_D) = 0.58 + 2 = 2.58 [V]$ を代入して

$$x_{dep} = \sqrt{\frac{2 \times 11.8 \times 8.854 \times 10^{-12} \times 2.58}{1.6 \times 10^{-19}} \times \frac{1.5 \times 10^{22} + 1 \times 10^{20}}{1.5 \times 10^{22} \times 1 \times 10^{20}}} = 5.82 \times 10^{-6} [m]$$

$5.82 [\mu m]$

バイアスなしの時の空乏層幅 $x_{dep} = 4.76 \times 10^{-6} [m]$ から求めることもできる

$$x_{dep}(V_D = 2V) = \frac{\sqrt{2.58}}{\sqrt{0.58}} \times x_{dep}(V_D = 0V) = 2.11 \times 2.76 \times 10^{-6} = 5.82 \times 10^{-6} [m]$$

■ 単位面積あたりの空乏層容量 C_{dep} は

$$C_{dep} = \frac{\epsilon}{x_{dep}} = \frac{11.8 \times 8.854 \times 10^{-12}}{5.82 \times 10^{-6}} = 1.80 \times 10^{-5} [F/m^2] \quad 18.0 [\mu F/m^2]$$

7

演習問題4・4回答

■ PN接合電流 J_D は

$$J_D = q \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} = J_S \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$$

$$p \approx \frac{n_i^2}{N_D} \quad (3 \cdot 20) \quad n \approx \frac{n_i^2}{N_A} \quad (3 \cdot 25)$$

$$D_n = \frac{k_B}{q} \cdot \mu_n \cdot T \quad (3 \cdot 38) \quad D_p = \frac{k_B}{q} \cdot \mu_p \cdot T \quad (3 \cdot 39)$$

アインシュタインの関係

$$p_{n0} \approx \frac{(1.5 \times 10^{16})^2}{1.0 \times 10^{20}} = 2.25 \times 10^{12} \quad n_{p0} \approx \frac{(1.5 \times 10^{16})^2}{1.5 \times 10^{22}} = 1.5 \times 10^{10}$$

$$D_n = 0.0258 \times \mu_n = 2.58 \times 10^{-3} \quad D_p = 0.0258 \times \mu_p = 1.03 \times 10^{-3}$$

$$L_n = \sqrt{D_n \tau} = \sqrt{2.58 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-4}} = 5.08 \times 10^{-4}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau} = \sqrt{1.03 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-4}} = 3.21 \times 10^{-4}$$

$$J_S = q \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p} \right)$$

$$= 1.6 \times 10^{-19} \times \left(\frac{2.58 \times 10^{-3}}{5.08 \times 10^{-4}} \times 1.5 \times 10^{10} + \frac{1.03 \times 10^{-3}}{3.21 \times 10^{-4}} \times 2.25 \times 10^{12} \right) = 1.17 \times 10^{-6} \quad 1.17 [\mu A/m^2]$$

8

演習問題4・5回答

■ PN接合電流 J_D は演習問題4・4の結果より

$$J_D = J_S \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \quad J_S = 1.17 [\mu A/m^2]$$

$$I_D = J_S \times S = 1.17 \times 10^{-14} \times \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$$

上式を計算すると右表の通りとなる

VD(V)	ID(A)
-5	-1.17E-14
-4	-1.17E-14
-3	-1.17E-14
-2	-1.17E-14
-1	-1.17E-14
0	0.00E+00
0	0.00E+00
0.2	2.72E-11
0.4	6.33E-08
0.6	1.47E-04
0.8	3.43E-01
1	7.97E+02

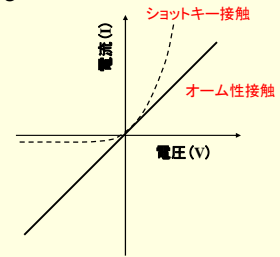
9

金属と半導体の接触特性

■ 金属と半導体を接触させたときに、2種類の特性がある

- ショットキー接触: 整流性を示す
- オーム性接触: 電流-電圧特性が直線

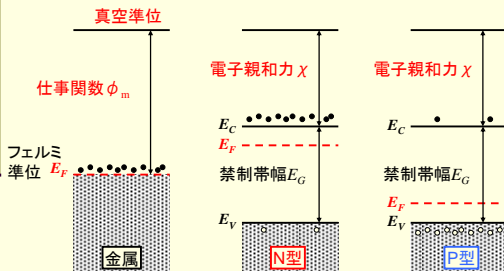
■ 上記のどちらの特性になるかは、金属と半導体の組み合わせによって決定される



10

真空準位からのエネルギー

- 金属から伝導電子を外部に取り出すために必要な最小のエネルギーを仕事関数 ϕ_m と呼ぶ
- 仕事関数は真空準位と金属のフェルミ準位の差に等しい
- 真空準位と伝導帯のエネルギー差を電子親和力 χ (カイ) と呼ぶ

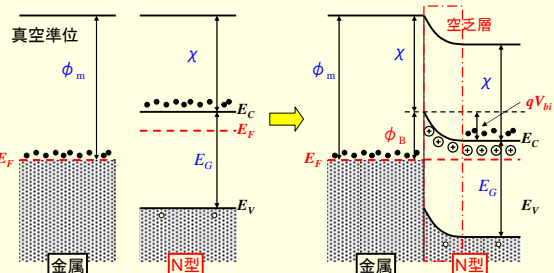


11

N型半導体と金属との接触(1)

■ $\phi_m > \chi$ の関係をもつ金属とN型半導体を接触する

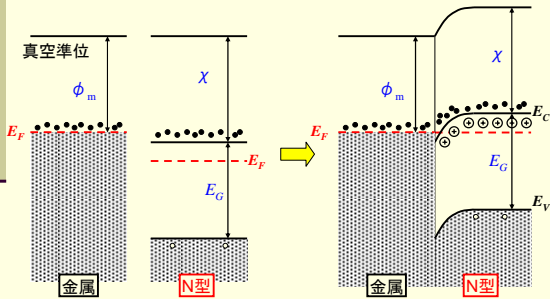
- 半導体から金属に電子が移動しイオン化したドナーが残った空乏層ができる
- 半導体空乏層に生じる電位差 V_b をビルトイン電圧 (PN接合同じ)
- 金属のフェルミ準位と接触面の伝導帯の底のエネルギー差 ϕ_B を障壁の高さ (バリアハイト) と呼ぶこのとき $\phi_B = \phi_m - \chi$ である



12

N型半導体と金属との接触(2)

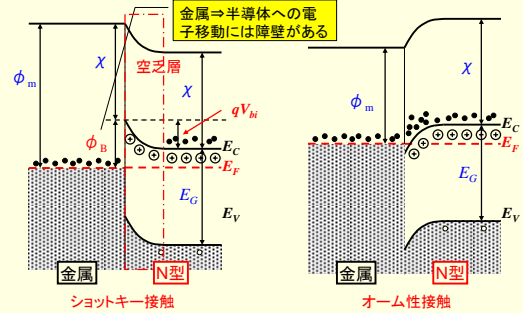
- $\phi_m < \chi$ の関係をもつ金属とN型半導体を接触する
 - 金属から半導体に電子が移動するが空乏層は形成されない



13

N型半導体と金属との接触(3)

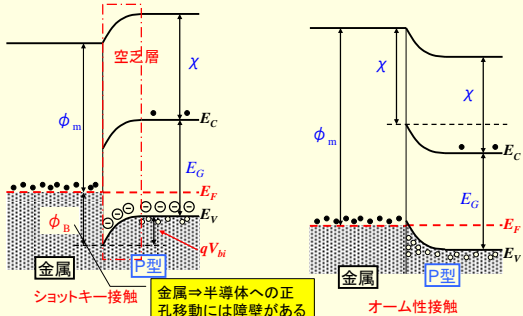
- 金属とN型半導体を接触した場合
 - $\phi_m > \chi$: ショットキー接触 $\Rightarrow \phi_B$ (障壁高さ) = $\phi_m - \chi$
 - $\phi_m < \chi$: オーム性接触



14

P型半導体と金属との接触

- 金属とP型半導体を接触した場合
 - $\phi_m < \chi + E_G$: ショットキー接触 $\Rightarrow \phi_B$ (障壁高さ) = $\chi + E_G - \phi_m$
 - $\phi_m > \chi + E_G$: オーム性接触



15

金属-半導体の接合分類:例題

- Siの電子親和力 $\chi = 4.05\text{eV}$, 禁制帯幅 $E_G = 1.11\text{eV}$
 - $\chi + E_G = 5.16\text{eV}$
- 例題1: 以下の金属とN型およびP型Siの接触がオーム性かショットキー性のどちらになるかを記入しなさい。
- 例題2: AuとN型Si($E_F = E_C - 0.15\text{V}$)およびP型Si($E_F = E_V + 0.15\text{V}$)の接合におけるエネルギーバンド図を描きなさい。

金属	仕事関数 ϕ_m	N型Si	P型Si
Au	4.80eV		
Pt	6.30eV		
Cu	4.18eV		
Ni	4.01eV		

16

金属-半導体の接合分類例題1回答

- Siの電子親和力 $\chi = 4.05\text{eV}$, 禁制帯幅 $E_G = 1.11\text{eV}$
 - $\chi + E_G = 5.16\text{eV}$
- 例題1: 以下の金属とN型およびP型Siの接触がオーム性かショットキー性のどちらになるかを記入しなさい

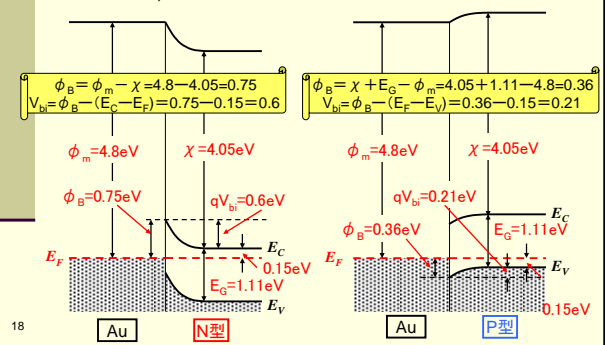
金属	仕事関数 ϕ_m	N型Si	P型Si
Au	4.80eV	ショットキー	ショットキー
Pt	6.30eV	ショットキー	オーム
Cu	4.18eV	ショットキー	ショットキー
Ni	4.01eV	オーム	ショットキー

ϕ_m が4.05eVより小さいときN型にはオーム性
 ϕ_m が5.16eVより大きいときP型にはオーム性
 $\Rightarrow 4.05\text{eV} < \phi_m < 5.16\text{eV}$ はN,Pともにショットキー

17

金属-半導体の接合分類例題2回答

- 例題2: AuとN型Si($E_F = E_C - 0.15\text{V}$)およびP型Si($E_F = E_V + 0.15\text{V}$)の接合におけるエネルギーバンド図を描きなさい

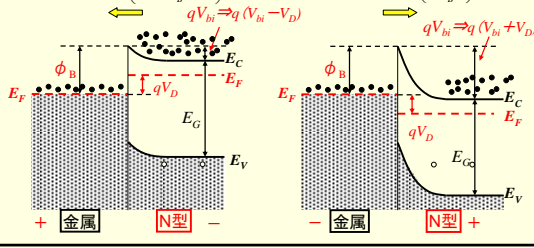


18

金属-半導体ショットキー接合の電流特性(1)

- 順方向電圧 V_D を印加: ビルトイン電圧 $V_{bi} \Rightarrow V_{bi} - V_D$
 - N型シリコンから金属への障壁が低くなるので電流が増加
- 逆方向電圧 V_D を印加: ビルトイン電圧 $V_{bi} \Rightarrow V_{bi} + V_D$
 - 金属からN型シリコンへの障壁 ϕ_B は一定なので電流は増加しない

$$Q_{SM} = K_1 \exp\left(-\frac{q(V_{bi} - V_D)}{k_B T}\right) \quad (5.1) \quad Q_{MS} = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{k_B T}\right) \quad (5.2)$$



19

金属-半導体ショットキー接合の電流特性(2)

- 順方向電圧 V_D を印加時の電流を J とすると

$$J = q(Q_{SM} - Q_{MS}) = q \left\{ K_1 \exp\left(-\frac{q(V_{bi} - V_D)}{k_B T}\right) - K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{k_B T}\right) \right\} \quad (5.3)$$

- $V_D = 0V$ の時 $J=0$ なので

$$K_1 \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right) = K_2 \exp\left(-\frac{\phi_B}{k_B T}\right)$$

- (5.3)式に代入して

$$J = q(Q_{SM} - Q_{MS}) = q \left\{ K_1 \exp\left(-\frac{q(V_{bi} - V_D)}{k_B T}\right) - K_1 \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right) \right\}$$

$$= qK_1 \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} = J_0 \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \quad (5.4)$$

PN接合電流の下式とまったく同じ式

$$J_D = J_S \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \quad (4.17)$$

PN接合: 多数キャリアが少数キャリアとして、注入されるときに**拡散・再結合**が電流を決定
 金属-半導体接合: エネルギー障壁 $V_{bi} - V_D$ を越える電子の数が電流を決定
 ⇒ 少数キャリアの蓄積効果は起こらない

20

金属-半導体ショットキー接合の容量特性(1)

- N型Siと金属のショットキー結合をポアソンの方程式を使って解く

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho}{\epsilon} \quad (5.13) \quad \text{ポアソンの方程式}$$

$$\rho(x) = qN_D \quad [0 < x < x_n]$$

境界条件 $E(x=x_n) = 0 \quad V(x=0) = 0$

$$E = -\frac{dV}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon}(x-x_n) \quad [0 < x < x_n] \quad (5.14)$$

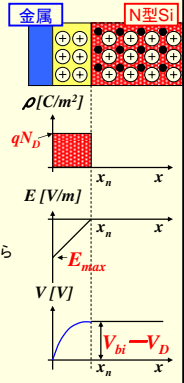
$$V = -\frac{qN_D}{2\epsilon}x(x-2x_n) \quad [0 < x < x_n] \quad (5.15)$$

- 空乏層の幅 x_n を V_D の式で表す

$x=x_n$ において $V = V_{bi} - V_D$ となる (V_D は順方向電圧が正) から

$$V_{bi} - V_D = V(x=x_n) = \frac{qN_D}{2\epsilon}x_n^2$$

$$\therefore x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V_D)}{qN_D}} \quad (5.16)$$



21

金属-半導体ショットキー接合の容量特性(2)

- 空乏層容量の外部印加電圧 V_D 特性を導く

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V_D)}{qN_D}} \quad (5.16)$$

PN接合の式で $NA = \infty$ とおいたときと同じ

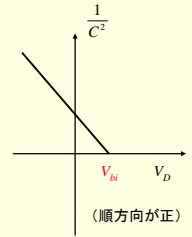
$$x_{dep} = \sqrt{\frac{2\epsilon(N_A + N_D)}{qN_A N_D}(V_{bi} - V_D)} \quad (4.29)$$

空乏層の電荷 $Q = qN_D x_n = qN_D \sqrt{\frac{2\epsilon(V_{bi} - V_D)}{qN_D}} = \sqrt{2q\epsilon N_D(V_{bi} - V_D)} \quad (5.17)$

空乏層容量 $C = \frac{dQ}{d(V_{bi} - V_D)} = \frac{q\epsilon N_D}{\sqrt{2(V_{bi} - V_D)}} = \frac{\epsilon}{x_n} \quad (5.18)$

式を変形すると

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V_D)}{q\epsilon N_D} \quad (5.19)$$



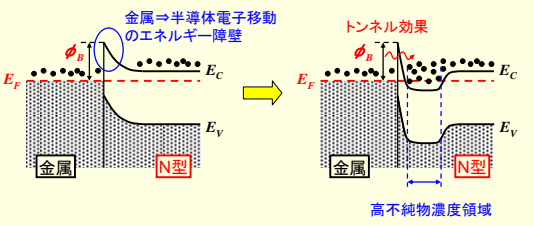
PN接合の式で $NA = \infty$ とおいたときと同じ

$$\frac{1}{C_{dep}^2} = \frac{2}{q\epsilon} \frac{N_A + N_D}{N_D N_A} (V_{bi} - V) \quad (4.32)$$

22

オーミック接触の実現法

- オーミック接触を形成するためには
 - N型: $\phi_m < \chi$
 - P型: $\phi_m > \chi + E_G$
 単一の金属に対して、P, N両方の半導体にオーミック接触を形成できない
- 半導体表面に**高不純物濃度領域**を設けることにより、空乏層をきわめて薄くして、**トンネル効果**でオーミック接合を実現する。



23