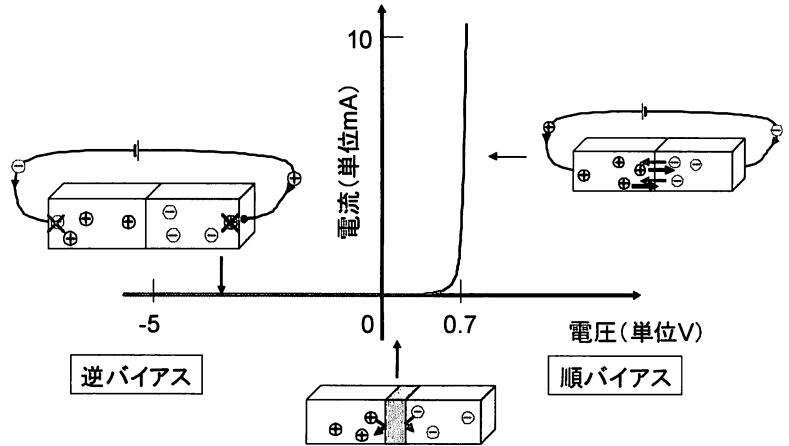


1. 右図の特性を、電圧 0.73 V で 10 mA の電流が流れると読んだとしよう。この特性を式(1)

$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{k_b T}} - 1 \right)$$

に当てはめたとき、逆方向飽和電流 I_0 の値はいくらになるか。室温と考え、 $k_B T = 0.026 \text{ eV}$ とすること。



電圧が低いのでこのままテスト問題には使いません。
 問題としては高校数学で $e^{\frac{eV}{k_B T}}$ に値を代入します。指数部分を単位 eV で考えます $\frac{eV}{k_B T} = \frac{0.73 \text{ eV}}{0.026 \text{ eV}} = 28$ で e の 28 乗ですが e = 2.718 は $\sqrt{10}$ よりやや小さいので e^{28} は 10^4 より少し小さくなります。
 $1 \times 10^{-2} \text{ A} = I_0 \times (1.4 \times 10^2 - 1)$ より $I_0 = 6 \times 10^{-15} \text{ A}$

答 $I_0 = 6 \times 10^{-15} \text{ A}$

2. 逆方向飽和電流は、前問で求めた値よりは大きな電流となることが多い。(例: 1 nA) これは、ダイオードの理想係数 n を用いた次の式である程度説明できる。

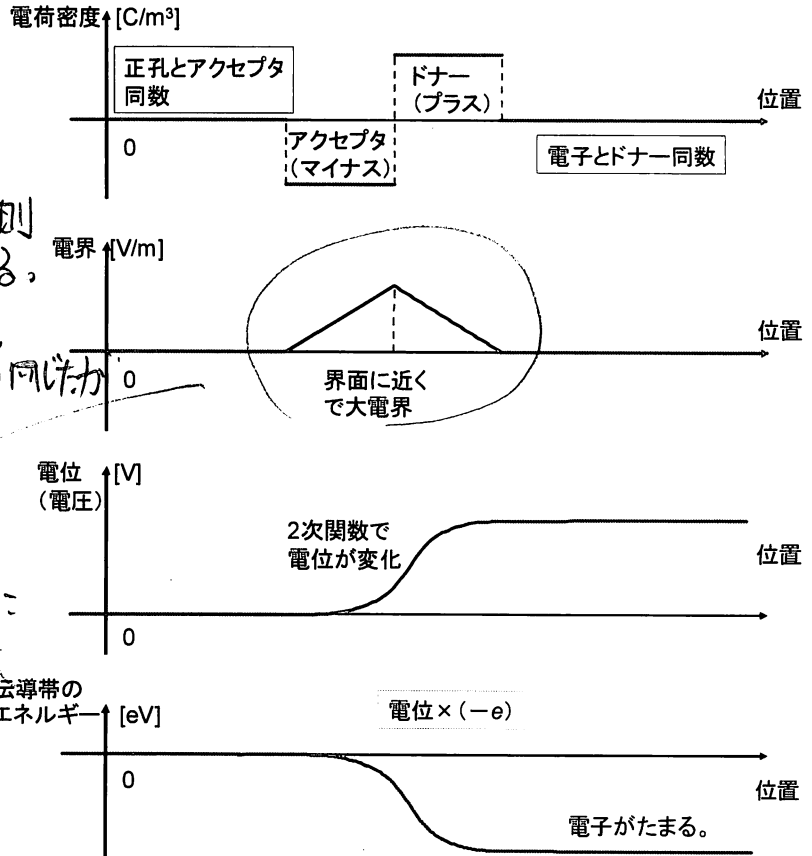
$$I = I_0 \left(e^{\frac{eV}{nk_B T}} - 1 \right) \quad (2)$$

なお、 n も単位のない量であり、理想的なダイオードでは 1 となるが、実際には、1~2 程度の値となる。このダイオードの特性を、電圧 0.73 V で 10 mA、電圧 0.63 V で 1 mA と読むと、未定係数である I_0 と n の 2 つが方程式より決定できるはずである。この場合の、 I_0 と n の値はいくらになるか。

n が入る分 e の $\frac{28}{n}$ 乗を計算します。×. 2 つデータがあって連立方程式になります。
 $10 \times 10^{-3} \text{ [A]} = I_0 e^{\frac{0.73 \text{ [eV]}}{0.026 n \text{ [eV]}}} \quad (1)$
 $1 \times 10^{-3} \text{ [A]} = I_0 e^{\frac{0.63 \text{ [eV]}}{0.026 n \text{ [eV]}}} \quad (2)$
 $(1) \div (2)$ より $10 = e^{\frac{0.1}{0.026 n}}$, $\frac{0.1}{0.026 n} = \log_e 10$, $n = \frac{0.1}{0.026 \times \log_e 10} = 1.67$
 (1) に代入して $10^{-2} \text{ [A]} = I_0 e^{\frac{28}{1.67}}$

答 $I_0 = 5 \times 10^{-10} \text{ A}$
 $n = 1.67$

3. 右図の電荷分布で、ドナーの密度がアクセプタ密度の100倍と大きい場合に、電位の変化の様子がどのように変化するか述べなさい。



① ドナーが多く界面の右側の傾きが100倍になる。
 ② 電位差(電界の積分、この面積)同じか

電界 ↑
 ②
 ①
 ほとんどの電界がp側の側にくるため空乏層のp側側と最大電界も約√2倍

電位 ↑ [V]
 下に凸
 ほとんど同じ

4. 逆バイアスを加えた場合に空乏層幅が増大するのはなぜか。

空乏層による電位差がバイアスなしのときの拡散電位/eより逆バイアス分大きくなり、より大きな電圧も発生させるコンタクトが必要となる。

5. バイアス印加時に、フェルミレベルの変化が空乏層以外の部分にもあるするとどのような問題があるか。

フェルミレベルの濃度(伝導帯純物濃度に近い)で定まる値でないとするとその部分はキャリアが多か少ないかで電位的に中性でないと考えるべきで、中性領域と全くキャリアのない空乏層からなるのモデルを使用するのであれば、キャリア密度が減少している部分が全部空乏層と考えるしかない。

6. n形半導体においてドナー密度が比較的小さい ($N_D \ll N_C$ の) とき、ほとんどすべてのドナーがイオン化するため、次式

$$n(E) = N_C e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$$

のキャリア密度は N_D に一致する。このことを利用して、 N_D が $1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ 、 $1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ および $1 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ のシリコンの場合について、伝導帯の下端からフェルミレベルまでのエネルギーを計算しなさい。

E とは伝導帯のいちばん低いエネルギーを入けると $n(E)$ は電子数を与える。
 答えは本(210ページ)にもあるが有効状態密度 $N_C = 2.9 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ より小さい値であるため 例 $1 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3} = 2.9 \times 10^{25} \text{ [m}^{-3}] \times e^{-\frac{E-E_F}{0.025 \text{ eV}}}$ とし $E-E_F$ を求めると 0.14 かつ 0.21 eV といった値が得られる。

答 $(N_D = 1 \times 10^{23} \text{ m}^{-3})$ 0.147 eV
 $(N_D = 1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3})$ 0.207 eV

7. 次の式

$$n(E) = N_C e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}} \quad \text{--- ①} \quad \rightarrow E-E_F \text{ を } E_C-E_F \text{ とする}$$

および

$$p(E) = N_V e^{-\frac{E_F-E}{k_B T}} \quad \text{--- ②} \quad \rightarrow E_F-E \text{ を } E_F-E_V \text{ とする}$$

が成り立つとき、電子と正孔の密度の積はある一定値になる。(これを pn 積という。) 室温のシリコンの場合の値を求めなさい。

計算はとも簡単で E を E_C, E_V と伝導帯や価電子帯の端のエネルギーとして ①と②をかけると $pn = N_C N_V e^{-\frac{E_C-E_V}{k_B T}}$ ただし $E_G (\approx 1.1 \text{ eV})$ は禁制帯幅となる。

答 $pn = 1.5 \times 10^{32} \text{ m}^{-6}$

8. 順バイアスの場合について考えよう。pn 接合における電子による電流は、p形領域の空乏層と接する部分での電子密度が重要である。この部分の電子密度は、バイアス電圧によってどのように変化するか。

順電流となるのは障壁を超える高エネルギーの電子の升と考えられる。
 障壁が eV_{bias} だけ小さくなる時、電子の密度 ($f(E)$) が増加するが、 E レベルよりはるかに高いエネルギーのため単に $e^{-\frac{eV_{bias}}{k_B T}}$ 倍としてよい。

答 $e^{-\frac{eV_{bias}}{k_B T}}$ 倍に増大する。

9. 逆バイアスの場合について考えよう。十分に大きな逆バイアスを考えると、p形半導体中の電子が空乏層に向かって拡散する電流が電子電流となる。さらに、この電子電流の電流密度 J_n が、ある定数

D_n/L_n とシリコンの pn 積 $pn = N_V N_C e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$ および p 形半導体のアクセプタ密度 N_A を用いて

$$J_n = e \frac{D_n}{L_n} \times \frac{pn}{N_A}$$

と表される。また、正孔電流 J_p は、

$$J_p = e \frac{D_p}{L_p} \times \frac{pn}{N_D}$$

と別の定数 D_p/L_p および n 形半導体のドナー密度 N_D を用いて表される。

このとき N_A を一定とした上で、 N_D を N_A の 1 倍、10 倍、100 倍とした場合に逆方向飽和電流 I_0 ($J_n + J_p$ に面積を掛けたもの) はどのように変化すると考えられるか。

答 正孔電流分が減少する。

10. $N_A \gg N_D$ のとき、次式

$$W = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s}{eN} (V_b - V_{bias})}$$

は N_D を用いて表すことができる。この式を用いて空乏層がどちらの側に形成されるか説明しなさい。

答 $W = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s}{2eN_D} (V_b - V_{bias})}$

n 形半導体側

11. 半導体シリコンの pn 接合において、 $N_A = N_D = 1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 、 $V_b = 0.95 \text{ eV}$ である場合を考えよう。バイアス電圧を $-1, 0, 0.8 \text{ V}$ とした場合の空乏層幅 W と空乏層容量 C_j を求めなさい。

$N_b = N_A = N$ としたのは必ずしも一般的ではありません。ですが $10^{18} \text{ cm}^{-3} = 10^{24} \text{ m}^{-3}$ というやや大きめの不純物濃度で数十 nm の W という値は覚えもよいかもありません。 C_j は [F] でなく [F/m²] ですので $0.1 \text{ [mm]} \times 0.1 \text{ [mm]} = 10^{-8} \text{ [cm}^2\text{]}$ の「ゲート」を作っても 10^{-11} [F] にしかならない計算になります。

答 (-1 V) $W = 72 \text{ nm}$ 、 $C_j = 1.5 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$
 (0 V) $W = 50 \text{ nm}$ 、 $C_j = 2.1 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$
 (0.8 V) $W = 20 \text{ nm}$ 、 $C_j = 5.3 \times 10^{-3} \text{ F/m}^2$

12. 前問において、 $N_A = 1 \times 10^{24} \text{ m}^{-3}$ 、 $N_D = 1 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ とした場合について考え、この場合の熱平衡状態におけるエネルギーバンド図を示しなさい。なお、問題 10 の条件 $N_A \gg N_D$ をほぼ満たしていることにも留意するとよい。

ポテンシャルは空乏層が n 形側にあり、伝導帯、価電子帯のエネルギーのカーブが下に凸になっているとある。

11. 追加

7011トの訂正 拡散電位 V_b の単位を [V] とし、電位差とする
 価電子帯、伝導帯の障壁 (「エネルギー差」) は
 eV_b と電子の電荷をかけて表す。

式(16) $W = 2 \sqrt{\frac{\epsilon_s}{eN}} (V_b - V_{bias})$ は誤りではない。

$$\epsilon_s = 10^{-10} \text{ [F/m]} = 10^{-10} \text{ [C/Vm]}$$

$$\therefore Q = CV \text{ より } [C] = [F] \times [V]$$

のため
 $N_A = N_D = 10^{24} \text{ [cm}^{-3}]$ なら $N \text{ [} 10^{24} \text{ cm}^{-3}]$ を代入

して

$$eN = 10^{-19} \text{ [C]} \times 10^{24} \text{ [cm}^{-3}]$$

$$\begin{aligned} \frac{\epsilon_s}{eN} (V_b - V_{bias}) &\doteq \frac{10^{-10} \text{ [C/Vm]} \times 1 \text{ [V]}}{10^{-19} \text{ [C]} \times 10^{24} \text{ [cm}^{-3}]} \\ &= 10^{-15} \text{ [m}^2] \end{aligned}$$

$$\sqrt{\frac{\epsilon_s}{eN} (V_b - V_{bias})} \doteq 10^{-7.5} \text{ [m]} \doteq 3 \times 10^{-8} \text{ [m]}$$

$$W \doteq 2 \times 3 \times 10^{-8} \text{ [m]} = 6 \times 10^{-8} \text{ [m]} = 60 \text{ [nm]}$$

正確に計算すると前述の値となる。