半導体工学(7)

半導体のキャリア(3)
PN接合の概要

電子情報デザイン学科　藤野　毅

キャリア密度から電気特性へ

復習

- いままでの話で
  - 不純物密度⇒キャリア密度とフェルミ準位導出

$n_i \approx 1.5\times10^{16}[m^{-3}]$

N型

$n \approx N_D$　(3･19)　　$p \approx \dfrac{n_i^2}{N_D}$　(3･20)

$E_F = E_i + k_B T \ln\left(\dfrac{N_D}{n_i}\right)$　(3･21)

P型

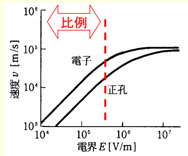
$p \approx N_A$　(3･24)　　$n \approx \dfrac{n_i^2}{N_A}$　(3･25)

$E_F = E_i - k_B T \ln\left(\dfrac{N_A}{n_i}\right)$　(3･26)

- キャリア密度と電気特性の関係へ
  - ある電界Eにおけるキャリア速度v

$\boxed{v = \mu \cdot E}$　(3･27)

  - 比例係数μを移動度と呼ぶ．単位は[m^2/V･s]



先週の練習問題回答

- N型半導体中では[伝導電子]が多数キャリア，[　正孔　]が少数キャリア，P型半導体中では[　正孔　]が多数キャリア，[伝導電子]が少数キャリア
- リンを5X10^{23}[m^{-3}]ドープした半導体が[m^{-3}]ある．この半導体の室温における電子密度とフェルミ準位を求めよ

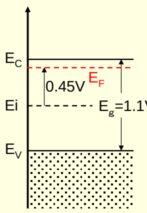
リンはドナーとなるので，N型半導体

$n \approx N_D = 5\times10^{23}[m^{-3}]$

$p \approx \dfrac{n_i^2}{N_D} = \dfrac{(1.5X10^{16})^2}{5X10^{23}} = 4.5\times10^{8}[m^{-3}]$

$E_F = E_i + k_B T \ln\left(\dfrac{N_D}{n_i}\right)$

$= E_i + 0.026\times\ln\left(\dfrac{5\times10^{23}}{1.5\times10^{16}}\right) = E_i + 0.45[eV]$



ドリフト電流(2)

復習

- 抵抗率ρ，導電率σの一般式
  - 正孔密度p，正孔移動度μ_p
  - 伝導電子密度n，電子移動度μ_n

$$\boxed{\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(p\cdot\mu_p + n\cdot\mu_n)}} \quad (3･33)$$

- N型シリコンの場合n>>pなので

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\cdot n\cdot\mu_n} = \frac{1}{q\cdot N_D\cdot\mu_n} \quad (3･34)$$

- P型シリコンの場合n<<pなので

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\cdot p\cdot\mu_p} = \frac{1}{q\cdot N_A\cdot\mu_p} \quad (3･35)$$

小テスト問題1回答

(1)アルミニウム原子1個が持つ，電子数を書きなさい．　13

(2)アルミニウム結晶の単位格子あたりに存在するアルミニウム原子数を答えよ．　　面心立方格子なので　4

(3)アルミニウム結晶1cm^{3}あたりに存在するアルミニウム原子数を答えよ．

4Å⇒4X10^{-8}cm　∴1/(4X10^{-8})^{3}X4=6.25X10^{22}　6.25X10^{22}個

(4)アルミニウムの密度[g/cm^3]を求めよ．

アルミニウム原子1個の質量は(原子量)/(アボガドロ数)

$$\frac{26.9}{6\times10^{23}}\times6.25\times10^{22} = 2.8$$

2.8g/cm^3

(5) 幅0.6μm厚さ0.4μmのアルミニウム配線の抵抗値を1kΩ以下とするためには，配線長を何μm以下にすればよいか

3X10^{-3}Ωcm=30Ωμm

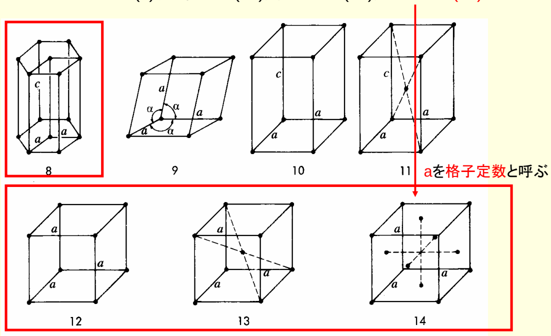
$$\frac{30}{0.6\times0.4}\times x = 1\times10^{3} \qquad \therefore x = 8$$

8μm以下

ブラベ格子2

復習

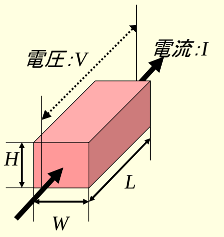
- 重要：六方晶(8)、単純立方(12)，体心立方(13)，面心立方(14)



抵抗率・導電率とは？

復習

- 抵抗値は物質の形状で変化するので，物質固有の電気の通しやすさを評価するものとして抵抗率ρを使用する．
- 抵抗率の単位は[Ω・cm]または[Ω・m]←教科書例題1
- 抵抗率の逆数が導電率σ [Ω^{-1}・m^{-1}]



・抵抗Rと抵抗率ρの関係は下式で表される

$$R=\frac{L}{W\times H}\times\rho$$

W:配線幅
L:配線長さ
H:配線膜厚

S:断面積 ＝W×H

$$R=\frac{L}{S}\times\rho \quad （1・1式）$$

$$\sigma=\frac{1}{\rho}$$

7

小テスト問題2回答

シリコンの価電子数は[4]個であり，隣接する[4]個のシリコン原子と[共有]結合を作って，[ダイアモンド]構造の結晶を作っている．純度の高いシリコン結晶は，不純物の偏析を利用した[ゾーンメルティング]法によって作られており，不純物を含まない半導体は[真性]半導体とよばれる．また，不純物を含まない半導体材料では，バンドギャップが大きい半導体ほど抵抗率が[高い]．シリコン中にPやAsなどの価電子数が[5]個の不純物を導入すると，不純物は電子を供給する[ドナー]として働き，[N]型の半導体となる．

8

Si結晶

復習

- シリコン(Si)はダイアモンド格子構造
- 4個の価電子が隣接する4個の原子と**共有結合**
- 格子定数a=5.43A

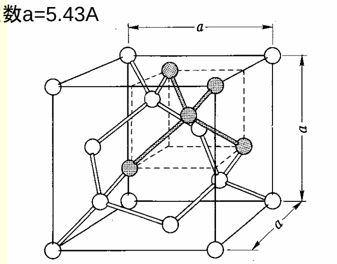


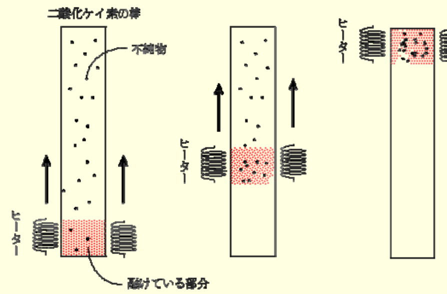
図 1・2　ダイヤモンド格子の模式図

9

ゾーンメルティング法

復習

- 純度の高いシリコン結晶の生成法



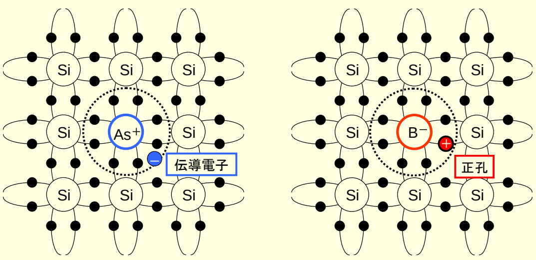
10

http://www.s-yamaga.jp/nanimono/chikyu/kobutsu-03.htmより引用

不純物半導体とキャリア

復習

- 第V族不純物(As,P)：自身はドナー(正)となり伝導電子を発生
- 第III族不純物(B)：自身はアクセプタ(負)となり正孔を発生
- 室温ではキャリア数＝不純物数⇒抵抗率下がる



(a) n型半導体(Asがドナー)　　(b) p型半導体(Bがアクセプタ)

11

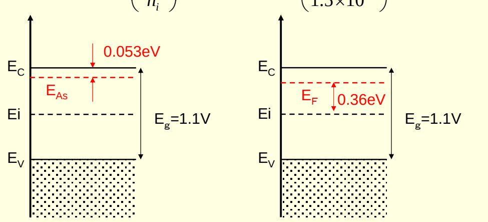
小テスト問題3回答(1)(3)

(1)Asが作る不純物準位E_{As}を，解答用紙のエネルギーバンド図上に記入しなさい

$$\ln\left(\frac{1.5\times10^{22}}{1.5\times10^{16}}\right)=6\times\ln10=6\times2.3$$

(3)フェルミ準位E_Fを計算し，解答用紙のエネルギーバンド図上に記入しなさい．

$$E_F=E_i+k_BT\ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)=E_i+0.026\times\ln\left(\frac{1.5\times10^{22}}{1.5\times10^{16}}\right)=E_i+0.36$$



12

小テスト問題3回答(2)(4)(5)

(2)シリコンの伝導電子密度n[m^{-3}]および正孔密度p[m^{-3}]を計算しなさい

Asはドナーなのでn=N_D=1.5X10^{22} n=1.5X10^{22} [m^{-3}]

p=n_i^2/nより、p=(1.5X10^{16})^2/1.5X10^{22}=1.5X10^{10}

∴ p=1.5X10^{10} [m^{-3}]

(4)本半導体の電子移動度μ_nが0.15m^2/V･s，正孔移動度μ_pが0.05m^2/V･sであるとき，電界E=100kV/mを印加したときの，電子のドリフト速度はいくらか？

v= μ_nXE=0.15X100X10^3=1.5X10^4 1.5X10^4[m/s]

(5)本半導体の抵抗率[Ωm]をもとめよ．少数キャリアによる電流は計算時，省略しても良い．

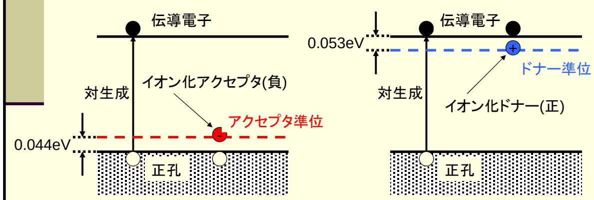
ρ=1/(qXnXμ_n)=1/(1.6X10^{-19}X1.5X10^{22}X0.15)
=2.8X10^{-3} 2.8X10^{-3} [Ωm]

13

不純物半導体のエネルギー帯図

復習

- P型：BのようなIII族の不純物は
アクセプタとなって正孔（正電荷キャリア）が発生
- N型：AsのようなV族の不純物は
ドナーとなって伝導電子（負電荷キャリア）が発生

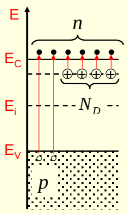


14

不純物密度とキャリア密度(1)

復習

- 不純物密度からキャリア密度を求める



N型半導体(ドナー密度N_D)の場合
半導体の電気的中性条件より

$$\begin{cases} n = N_D + p \\ n \cdot p = n_i^2 \quad (3\text{･}15) \end{cases}$$

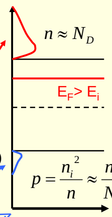
$$n^2 = n \cdot N_D + n \cdot p = n \cdot N_D + n_i^2$$

$$\therefore n^2 - n \cdot N_D - n_i^2 = 0$$ 多数キャリア

$$\boxed{n = \frac{1}{2}\left(N_D + \sqrt{N_D^2 + 4 \cdot n_i^2}\right) = N_D} \quad (3\text{･}19)$$

$$\boxed{p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}} \quad (3\text{･}20) \qquad \because N_D > n_i$$

少数キャリア



$$p = \frac{n_i^2}{n} \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

- 不純物密度からフェルミ準位を求める

$$n = n_i \cdot \exp\left\{\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right\} \quad (3\text{･}15)$$

$n = N_D$ を代入してE_Fについて解くと

$$\boxed{E_F = E_i + k_B T \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)} \quad (3\text{･}21)$$

15

キャリア密度から電気特性へ

復習

- いままでの話で
  - 不純物密度⇒キャリア密度とフェルミ準位導出

$n_i \approx 1.5\times10^{-16}[m^{-3}]$

N型

$n \approx N_D$ (3･19) $\quad p \approx \dfrac{n_i^2}{N_D}$ (3･20)

$E_F = E_i + k_B T \ln\left(\dfrac{N_D}{n_i}\right)$ (3･21)

P型

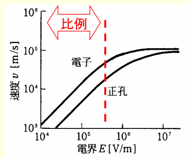
$p \approx N_A$ (3･24) $\quad n \approx \dfrac{n_i^2}{N_A}$ (3･25)

$E_F = E_i - k_B T \ln\left(\dfrac{N_A}{n_i}\right)$ (3･26)

- キャリア密度と電気特性の関係へ
  - ある電界Eにおけるキャリア速度v

$$\boxed{v = \mu \cdot E} \quad (3\text{･}27)$$

  - 比例係数μを移動度と呼ぶ．
単位は[m^2/V･s]



16

ドリフト電流(2)

復習

- 抵抗率ρ，導電率σの一般式
  - 正孔密度p，正孔移動度μ_p
  - 伝導電子密度n，電子移動度μ_n

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(p\cdot\mu_p + n\cdot\mu_n)} \quad (3\text{･}33)$$

- N型シリコンの場合$n>>p$なので

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\cdot n\cdot\mu_n} = \frac{1}{q\cdot N_D\cdot\mu_n} \quad (3\text{･}34)$$

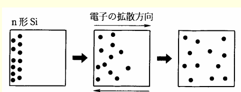
- P型シリコンの場合$n<<p$なので

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q\cdot p\cdot\mu_p} = \frac{1}{q\cdot N_A\cdot\mu_p} \quad (3\text{･}35)$$

17

拡散電流

- ドリフト電流と異なり，キャリアの密度が試料内で不均一であるときに生じる電流

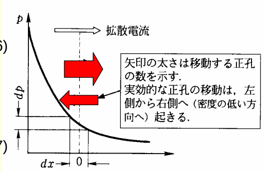


  - 正孔による拡散電流 J_{DP}

$$J_{DP} = q\cdot D_p\left(-\frac{dp}{dx}\right) = -q\cdot D_p\cdot\frac{dp}{dx} \quad (3\text{･}36)$$

  - 電子による拡散電流 J_{DN}

$$J_{DN} = -q\cdot D_n\left(-\frac{dn}{dx}\right) = q\cdot D_n\cdot\frac{dn}{dx} \quad (3\text{･}37)$$



  - 拡散定数Dは移動度と温度に依存する（アインシュタインの関係）

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

18

電流密度の式

- ドリフト電流と拡散電流を両方考慮する
  - 電界Eによるドリフト電流J_{drift}

$J_{drift} = q\cdot p\cdot\mu_p\cdot E$ (3･28)　　$J_{drift} = q\cdot n\cdot\mu_n\cdot E$ (3･29)

正孔　　電子

  - 正孔による電流密度J_pは

$$J_p = J_{drift} + J_{DP} = q\cdot p\cdot\mu_p\cdot E - q\cdot D_p\cdot\frac{dp}{dx} \quad (3･40)$$

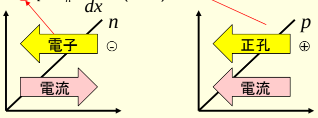
$$\frac{dn}{dx} > 0$$

  - 電子による電流密度J_nは

$$J_n = J_{drift} + J_{DN} = q\cdot n\cdot\mu_N\cdot E + q\cdot D_n\cdot\frac{dn}{dx} \quad (3･41)$$

  - 全電流密度はJは

$$J = J_p + J_n \quad (3･42)$$



19

練習問題回答

(1)アインシュタインの関係(3･38)より

$$D_n = \frac{k_B}{q}\cdot\mu_n\cdot T = 0.026\times 0.1 = 2.6\times 10^{-3}[m^2/s]$$

(2)拡散電流の式(3･37)より

$$J_{DN} = q\cdot D_n\cdot\frac{dn}{dx} = 1.6\times 10^{-19}\times 2.6\times 10^{-3}\times\frac{10^{23}}{100\times 10^{-6}} = 4.2\times 10^5[A/m^2]$$

(3)ドリフト速度の式(3･27)より

$$v = \mu\cdot E = 0.1\times 100\times 10^3 = 1\times 10^4[m/s]$$

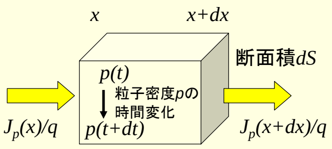
(4)ドリフト電流は素電荷×電子濃度×ドリフト速度で計算できるので

$$J_{drift} = q\cdot n\cdot v = 1.6\times 10^{-19}\times 10^{22}\times 10^4 = 1.6\times 10^7[A/m^2]$$

20

キャリア数連続の式(1)

- シリコン結晶中の1次元の微小領域に注目し、本領域内に存在する粒子密度pの時間変化を考慮する



単位面積，単位時間当たり入る粒子数　　単位面積，単位時間当たり出て行く粒子数

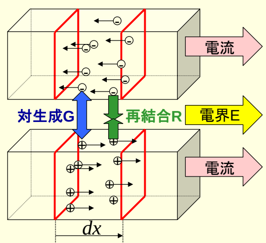
- 粒子は，生成や消滅しない⇒粒子数保存の式

$$\underbrace{\{p(t+dt)-p(t)\}}_{\text{粒子密度}p\text{の時間変化}}\cdot\underbrace{dS\cdot dx}_{\text{微小領域の体積}} = \underbrace{\frac{1}{q}\{J_p(x)-J_p(x+dx)\}\cdot dS\cdot dt}_{\text{(微小領域に入る粒子数)−(出る粒子数)}}$$

21

キャリア数連続の式(2)

- 時間的に粒子数(キャリア数)が変化する場合を考慮する
  - 光照射や熱励起により電子･正孔が発生⇒対生成
  - 結晶欠陥等を介して電子･正孔が結合して消滅⇒再結合



$$J_n = q\cdot n\cdot\mu_n\cdot E + q\cdot D_n\cdot\frac{dn}{dx} \quad (3･41)$$

$$J_p = q\cdot p\cdot\mu_p\cdot E - q\cdot D_p\cdot\frac{dp}{dx} \quad (3･40)$$

$$\underbrace{\{p(t+dt)-p(t)\}\cdot dS\cdot dx = \frac{1}{q}\{J_p(x)-J_p(x+dx)\}\cdot dS\cdot dt}_{\text{粒子数保存の式}} \boxed{+\underbrace{G_p\cdot dS\cdot dx\cdot dt}_{\text{対生成}} - \underbrace{R_p\cdot dS\cdot dx\cdot dt}_{\text{再結合}}}$$

22

キャリア数連続の式(3)

- 連続の式への変形過程

$$\{p(t+dt)-p(t)\}\cdot dS\cdot dx = \frac{1}{q}\{J_p(x)-J_p(x+dx)\}\cdot dS\cdot dt + G_p\cdot dS\cdot dx\cdot dt - R_p\cdot dS\cdot dx\cdot dt$$

⇩ $dS\cdot dx\cdot dt$ で両辺を割る

$$\frac{p(t+dt)-p(t)}{dt} = \frac{1}{q}\frac{J_p(x)-J_p(x+dx)}{dx} + G_p - R_p$$

⇩ $\frac{dp}{dt} = \frac{p(t+dt)-p(t)}{dt}$　　$\frac{J_p}{dx} = -\frac{J_p(x)-J_p(x+dx)}{dx}$

(3･43)の正孔形式

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q}\frac{dJ_p}{dx} + G_p - R_n$$

⇩ $J_p = q\cdot p\cdot\mu_p\cdot E - q\cdot D_p\cdot\frac{dp}{dx}$ (3･40)

$R_p = \frac{p-p_0}{\tau_p}$ (3･46)の正孔形式

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{dp}{dx}\cdot\mu_p\cdot E + D_p\cdot\frac{d^2p}{dx^2} + G_p - \frac{p-p_0}{\tau_p} \quad (3･48)$$

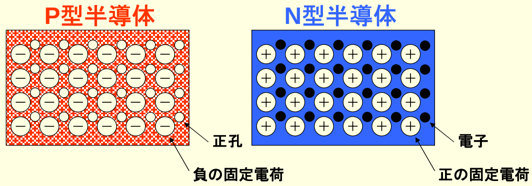
同様に

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn}{dx}\cdot\mu_n\cdot E + D_n\cdot\frac{d^2n}{dx^2} + G_n - \frac{n-n_0}{\tau_n} \quad (3･47)$$

23

P型半導体とN型半導体

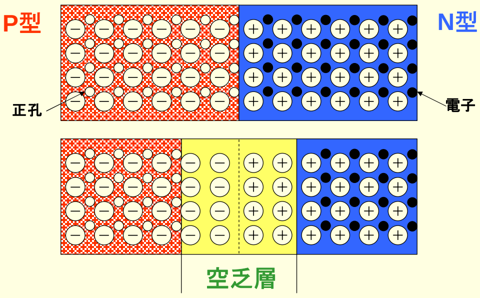
- P型半導体
  - Si基板中にB(ボロン) の不純物を導入
  - 正電荷をもつホール(正孔)が電流の担い手(キャリア)
- N型半導体
  - Si基板中にP(リン)やAs(ヒ素)の不純物を導入
  - 負電荷をもつ電子が電流の担い手(キャリア)



24

PN接合(1)

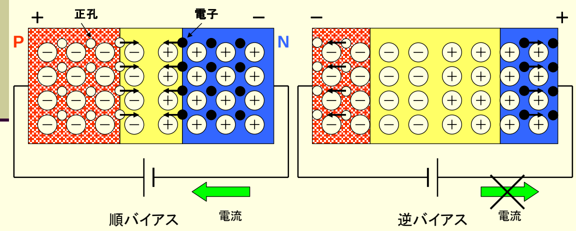
- 界面の電子と正孔が結合して界面にキャリアのない層(空乏層)が形成される



25

PN接合(2)

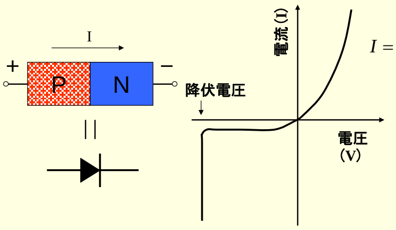
- PN接合に電界を印加する
  - 順バイアス:界面で電子と正孔が結合することにより電流が流れる
  - 逆バイアス:空乏層の幅が広がるだけで電流は流れない



26

PN接合の電気特性

- PN接合はP型領域からN型領域へ電流が流れる整流特性を有する⇒ダイオードを形成する



$$I = Is\left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1\right]$$

27