

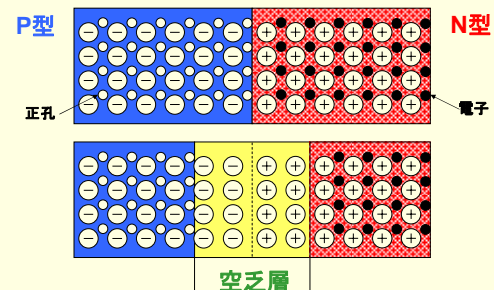
半導体工学(8)

PN接合(1)

電子情報デザイン学科 藤野 毅

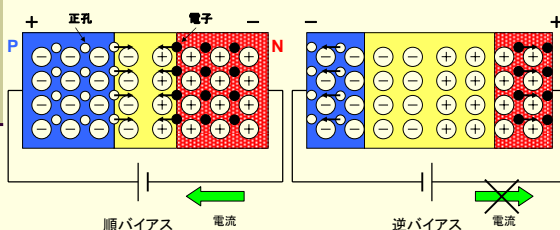
PN接合(1)

- 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



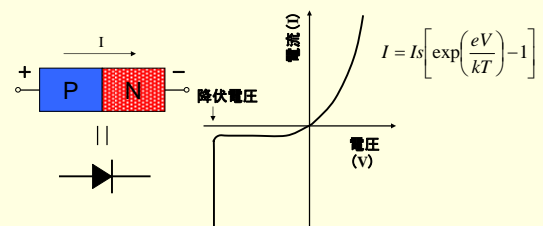
PN接合(2)

- 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



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



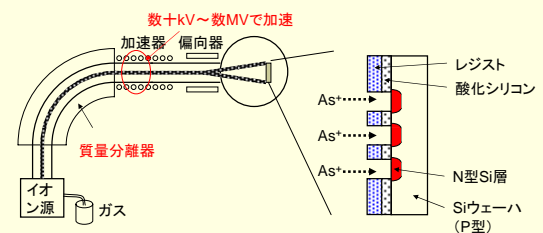
PN接合の形成法

- Siウエハは、不純物があらかじめ混入されており、P型またはN型である。P型不純物: [アクセプタ], N型不純物: [ドナー]
- 不純物拡散法やイオン注入法などによって基板と逆極性の不純物を導入(ドーピング)するとPN接合ができる。
- 逆極性の不純物は、基板の不純物より多くしなければならない。(教科書第3章, p.30)



イオン注入法

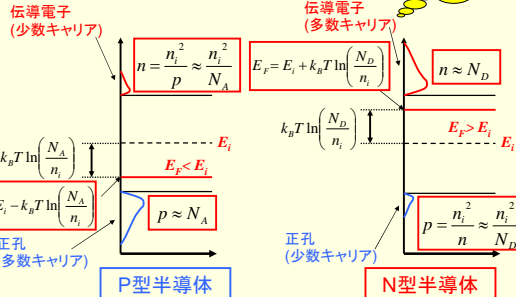
- 現在の半導体製造プロセスでは、基板中にp型、n型の半導体を作りこむためにはイオン注入によるドーピングを使用する
- イオン注入機はイオン源から必要なイオンのみを質量分離器で選択し、加速してウエハに入射する。
- 注入したイオンをドナーまたは、アクセプタとして活性化するためにはアニールと呼ばれる昇温熱処理が必要



P,N半導体とキャリア密度 & フェルミ準位

- ドナー密度 N_D またはアクセプタ密度 N_A が決まると、キャリア密度(p, n)とフェルミ準位(E_F)は決定される。
真性キャリア密度 n_i $n_i \approx 1.5 \times 10^{-16} [m^{-3}]$

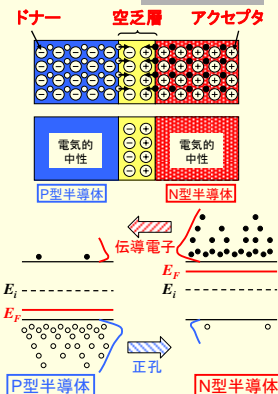
復習事項
(必須記憶)



7

P型N型半導体を接触させると

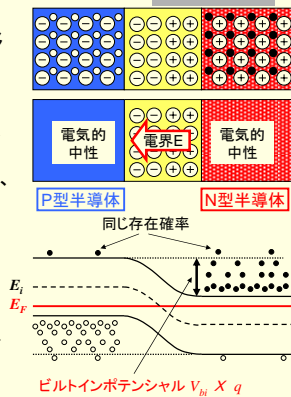
- 接合面の両側では「伝導電子」および「正孔」のキャリア密度に大きな差がある
- 伝導電子と正孔は、それぞれの濃度勾配を解消する方向に移動(拡散)し、互いに再結合して消滅する
- 境界面には、伝導電子も正孔も存在しない「空乏層」が形成される
- 空乏層には移動できないドナーおよびアクセプタイオンが存在するので、「空間電荷領域」とも呼ばれる。



8

空乏層とビルトインポテンシャル

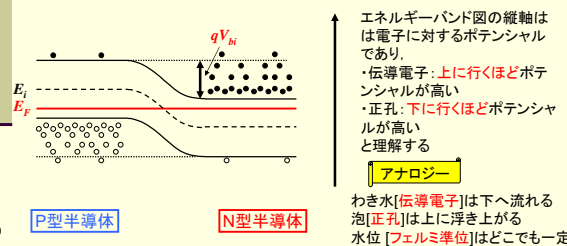
- イオン化したドナーおよびアクセプタにより、キャリアの移動を妨げる方向の電界が発生し、エネルギーバンドは曲がる。
- キャリアの移動は、同一エネルギー準位における、キャリアの存在確率が等しくなると、停止する。すなわち、N型領域とP型領域のいたるところでフェルミ準位が一致する。
- 空乏層領域内の電界により発生する電位差 V_{bi} を「拡散電位」または「ビルトインポテンシャル(内蔵電位)」と呼ぶ。



9

ビルトインポテンシャルの物理的意味

- P型およびN型領域のキャリア密度の差によりキャリアは拡散しようとする
- ビルトインポテンシャル V_{bi} は、このキャリアの拡散を抑制するための電位である(空乏層内の空間電荷起因)
- 外部に電圧として取り出せる電位ではないので注意する



10

ビルトインポテンシャルの導出

- P型領域では
 $E_{ip} - E_F = k_B T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$
 $p_p = n_i \cdot \exp \left(\frac{E_{ip} - E_F}{k_B T} \right) = N_A$
 - N型領域では
 $E_F - E_{in} = k_B T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right)$
 $n_n = n_i \cdot \exp \left(\frac{E_F - E_{in}}{k_B T} \right) = N_D$
- $$q \cdot V_{bi} = E_{ip} - E_{in} = k_B T \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right) + k_B T \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right) = k_B T \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) \quad (4.2)$$
- $$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right)$$

11

練習問題(教科書例題4・1)

- アクセプタ密度 $N_A = 1 \times 10^{25} [m^{-3}]$ のP型Siとドナー密度 $N_D = 1 \times 10^{22} [m^{-3}]$ のN型SiのPN接合におけるビルトインポテンシャル V_{bi} を求めよ。

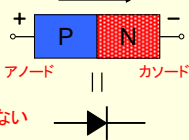
$$V_{bi} = \frac{k_B T}{q} \ln \left(\frac{N_A \cdot N_D}{n_i^2} \right) = 0.026 \times \ln \frac{1 \times 10^{22} \times 1 \times 10^{27}}{(1.5 \times 10^{16})^2}$$

$$= 0.026 \times 33.7 = 0.88 [V]$$

12

PN接合とダイオード

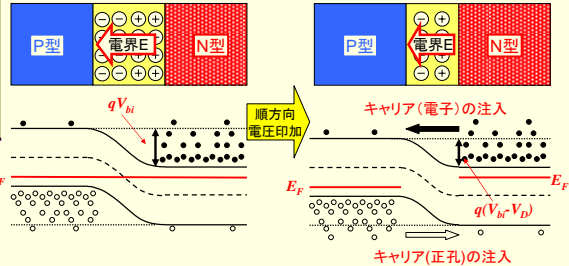
- PN接合に外部からバイアス電圧 V_D を印加する
- 順方向バイアスとは
 - P型シリコンを(+) N型シリコンを(-)
 - 電圧印加によって急激に電流が流れる
 - この特性を順方向特性と呼ぶ
- 逆方向バイアスとは
 - P型シリコンを(-) N型シリコンを(+)
 - 電圧印加によってほとんど電流が流れない
 - この特性を逆方向特性と呼ぶ
- 上記のような片方向だけに電流が流れる特性を整流特性とよび、このような半導体素子をダイオードとよぶ。
- ダイオードのP型電極をアノード(陽極)、N型電極をカソード(陰極)と呼ぶ



13

PN接合の順方向特性

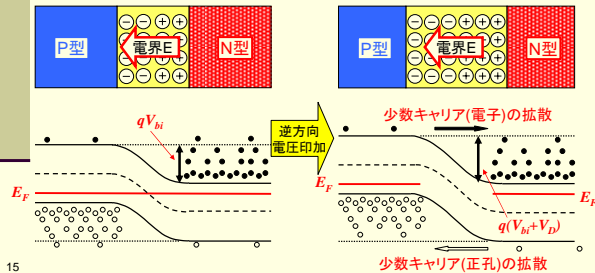
- 順方向電圧 $V_D(>0)$ を印加するとビルトイン電圧 V_{bi} が V_D だけ小さくなり、N型領域の多数キャリアである伝導電子がP型領域へ、P型領域中の多数キャリアである正孔がN型領域へ注入され電流が流れる。
- 注入されるキャリアは、高いエネルギーを持っている。あるエネルギー以上の電子数はボルツマン分布に比例するので、順方向電圧 V_D のexponentialに比例した電流が流れる。
- 空乏層領域は電圧印加により薄くなる



14

PN接合の逆方向特性

- 逆方向電圧 $V_D(>0)$ を印加すると、ビルトイン電圧が V_D だけ小さくなり、N型領域の少数キャリアである伝導電子がP型領域へ、P型領域中の少数キャリアである正孔がN型領域へ注入され電流が流れる。
- 流れる電流は少数キャリアの濃度により制限され非常に小さい。
- 空乏層領域は電圧印加により厚くなる。



15

PN接合におけるキャリア密度(1)

- 真性フェルミ準位からのフェルミポテンシャルを導入
- 熱平衡状態におけるキャリア密度は0添字で表す
 - N型領域 多数キャリア n_{n0} 、少数キャリア p_{n0}
 - P型領域 多数キャリア p_{p0} 、少数キャリア n_{p0}

$$\begin{aligned}
 n &= n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_F}{k_B T}\right) \\
 n_{n0} &= n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_F}{k_B T}\right) \quad (4.4) \\
 n_{n0} &= n_i \cdot \exp\left(\frac{E_F - E_i}{k_B T}\right) = n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_F}{k_B T}\right) \quad (4.5) \\
 p_{p0} &= n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_F}{k_B T}\right) \quad (4.3) \\
 p_{p0} &= n_i \cdot \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{k_B T}\right) = n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_F}{k_B T}\right) \quad (4.6) \\
 n_{p0} &= n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_F}{k_B T}\right) \\
 p_{n0} &= n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_F}{k_B T}\right)
 \end{aligned}$$

16

PN接合におけるキャリア密度(2)

- 空乏層をはさんだ、N型およびP型領域におけるキャリア密度の違いは、ビルトインポテンシャル V_{bi} で関連付けられている。

$$\begin{aligned}
 \frac{n_{p0}}{n_{n0}} &= \frac{n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_p}{k_B T}\right)}{n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_n}{k_B T}\right)} = \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right) \quad (4.7) \\
 n_{p0} &= n_i \cdot \exp\left(\frac{q\phi_p}{k_B T}\right) \\
 p_{p0} &= n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_p}{k_B T}\right) \\
 p_{n0} &= n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_n}{k_B T}\right) \\
 \frac{p_{n0}}{p_{p0}} &= \frac{n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_n}{k_B T}\right)}{n_i \cdot \exp\left(-\frac{q\phi_p}{k_B T}\right)} = \exp\left(-\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right) \quad (4.8)
 \end{aligned}$$

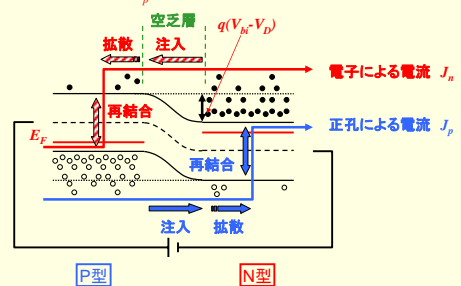
⇒ 電圧印加によってビルトインポテンシャル V_{bi} が V_D 変化したときも空乏層の両境界で同じ関係が成り立つ

0添字がないことに注意

$$\begin{aligned}
 \frac{n_p(x=0)}{n_{n0}} &= \exp\left(-\frac{q(V_{bi} - V_D)}{k_B T}\right) \quad (4.75) \\
 \frac{p_n(x=0)}{p_{p0}} &= \exp\left(-\frac{q(V_{bi} - V_D)}{k_B T}\right) \quad (4.85)
 \end{aligned}$$

PN接合電流の導出(1)

- 順方向電流は下記の2つのパスから成り立つ
 - 電子がN型からP型へ注入され、P型領域で拡散・再結合することで流れる電流 J_n
 - 正孔がP型からN型へ注入され、N型領域で拡散・再結合することで流れる電流 J_p



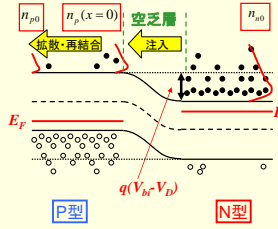
18

電子電流の導出(2)

- 順方向電圧 V_D を印加したときにN型領域の多数キャリアである電子が、空乏層を通過してP型領域に少数キャリアとして注入される
- P型領域に注入された少数キャリア $n_p(x=0)$ とP型領域での熱平衡少数キャリア n_{p0} との関係を求める

$$(4.75)より \quad \frac{n_p(x=0)}{n_{p0}} = \exp\left\{-\frac{q(V_{bi}-V_D)}{k_B T}\right\} \rightarrow \therefore n_p(x=0) = n_{p0} \exp\left\{-\frac{q(V_{bi}-V_D)}{k_B T}\right\}$$

$$(4.7)より \quad n_{p0} = n_{p0} \cdot \exp\left\{\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right\} \rightarrow n_{p0} \exp\left\{\frac{qV_{bi}}{k_B T}\right\} \exp\left\{-\frac{q(V_{bi}-V_D)}{k_B T}\right\} = n_{p0} \exp\left\{\frac{qV_D}{k_B T}\right\} \quad (4.9)$$



- 注入された電子は、P型半導体の熱平衡状態でのキャリア密度より大きい、この増加したキャリアの密度を、過剰キャリア密度と呼ぶ。過剰キャリア密度 $n_p'(x=0)$ は

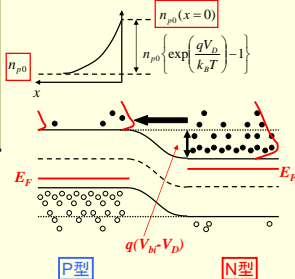
$$n_p'(x=0) = n_p(x=0) - n_{p0} = n_{p0} \left\{ \exp\left\{\frac{qV_D}{k_B T}\right\} - 1 \right\} \quad (4.10)$$

19

電子電流の導出(3)

- 拡散電流の大きさを求めるのには、注入された過剰キャリアが拡散する速さを求めることが必要。
- キャリア数連続の式(3.47)を使用する。

$$\frac{dn}{dt} = D_n \frac{d^2 n}{dx^2} + \frac{dn}{dx} \cdot \mu_n \cdot E + G_n - \frac{n-n_0}{\tau_n} \quad (3.47)$$



- 定常状態: $dn/dt=0$
電子正孔対の発生なし: $G_n=0$,
電界なし: $E=0$

$$D_n \cdot \frac{d^2 n_p(x)}{dx^2} = \frac{n_p(x) - n_{p0}}{\tau_n}$$

電子の拡散距離 L_n として

$$L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n} \quad \text{とおくと}$$

$$\frac{d^2 n_p(x)}{dx^2} = \frac{n_p(x) - n_{p0}}{L_n^2} \quad (4.11)$$

20

電子電流の導出(4)

- 方程式を解く

$$\frac{d^2 n_p(x)}{dx^2} = \frac{n_p(x) - n_{p0}}{L_n^2} \quad (4.11)$$

- n_{p0} は定数なので

$$\frac{d^2 \{n_p(x) - n_{p0}\}}{dx^2} = \frac{n_p(x) - n_{p0}}{L_n^2} \quad (4.12)$$

- 一般解は

$$n_p(x) - n_{p0} = A \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + B \exp\left(\frac{x}{L_n}\right) \quad (4.13)$$

- 境界条件①: $x=\infty$ で $n_p(x) = n_{p0} \rightarrow B=0$

- 境界条件②: $x=0$ で $n_p(x) = n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \rightarrow A = n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\}$

$$n_p'(x) = n_p(x) - n_{p0} = n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \quad (4.14)$$

- 拡散電流の式 $J_n = q \cdot D_n \cdot \frac{dn}{dx}$ (3.37) より

$$J_n = -q \cdot D_n \cdot n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \quad (4.15)$$

21

PN接合の電流特性

- 電子電流 (4.15) 式をx軸に関して電流の流れる方向にxをとる

$$J_n = q \cdot \frac{D_n}{L_n} n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) \quad (4.15)'$$

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

- 正孔電流も電子と同様にもとめられ

$$J_p = q \cdot \frac{D_p}{L_p} p_{n0} \left\{ \exp\left(\frac{qV_D}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_p}\right) \quad (4.16)$$

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

- 全電流密度 J_D は

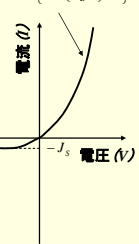
$$J_D = J_n(x=0) + J_p(x=0)$$

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

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

- 逆方向飽和電流密度は

$$J_D(\text{rev}) = J_s$$



22

PN接合ダイオードの降伏現象

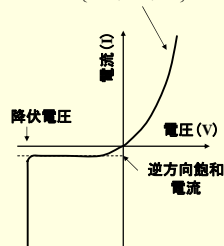
- PN接合に逆バイアスを印加すると、逆方向飽和電流が流れる。さらに逆方向電圧を大きくするとある電圧で急激に大きな電流が流れる。これを降伏現象といい、この電圧を降伏電圧と呼ぶ

- 大きな電流が流れるメカニズムは以下の2つ

- 電子雪崩(なだれ)降伏

PN接合に印加された電界により、大きな運動エネルギーを得て加速された電子が、結晶格子を構成している原子に衝突して電子正孔対を発生させて電流となる。

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



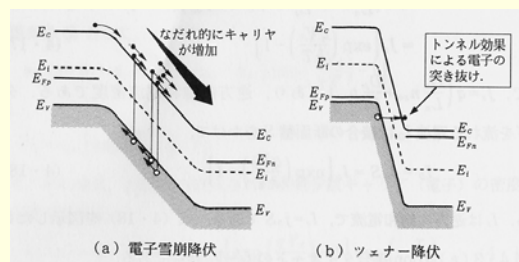
- ツェナー降伏

高濃度ドーピングされたPN接合の空乏層は非常に狭い。この狭いダイオードに高電圧を印加するとトンネル効果により電流が流れる。

23

降伏現象

- 雪崩降伏とツェナー降伏



24