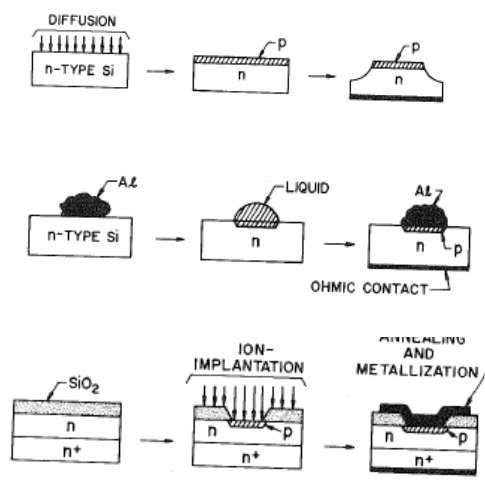


## 【pn 接合の作製方法】



これまでは不純物が均一に分布している半導体についてでしたが、今回は、不純物が不均一に分布する代表的な半導体デバイスである **pn 接合** についてお話します。pn 接合デバイスの作製方法を簡単に示します。代表的な作製方法は、次の四種類です。**拡散接合、合金拡散、イオン注入法、エピタキシャル成長法**です。

**金拡散、イオン注入法、エピタキシャル成長法**です。

拡散接合は、不純物を半導体中へ熱拡散して pn 接合を作製します。合金拡散接合は、半導体結晶上に不純物を接触させ、高温にして一部溶解します。その後冷却する過程で再結晶化し、半導体中に不純物を含んだ層が作られます。これで pn 接合が形成されます。イオン注入法では、高電圧で加速された不純物のイオンを半導体結晶中に打ち込みます。そのままでは不純物はイオン化しないので、温度を上げて活性化します。打ち込むイオン数を一個

単位で計測できるので、不純物濃度を極めて正確に決めることができます。

PN 接合でお話する基本的に重要な点は次の3つです。これを理解すると、ほとんど全ての半導体デバイス動作が分かります。

① **光・電圧を加えていない時のポテンシャル図** (熱平衡状態とも言います)

② **PN 接合の静電容量**

③ **電圧を加えた時に流れる電流**

## 【pn 接合のポテンシャル図】

① 電圧を加えていない時 (加えて光が当たっていない暗所) のポテンシャル図 (熱平衡状態)

電圧 (**バイアス電圧**) が加わっていない (これを **ゼロバイアス** と言います) 場合と電圧を加えた場合に分けて考えます。バイアス電圧とは、デバイスに加える電圧のことを言います。

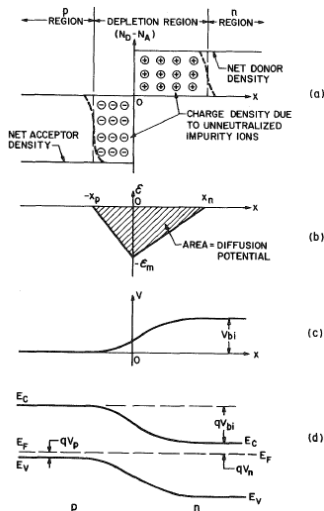
p型とn型半導体を接合させると何が起ころか。まだ電線はつないでいない。これを開放 (オープン) 状態と言います。p型半導体ではフェルミ準位は荷電子帯の近くにありますが。N型半導体ではフェルミ準位は伝導帯の近くにありますが。**フェルミ準位とは、熱力学で言う化学ポテンシャル (ケミカルポテンシャル)** です。何のケミカルポテンシャルかという、電子に対するケミカルポテンシャルです。熱平衡状態 (バイアス電圧が加わっていない。光が当たっていない) では、ケミカルポテンシャルは、p型とn型で一致していなければなりません。一致していないと、ケミカルポテンシャルが同じになるまで電子等のキャリアが流れ、最終的に一致することになります。p型半導体の塊とn型半導体の塊を接合させると、ケミカルポテンシャルが一致するように、キャリアつまり電子とホールが再分布することになります。一瞬、p型半導体からホールがn型半導体領域に流れ込み、n型領域から電子がp型領域へ流れ込みます。そしてケミカルポテンシャルつまりフェルミ準位が一致します。

電子濃度について考えると、n型領域には電子がたくさんあり、p型領域には電子がほとんどありません。

少数キャリア濃度は  $n_p = \frac{n_i^2}{p_p}$  で求められました。つまり濃度差があるので、電子は濃度が高いn型領域から、濃度が低いp型領域へ濃度拡散して流れます (**拡散電流**)。ホールについても同じように、逆に流れま

す。つまり、ホール濃度が高いp型半導体から、ホール濃度が低いn型半導体へ流れます。

この過程が終了した状態のポテンシャル図を示します。



このように、キャリア密度分布が急峻な pn 接合を、**階段接合**といいます。そのほかに、不純物分布がなだらかになっている pn 接合を**線形傾斜接合**などといいます。ここで電位障壁が生じているのが分かります。n型半導体領域の伝導帯とp型半導体領域の伝導帯の間にエネルギーの差が生じています。これを  $V_D(V_{bi})$  と言い、**拡散電位** といいます。これは電子とホールの拡散によって生じた電位差です。この拡散電位で、電子とホールの拡散を阻止しています。拡散電位は、p型半導体と n 型半導体のフェルミエネルギーの差ですから、それぞれのキャリア密度比で決まります。p型半導体とn型半導体のフェルミ準位は、

$$E_{fp} = E_i - kT \times \ln \left( \frac{N_A}{n_i} \right)$$

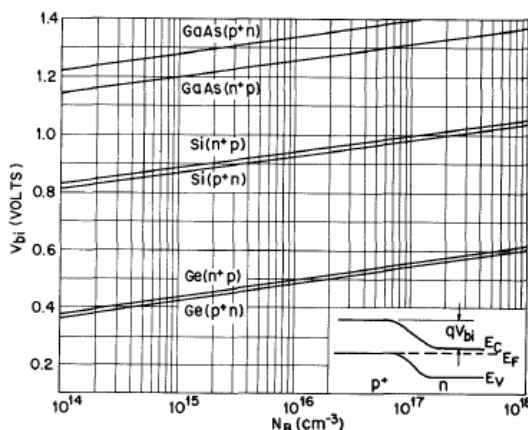
それぞれ

$$E_{fn} = E_i + kT \times \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right)$$

ですから、これから拡散電位  $qV_D = E_{fn} - E_{fp}$

が  $qV_D \cong k_B T \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$ ,  $V_D \cong \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$  が求められます。  $E_i$  は禁制帯幅の 1/2 です。拡散電位は、

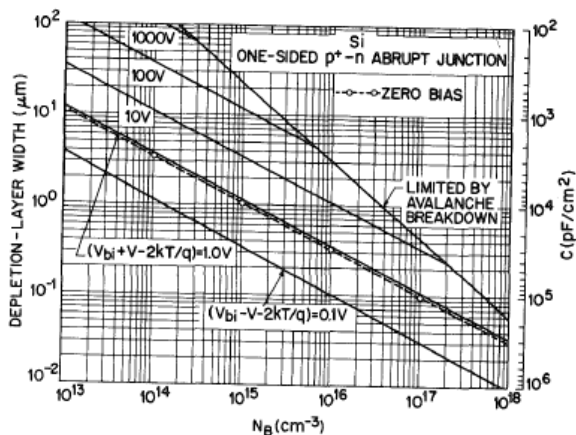
n型、p型半導体の不純物濃度が高いほど大きい。また、真性キャリア密度が小さいほど、つまり禁制帯幅が大きな半導体材料ほど、拡散電位が大きい。  $V_D$  の電位障壁があるので、n 型領域の電子はp型領域へ流れません。p型領域のホールも n 型領域へ流れることができません。バイアス電圧を印加していない場合は、これで熱平衡状態になって、電流は流れません。この拡散電位以上の電圧を pn 接合に加えると、電位障壁を越えて、電流が流れ始めることになります。pn 接合の拡散電位が実際どれ位になるかを、代表的な三種類の半導体について図に示します。



## ②PN 接合の静電容量

電位分布は電磁気と同じようにポアソン方程式を解いて求めることができます。pn接合界面付近ではp型領域では固定電荷として、ホールが n 型領域へ拡散した後のイオン化したアクセプターのマイナスイオン(負イオン)、n 型領域では電子がp型領域へ拡散で動いた後のイオン化したドナーの固定電荷としてプラスイオン(正イオン)があり、接合から離れたp型とn型領域の中は、抵抗が小さいので、電位差

がない、つまり電界強度がゼロであるという境界条件。電界は全てが電位障壁がある「**空乏層**」領域にかかります。何が空乏しているかというと、キャリアである電子とホールが空乏しています。空乏層には、電子やホールといったキャリアは出払っていて「ほとんど」存在しません。空乏層領域では「ほとんど」、イオン化したドナー不純物とアクセプター不純物の固定電荷(これを**空間電荷**と言う)だけが存在しています。



一方、空乏層の両側の、キャリアとイオン化した不純物が両方存在する領域は、「**中性領域**」と言う。これはn型領域では電子とイオン化した正に帯電したドナー不純物の両方があり、全体として中性だからです。p型領域でも同じように、正電荷のキャリアであるホールと、負にイオン化したアクセプター不純物の両方があって、電荷としては中性です。ゼロバイアス電圧の時の、**空乏層幅**を計算してみます。

はじめにポテンシャル分布(電位分布)を求めます。これは「ポアソンの方程式」で求めます。次元問題にしま

す。n型領域の空乏層では、 $\frac{dE}{dx} = \frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{qN_D}{\epsilon}$  これを、境界条件で解くと、電位分布が求められますが、

その境界条件は、接合の界面では、電位Vがゼロ、 $V(0)=0$  そして空乏層の端  $w_n$  で電界強度Eがゼロ

$E(-w_n)=0, E(w_p)=0$  これで二階微分方程式を解くと、 $V(x) = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s\epsilon_0}(x+2w_n)x$  が得られます。同様にp

型領域で解くと  $V(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s\epsilon_0}(x-2w_p)x$  が得られます。pn接合に電圧が加わっていないくて、電流も流れてい

ませんから、電荷は全体として中性ですので、 $N_A \times w_p = N_D \times w_n$  が成り立ちます。そして拡散電位  $V_D$  は

$V_D = V(-w_n) - V(w_p)$  ですから、これに  $V(x) = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s\epsilon_0}(x+2w_n)x$  と  $V(x) = \frac{qN_A}{2\epsilon_s\epsilon_0}(x-2w_p)x$  を用いて代入し

て、 $N_A \times w_p = N_D \times w_n$  を使って整理すると、この空乏層の幅は  $w = w_p + w_n = \left[ \frac{2\epsilon_s\epsilon_0 V_D}{qN_D N_A} (N_A + N_D) \right]^{\frac{1}{2}}$  で求め

られます。

この特徴は、 $N_D, N_A$  つまり n 型領域とp型領域のキャリア密度が高いほど、空乏層幅が狭くなり、誘電率が小さいほど、空乏層幅が狭くなるということです。さらに、**空乏層は、キャリア密度が低い領域に伸びる**ことも分かります。つまり、pn 接合で、もしp型半導体領域のキャリア密度が n 型領域より小さければ、空乏層はp型領域に伸びます。逆も同じです。そして、拡散電位が大きい材料ほど、空乏層は伸びます。つまり禁制帯が広い材料ほど、空乏層が広がります。

PN 接合の静電容量(キャパシタンス)は、この空乏層  $w$  を挟んだ平行平板電極コンデンサーのように考えることが出来ます。電磁気学で平行平板電極コンデンサーのキャパシタンスが、単位面積当たり

$$C = \frac{\epsilon_s \epsilon_0}{w} \text{ で求められましたから、この } w \text{ に空乏層幅 } w \text{ を代入して、 } C = \epsilon_s \epsilon_0 \sqrt{\frac{2\epsilon_s \epsilon_0 V_D}{qN_D N_A} (N_A + N_D)}$$

図にシリコン半導体の pn 接合で、実際不純物濃度が変化すると、どれくらいの空乏層幅となり、単位面積あたりの接合容量がどれくらいになるかを図に示します。

### 例題

300K のシリコン pn 接合ダイオードにおいて、 $N_A=1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}, N_D=1 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  の場合、拡散電位はいくらか？また、ゼロバイアス電圧時の空乏層幅はいくらか？ミクロン単位で答えなさい。

但し、

シリコンの300Kにおける真性キャリア密度  $n_i$  は  $1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ . 比誘電率  $\epsilon_s$  は11.8とします。

真空の誘電率  $\epsilon_0$  は  $8.85 \times 10^{-14} [\text{F/cm}]$  です。  $1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm} = 10^{-6} \text{ m}$  です。

## 【拡散電位】

$$\frac{k_B T}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} = 2.59 \times 10^{-2} \text{ V}$$

$$V_D \cong \frac{k_B T}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_i^2} \right)$$

$$V_D = 2.59 \times 10^{-2} \times \ln \left\{ \frac{1 \times 10^{20} \times 1 \times 10^{17}}{(1.5 \times 10^{10})^2} \right\} \quad V_D = 0.99 \text{ V}$$

## 【ゼロバイアス電圧の空乏層幅】

$$w = \left[ \frac{2 \epsilon_s \epsilon_0 V_D}{q N_D N_A} (N_A + N_D) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$w = \left[ \frac{2 \times 11.8 \times 8.854 \times 10^{-12} [\text{F/m}] \times 0.99 [\text{V}]}{1.602 \times 10^{-19} [\text{C}] \times 1 \times 10^{26} [\text{m}^{-3}] \times 1 \times 10^{23} [\text{m}^{-3}]} \times (1 \times 10^{26} [\text{m}^{-3}] + 1 \times 10^{23} [\text{m}^{-3}]) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad 1 \mu\text{m} = 10^{-4} \text{ cm} = 10^{-6} \text{ m}$$

$$= 1.66 \times 10^{-7} [\text{m}] = 0.166 \mu\text{m}$$

参考

## Unit Prefixes\*

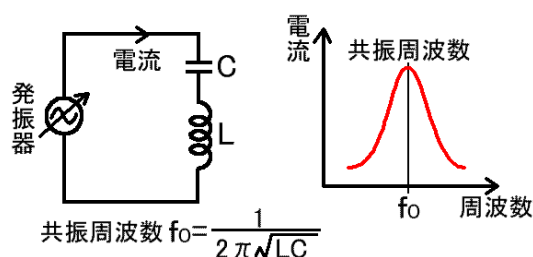
| Multiple  | Prefix | Symbol | Multiple   | Prefix | Symbol |
|-----------|--------|--------|------------|--------|--------|
| $10^{18}$ | exa    | E      | $10^{-1}$  | deci   | d      |
| $10^{15}$ | peta   | P      | $10^{-2}$  | centi  | c      |
| $10^{12}$ | tera   | T      | $10^{-3}$  | milli  | m      |
| $10^9$    | giga   | G      | $10^{-6}$  | micro  | $\mu$  |
| $10^6$    | mega   | M      | $10^{-9}$  | nano   | n      |
| $10^3$    | kilo   | k      | $10^{-12}$ | pico   | p      |
| $10^2$    | hecto  | h      | $10^{-15}$ | femto  | f      |
| 10        | deka   | da     | $10^{-18}$ | atto   | a      |

\*Adopted by International Committee on Weights and Measures. (Compound prefixes should not be used; e.g., not  $\mu\mu$  but p.)

## Physical Constants

| Quantity                   | Symbol           | Value                                                                             |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Angstrom unit              | $\text{\AA}$     | $1 \text{\AA} = 10^{-4} \mu\text{m} = 10^{-8} \text{ cm}$                         |
| Avogadro constant          | $N_{\text{AVO}}$ | $6.02204 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$                                         |
| Bohr radius                | $a_B$            | $0.52917 \text{\AA}$                                                              |
| Boltzmann constant         | $k$              | $1.38066 \times 10^{-23} \text{ J/K } (R/N_{\text{AVO}})$                         |
| Elementary charge          | $q$              | $1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$                                               |
| Electron rest mass         | $m_0$            | $0.91095 \times 10^{-30} \text{ kg}$                                              |
| Electron volt              | eV               | $1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$<br>$= 23.053 \text{ kcal/mol}$ |
| Gas constant               | $R$              | $1.98719 \text{ cal mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$                                     |
| Permeability in vacuum     | $\mu_0$          | $1.25663 \times 10^{-6} \text{ H/cm } (4\pi \times 10^{-9})$                      |
| Permittivity in vacuum     | $\epsilon_0$     | $8.85418 \times 10^{-14} \text{ F/cm } (1/\mu_0 c^2)$                             |
| Planck constant            | $h$              | $6.62617 \times 10^{-34} \text{ J-s}$                                             |
| Reduced Planck constant    | $\hbar$          | $1.05458 \times 10^{-34} \text{ J-s } (h/2\pi)$                                   |
| Proton rest mass           | $M_p$            | $1.67264 \times 10^{-27} \text{ kg}$                                              |
| Speed of light in vacuum   | $c$              | $2.99792 \times 10^{10} \text{ cm/s}$                                             |
| Standard atmosphere        |                  | $1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2$                                               |
| Thermal voltage at 300 K   | $kT/q$           | $0.0259 \text{ V}$                                                                |
| Wavelength of 1-eV quantum | $\lambda$        | $1.23977 \mu\text{m}$                                                             |

## 同調回路 (tuning or syntyony)



1898年にロッジ(Oliver Joseph Lodge)は同調回路(tuning or syntyony)に関する特許(U.S. Patent 609154, "Electric Telegraphy")を取得しました。これ以前の送信機と受信機は電気接点から出る火花の様な雑音に近くなり幅広い周波数の送受信が出来ましたが、この特許は無線通信で送信するある特定の周波数にのみにエネルギーを集中させ、受信機では受信する、ある特定の周波数の受信感度を最大にする働きを持った共振回路を

送信機と受信機に追加するもので、送信機の送信周波数と受信機の最大感度の周波数を一致させることによって通信能力を飛躍的に高めることができました。現在の送信機や受信機にも必須の回路です。このLC同調回路のCに、pn接合の静電容量を使う事が出来(実はLもpn接合で出来ますが)、電氣的に高速にCを変化させて周波数選択する事が可能になりました。