3－1 pn 接合の基本構成

pn 接合は、半導体デバイスの基本構成をなすものです。*p* 形半導体と *n* 形半導体が互いに隣接する *p* 形と *n* 形の 2 つの領域を、同じ結晶の内部で接合させたとき、その境界領域を ***pn* 接合**（*pn junction*）といいます。*p* 形領域と *n* 形領域は、互いに結晶格子で連続しているので、*pn* 接合を通して電子と正孔の移動が可能となります。

第 2 章で説明したように、伝導体の電子は、*n* 形半導体中に多量に存在しますが、*p* 形半導体中ではきわめて少ない量です。このため、濃度勾配による拡散によって電子は接合を通って *n* 側から *p* 側に移動します。同じように、*p* 形半導体の価電子帯に多量に存在する正孔も *p* 形から *n* 形に拡散により移動します。

この結果、境界近傍では *n* 側に正のドナーイオンが、*p* 側には負のアクセプタイオンが取り残されます。これらのイオンは、不純物原子がイオン化したもので、電子や正孔にくらべて重いので動くことができません。そのため、正負のイオンによって電子と正孔の拡散による移動を妨げる向きに**拡散電位差**（または**拡散電位**）V_D が生じます。拡散電位差のことを**電位障壁**または**接触電位差**ともいいます。

上記の接合前と接合後のキャリアである電子、正孔の移動とドナーとアクセプタによる不純物イオンの関係を図 3 － 1 に示します。同図（a）は、*pn* 接合を作る前の不純物イオンとキャリア（電子と正孔）の配置図を示します。• は電子を、◦ は正孔を示します。同図（b）は、接合後の不純物イオンと、電子と正孔の配置を示します。*p* 領域と *n* 領域の接合領域を遷移領域（または空乏層）といい、この領域にはドナーイオンとアクセプタイオンによる電界が存在することになります。同図（c）は拡散電位差のイメージを示したもので、縦軸に拡散電位差 V_D を、横軸に拡散距離 d を示したものです。拡散電位差によって生じる電界は $E_D = \dfrac{V_D}{d}$ となり、この電界がキャリアの移動を妨げることになります。

このように半導体の内部で電気的性質の異なる 2 つの領域の間の遷移部分を接合または**ジャンクション**（*junction*）といいます。

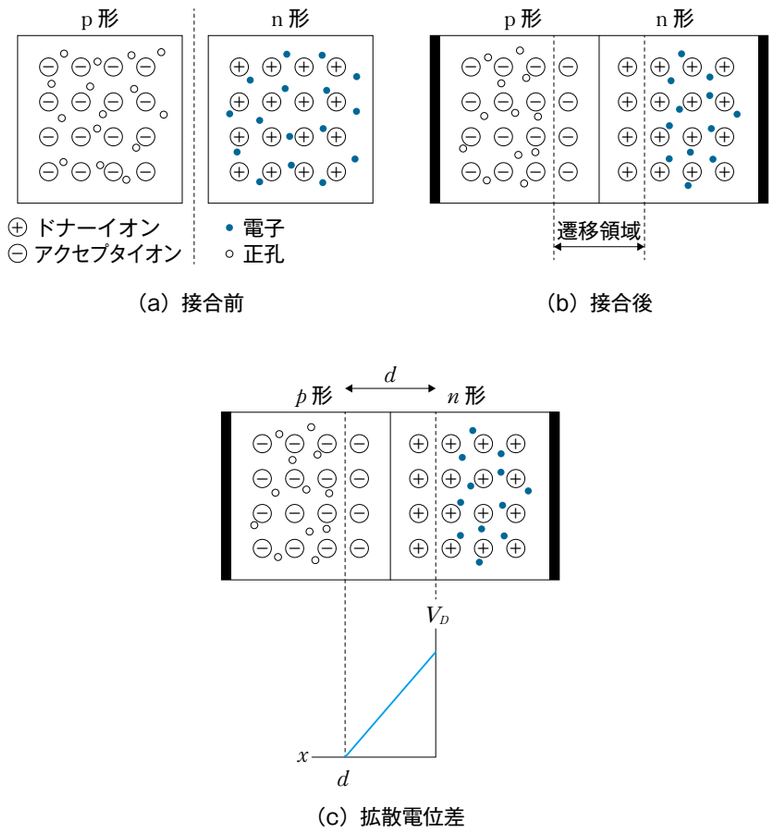
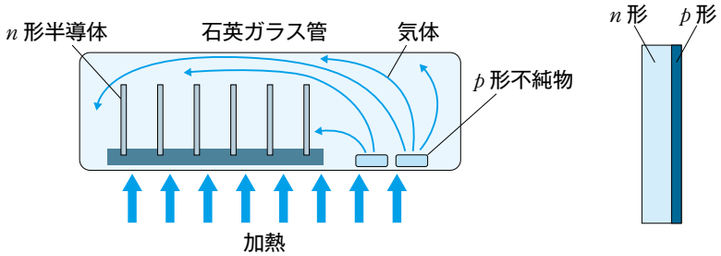


図 3 － 1　*pn* 接合の接合モデル

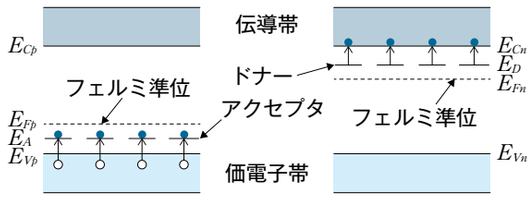
pn 接合の作り方にはいくつかの方法があります。目的に応じて使い分けられています。例えば、*n* 形半導体と *p* 形不純物を同じ石英管の中に入れて加熱すると、*p* 形不純物は気体となって *n* 形半導体の表面から内部に拡散し、*n* 形半導体の表面を *p* 形半導体に変えて *pn* 接合を作ります。製法のイメージを図 3 － 2 に示します。このように、半導体結晶中に不純物を拡散させることによって作られる接合を**拡散接合**（*diffused junction*）といい、半導体素子、半導体 *IC* を製作するための重要な製法となっています。



(a) 石英ガラス管の中で不純物拡散　　(b) 拡散後の *pn* 接合

図 3 − 2　*pn* 接合製法のイメージ

次に、上記の *pn* 接合について、エネルギーバンド図を用いて説明します。接合前の *p* 形半導体と *n* 形半導体のエネルギーバンド図を図 3 − 3 に示します※注。*p* 形半導体の伝導帯最低レベルを E_{Cp}、フェルミレベルを E_{Fp}、アクセプタレベルを E_A、価電子帯最高レベルを E_{Vp} とし、*n* 形半導体の伝導体最低レベルを E_{Cn}、ドナーレベルを E_D、フェルミレベルを E_{Fn}、価電子帯最高レベルを E_{Vn} とします。



(a) *p* 形半導体　　(b) *n* 形半導体

図 3 − 3　接合前の *p* 形半導体と *n* 形半導体のエネルギーバンド図

次に、接合後のエネルギーバンド図を図 3 − 4 に示します。接合後には遷移領域が形成されます。このときの拡散電位差 V_D は、*p* 領域の正孔密度 p_p、*n* 領域の正孔密度 p_n の比として、次式で与えられます。単位は [*eV*] です。

$$qV_D = q\,(V_{Fn} - V_{Fp}) = \frac{\kappa T}{q} log \frac{p_p}{p_n} \qquad (3-1)$$

この式からわかるように、*p* 領域の正孔濃度 p_p と *n* 領域の正孔濃度 p_n の比が

※注：第 2 章の図 2 − 7 と同じ。

大きいほど拡散電位差 V_D が大きくなります。遷移領域内のドナーイオンとアクセプタイオンは結晶中に取り込まれているため移動することができませんが、電子と正孔は拡散電位差によってそれぞれ *n* 領域と *p* 領域に移動します。そのため電子と正孔は遷移領域内には存在することはできません。

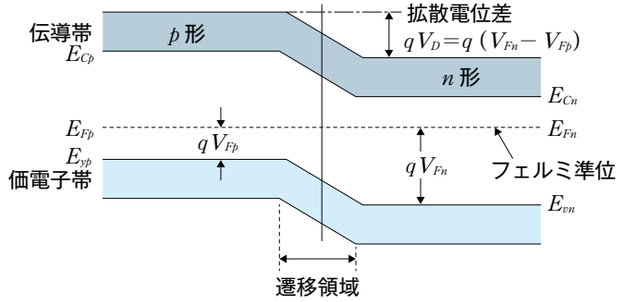


図 3 − 4　接合後のエネルギーバンド図※注

[例題 3 − 1]

温度 $T = 300$ [*K*] における *p* 領域の正孔濃度と電子濃度、*n* 領域の正孔濃度と電子濃度が次のように与えられている。*pn* 接合の拡散電位差を求めなさい。

$p_p = 3.29 \times 10^{18}$ [1 /*cm*³]、$n_p = 1.90 \times 10^{8}$ [1 /*cm*³]、
$p_n = 3.90 \times 10^{11}$ [1 /*cm*³]、$n_n = 1.60 \times 10^{15}$ [1 /*cm*³]、

[解答]

pn 接合の拡散電位差は、*p* 領域の正孔濃度 p_p と *n* 領域の正孔濃度 p_n の比を用いて、式（3 − 1）で求めることができます。または、*n* 領域の電子濃度 n_n と *p* 領域の電子濃度 n_p の比を用いても計算することができます。単位は [*eV*] です。

$$qV_D = \frac{\kappa T}{q} log \frac{p_p}{p_n}$$

$$qV_D = \kappa T\, log \frac{n_n}{n_p}$$

$$qV_D = \frac{\kappa T}{q} log \frac{p_p}{p_n} = \frac{1.380 \times 10^{-23} \times 300}{1.6 \times 10^{-19}} \times log \frac{3.29 \times 10^{18}}{3.90 \times 10^{11}} = 0.179\ [eV]$$

※注：エネルギーバンド図のエネルギーは [*eV*] の単位で表すので、接触電位差も qV_D[*eV*] として表している。

または

$$qV_D=\frac{\kappa T}{q}log\frac{n_n}{n_p}=\frac{1.380\times10^{-23}\times300}{1.6\times10^{-19}}\times log\frac{1.60\times10^{15}}{1.9\times10^{8}}=0.179\ [eV]$$

が得られます。ここで、ボルツマン定数 $\kappa=1.38\times10^{-23}\ [J/K]$ です※注。

答：0.179 [eV]

※注：第 2 章の 2 − 2 節を参照。

3−2 pn 接合の整流特性

3 つの異なる条件、すなわち、バイアスを加えない熱平衡状態、順方向に電圧を加えた場合、逆方向にバイアスを加えた場合の pn 接合部のキャリアの振る舞いと、pn 接合の整流特性について説明します。

3 − 2 − 1　熱平衡状態

最初に、印加電圧のない熱平衡状態における pn 接合について説明します（図 3 − 5）。

熱平衡状態では、多数キャリアの拡散による電流（$I_{diffusion}$）と拡散電位差による**ドリフト電流**（I_{drift}）とが平衡して（$I_{diffusion}=I_{drift}$）、接合を流れる全電流は零になります。拡散電位差によって拡散が抑えられるという意味です。n 領域では電位障壁 qV_D よりも高いエネルギー、すなわち E_{Cp} より上のエネルギーを有する電子密度を n_{n0}（図中の斜線部）とすれば、n_{n0} が p 領域の電子（p 領域の少数キャリア）n_p に等しく、全体として両領域の間の電子の移動が行われないためです。正孔についても同様で、E_{Vn} を超える正孔密度 p_{p0} は n 領域の正孔（n 領域の少数キャリア）p_n に等しく、全体として両領域の間の正孔の移動が行われません。

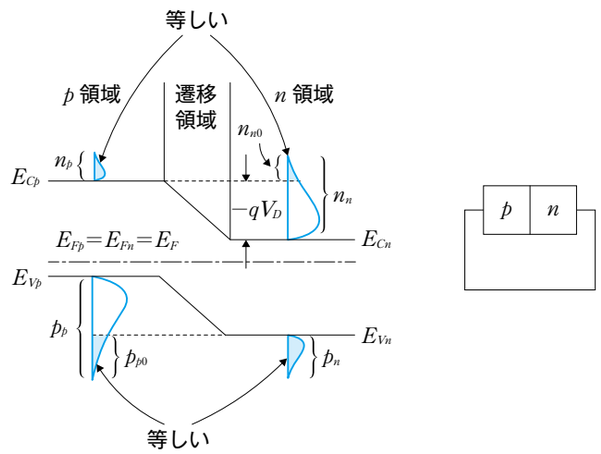


図 3 − 5　熱平衡状態における pn 接合