第 2 回　pn 接合

pn 接合

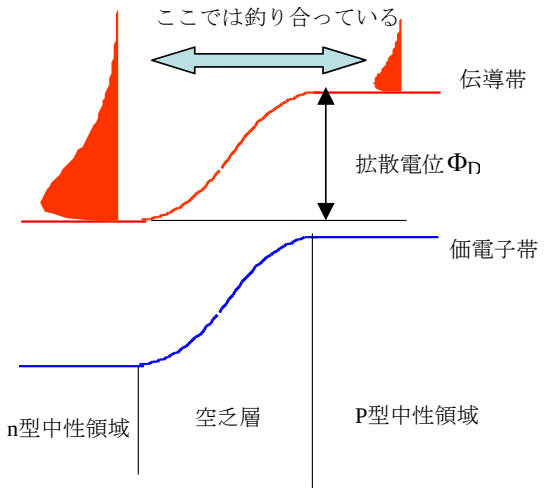
バイポーラ構造を実現するためには、pn 接合を使う。pn 接合を再確認しよう。pn 接合は p 層と n 層をくっつけたものであり、電圧が印加されないときは両方のフェルミ準位が一致する為に、バンドが曲がっている。電界が印加されたところでは急速にキャリヤが存在しなくなる。ここは**空乏層**と呼ばれる。キャリヤがいないので、不純物がそのまま表れ、一様な電荷が分布している領域でもあり、**空間電荷領域**とも呼ばれる。このバンドの曲がり方は、電荷に基づいてポアソンの方程式を解けばよい。第 5 回で行う。

空乏層の外側ではキャリヤと不純物の数が釣り合っている。それぞれ p 型**中性領域**,n 型中性領域と呼ぶ。この中性領域では N_A と N_D が各々電子、または正孔を作り出すための p,n 領域の不純物濃度とすると $n_n=N_A$、$p_p=N_D$ である。中性領域では、電荷が無いので、バンドは曲がらずフラットである。

空乏層でバンドが曲がっているのは拡散を止めるためとも考えられ、バンドの曲がっている電位差量は拡散電位Φ_Dと呼ばれる。またこの電位は内蔵電位とも呼ばれる。

> 正確には内蔵電位が曲がっている総量であり、拡散電位は、電子や正孔の拡散を止める電位である。従って、違う材料をくっつけると、電子と正孔で別々の拡散電位が定義できる。

電圧がかかっていない時は p 形中性領域の電子密度 n_p は熱平衡の状態でn_i^2/N_A（pn 積一定の関係を使った。）である。同時に n 型中性領域 n_n が電子の拡散電位Φ_D分だけ減少したと考えても良い。$n_{p0}=N_D\exp(-\frac{q\Phi_D}{kT})=\frac{n_i^2}{N_A}$。これより $\Phi_D=\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{N_AN_D}{n_i^2}\right)$ と拡散電位が出せる。



pn 接合の順方向電圧印加時

pn 接合の順方向に電圧 V を加える。電子は n 型中性領域領域から空乏層に入る。空乏層内の再結合過程は無いと仮定すると電子は空乏層を抜けて p 形中性領域に入る。入って来た電子は n 形中性領域では充分衝突していたが空乏層では衝突をしないで来ている。n 形の平衡状態のまま p 形にきている。

電圧がかかっているので、pn 接合の拡散を止める拡散電位が低くなる。従って p 型中性領域の一番に近い側を x=0 とすると、

$$n_p(0)=N_D\exp(-\frac{q(\Phi_D-V)}{kT})=n_{p0}\exp(\frac{qV}{kT})$$

ここで、p 層中の平衡状態の少数キャリヤ密度が n_{p0} である。
キャリヤの分布はボルツマン分布で仮定できることから、障壁の高さを変えるとキャリヤの数が指数関数的に変わっていくことになる。

本来ボルツマン分布はある準位で決まる分布だが、あるエネルギーから、その無限大までを積分しても、おなじボルツマン分布＝指数関数が残ることに注意しよう。

いま p 形中性領域は幅 W_p で、この中性領域では再結合が無視でき、それが終わると非常に再結合速度が速い層になるとしよう。この再結合速度が速い層は電極界面と考えても作れるし、強くドーピングした層で考えてもよい。すると、p 形中性領域が終わる場所では、少数キャリヤが平衡状態の n_{p0} となっていると考えることができる。

ここで、キャリヤの流れは $-D\frac{dn}{dx}$ だが、途中で再結合を無視すると流束は一定で、キャリヤ濃度の傾きも一定である。

そこで少数キャリヤ濃度は

$$n_p(x)-n_{p0}=\frac{W_p-x}{W_p}(n_{p0}\exp(\frac{qV}{kT})-n_{p0})$$

と表せ、傾きは $-\frac{n_{p0}}{W_p}(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$ 。流束は $\frac{n_{p0}D_n}{W_p}(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$ となる。電子を考えているので、-q を掛けて p 層での電子の拡散電流は

$J_{np}(\text{diffusion})=-qD_{np}\frac{n_{p0}}{W_p}(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$ となる。

一方、n 層にも正孔による電流が流れる。同様に n 形中性領域は幅 W_n でとして電流は

$J_{pn}(\text{diffusion})=-qD_{pn}\frac{p_{n0}}{W_n}(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$ となる。合わせて電流は、

$$J_{total}(\text{diffusion})=-(qD_{pn}\frac{p_{n0}}{W_n}+qD_{np}\frac{n_{p0}}{W_p})(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$$

なる。電流の符号は軸の定義の関係で負になっているが、通常は正にとる。

順方向に電流が流れるときは、バンドギャップより小さいものの、同程度の電圧を印加する。0.7V から 0.8V が目安である。kT は 26meV であり、60mV 変化すると $\exp(\frac{qV}{kT})$ は 10 倍変わる。0.72V では $\exp(\frac{qV}{kT})$ は 10^{12} であり、通常の順方向状態では、$(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$ は $\exp(\frac{qV}{kT})$ で近似できる。

<u>pn 接合の逆方向電圧印加時</u>

今度は V が負としよう。実は考え方は全く一緒である。ただし電圧方向が逆なので、拡散電位が高く見え、p 型の少数キャリヤが逆に n 型中性領域に流れ出す形になる。式の形は全く一緒で従って

$$J_{total}(\text{diffusion})=-(qD_{pn}\frac{p_{n0}}{W_n}+qD_{np}\frac{n_{p0}}{W_p})(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$$

である。V<-0.3V では $\exp(\frac{qV}{kT})$ は 10^{-5} より小さくなるので、$(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$ は-1 となり、一定の電流 $q(\frac{D_p n_{p0}}{W_p}+\frac{D_n p_{n0}}{W_n})$ に飽和する。この値は逆方向飽和電流 I_o と呼ばれる。

両方あわせると整流特性がでる。
すなわち、キャリヤが注入できる様に電圧が印加された場合は電流が流れるが、逆方向では電流が流れない。