

7 pn 接合ダイオード

7-1 少数キャリアの注入

(a) 熱平衡状態

外部電圧がない状態（熱平衡状態）では、p および n 領域のそれぞれのフェルミ準位は一致している。この時の伝導帯中の電子密度を考える（価電子帯中の正孔も同様に考えられる）。

・ p 領域の電子密度 n_{p0}

$$n_{p0} = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}\right)$$

・ n 領域の電子密度 n_{n0}

$$n_{n0} = N_C \exp\left(-\frac{E_{Cn} - E_{Fn}}{kT}\right)$$

ここで、 $E_{Cn} = E_{Cp} - qV_D$ であるので、

$$n_{n0} = n_{p0} \exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) \gg n_{p0}$$

今、外部電圧が無いので接合部に電流は流れない、言い換えると、接合部を横切る電子の移動はない。すなわち、p 領域の電子密度と n 領域の qV_D 以上のエネルギーを持つ電子の密度 $n_{n0} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right)$ が等しいことになる（Fig.1 の塗りつぶしている部分）。正孔密度の場合も同様である。これより、電子密度 n_{n0} は次のようになる。

$$n_{p0} = n_{n0} \exp\left(-\frac{qV_D}{kT}\right) \quad \cdots(6.4)$$

(b) 順方向バイアス電圧 V 印加状態

pn 接合に順方向の外部バイアス電圧を印加すると、両領域のフェルミ準位に qV の電位差が生じる。そのため伝導帯のエネルギー差は $E_{Cp} - E_{Cn} = q(V_D - V)$ となり、熱平衡状態よりも減少する。伝導帯中の電子密度は両領域とも変化しないが、障壁 $q(V_D - V)$ を越えるエネルギーを持つ n 領域の電子密度 $n_p(0)$ は

$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \gg n_{p0} \quad \cdots(7.1)$$

となり、両領域の電子密度の差 Δn は

$$\Delta n = n_p(0) - n_{p0} = n_{p0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

となる。それゆえ、拡散により p 領域に電子が流入する。同様に正孔密度の差 Δp は

$$\Delta p = p_{n0} \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right]$$

となり、拡散により n 領域に正孔が流入することになる。

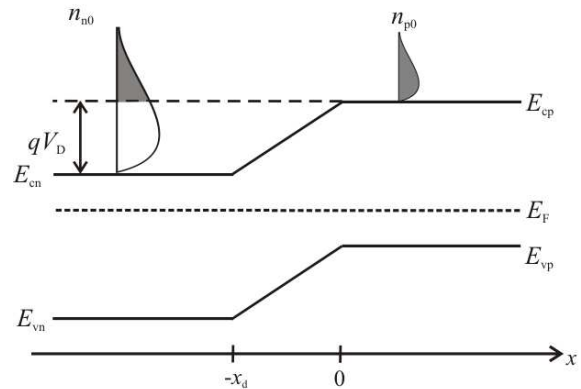


Fig.1 熱平衡時の pn 接合

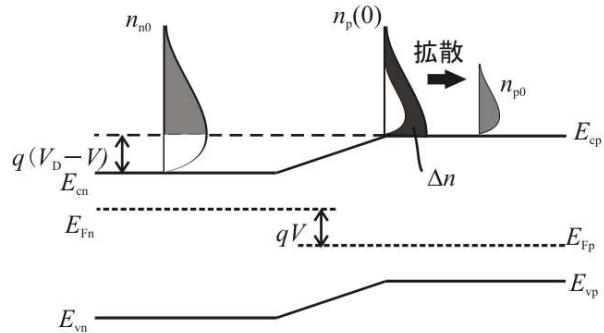


Fig.2 順方向バイアス電圧印加時の pn 接合

すなわち、順バイアスを印加することにより、各領域の少数キャリア密度が増加することになる（p 領域に電子が流入し、n 領域には正孔が流入してくる）。これを少数キャリアの「**注入 injection**」という。上式からわかるように、注入される少数キャリアは熱平衡時のキャリア密度に比例し、 $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1$ で増加することがわかる。特に大きな外部電圧 V の下では、少数キャリア密度は指数関数的に増加する。

(c) 逆方向バイアス電圧

pn 接合に逆方向の外部バイアス電圧を印加 ($V < 0$) すると、順バイアスと同様に両領域のフェルミ準位に qV の電位差が生じる (Fig.3)。両領域の伝導帯のエネルギー差は

$$E_{Cp} - E_{Cn} = q(V_D - V) = q(V_D + |V|)$$

となり、(キャリアにとっての) 障壁高さは大きくなる。この障壁を越えるだけのエネルギーを持つ電子密度 $n_p(0)$ は

$$n_p(0) = n_{p0} \exp\left(-\frac{q|V|}{kT}\right) \ll n_{p0}$$

となる。これより両領域の電子密度の差 Δn は

$$\Delta n = n_{p0} - n_p(0) = n_{p0} \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right) \right]$$

となり、p 領域の接合部付近の電子（少数キャリア）は n 領域に流れ込んでいく（遷移領域の内部電界による）。この少数キャリアの移動は順方向とは逆で、これを「**注出 extraction**」という。p 領域の電子は少数キャリアであり、密度も小さいので流れる電流値も小さい。また電圧を大きくしても電子密度は変化しないので電流値は一定、すなわち飽和する。

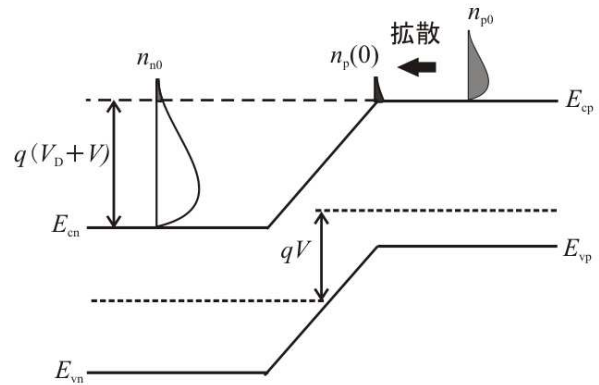


Fig.3 逆方向バイアス電圧印加時の pn 接合