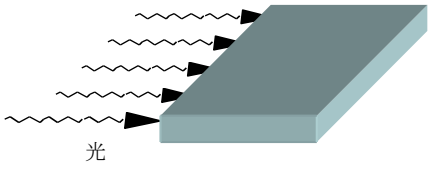
第７回　バイポーラトランジスタにおける再結合

今回は、式が面倒に成るからやめようと行っていた再結合の話をする。一般的なバイポーラの式には必ず入っているからあるが、デバイスの本質的理解とはあまり関係がないことにも注意しよう。

再結合がある場合の拡散の式

さて、もし半導体片の一つの側面からのみ光を照射し、その光は全て側面にある半導体表面のきわめて薄い層で吸収されるとしよう。するとこの薄い層に局所的に高濃度の少数キャリヤが発生し、拡散する。ここで拡散したあとでも平衡状態よりも多いキャリヤがいるので、それぞれの場所で再結合する。ある一カ所でみると再結合で減るキャリヤは $\frac{n-n_0}{\tau_n}$ である。この減るキャリヤは、隣の $x-\frac{\Delta x}{2}$ の点から流れ込むキャリヤ $-D_n\left.\frac{dn}{dx}\right|_{x=x-\frac{\Delta x}{2}}$ と反対の隣の $x+\frac{\Delta x}{2}$ の点から流れだすキャリヤ $-D_n\left.\frac{dn}{dx}\right|_{x=x+\frac{\Delta x}{2}}$ の差 $D_n\frac{d^2n}{dx^2}$ と等しい。従って $D_n\frac{d^2n}{dx^2}=\frac{n-n_0}{\tau_n}$ という微分方程式で、キャリヤの位置分布が表せる。

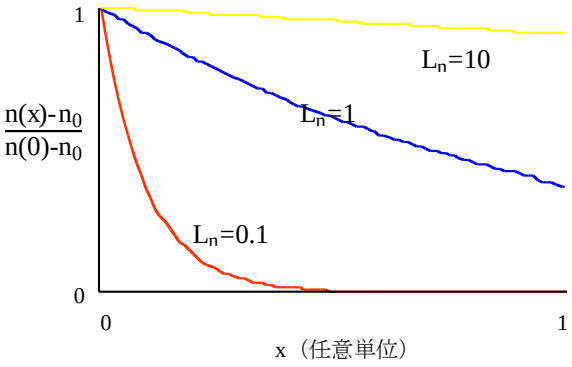
ちなみに、今は流れ出す端子がないので、少数キャリヤによる電流は全て多数キャリヤ側での電流（拡散およびドリフトがある）で打ち消されて電流の総和は 0 になることに注意しよう。



半導体片の一つの側面から光を照射

微分方程式を解いたキャリヤ濃度の一般解は $n-n_0=A\exp(-x/L_n)+B\exp(x/L_n)$ となる。ただし、**拡散長** $L_n=\sqrt{D_n\tau_n}$ を用いた。ここで、光が照射した表面を x=0 として、ここだけが n(0)に濃度が上がっており、また側面から距離無限大では平衡状態になっているとすると、$n(x)=(n(0)-n_0)\exp(-x/L_n)+n_0$ と表すことが出来る。

下に、拡散長が異なる三つの場合について、この式を用いて表したキャリヤ分布を図示する。



拡散長が異なる三つの場合についての
キャリヤ分布

ここでは、発生されたキャリヤが再結合で消えるメカニズムを考えた。しかし、電圧印加時を考えると平衡状態よりすくない状態を作り出すこともできる。この場合は、発生によってキャリヤを増やすメカニズムが働くが、この場合も同じキャリヤ寿命時間を通常使う。

pn 接合の特性

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。先に示した様に 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では、少数キャリヤは

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

。ここからあとは、光を照射した場合と同じなので、$n_p(x)-n_{p0}=A\exp(-x/L_{np})+B\exp(x/L_{np})$ の一般解に境界条件をいれたものになる。教科書での一般的な解法は、ここで拡散長よりも p 領域の厚さが充分厚いとして、無限に厚いところで平衡すると考えて解く方法である。もし、無限大までが続いているなら、光照射の場合と同じく $n_p(x)=(n_p(0)-n_{p0})\exp(-x/L_{np})+n_{p0}$ という形になる。拡散による流れは $-D_n\frac{dn}{dx}$、であり、これに電荷-q をかけると拡散電流になる。

$$qD_n\frac{d}{dx}n_p(x)=qD_n\frac{d}{dx}n_{p0}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp(-x/L_{np})$$

$$=-\frac{qD_nn_{p0}}{L_{np}}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)\exp(-x/L_{np})$$

見れば判る様に位置依存性がある。これは、電子で運ばれる電流は再結合によって正孔でのドリフト電流にドンドン変わる。中性領域と言っているが、実はほんの少し電流が流れるように傾きが生じている。

ドリフト電流が一番低いｐ層 x=0 での電流が全電流と等しく

$$J_n(\text{diffusion})=-q\frac{D_n n_{p0}}{L_{np}}(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$$ となる。

一方、p 層から n 層へ入る正孔による電流は

$$J_p(\text{diffusion})=-q\frac{D_{nE} p_{n0}}{L_{np}}(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$$ となり、これを併せて電流となる。

$$J_{total}(\text{diffusion})$$
$$=-(q\frac{D_{pn}p_{n0}}{L_n}+q\frac{D_{np}n_{p0}}{L_p})(\exp(\frac{qV}{kT})-1)$$

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。

逆方向でも同じ式が成り立つ。

<u>トランジスタのベース電流に対しての再結合電流の影響</u>

ベース電流対コレクタ電流の比を決める要因はさきに示したベースからエミッタへの正孔注入、ベースコレクタ接合でのなだれ効果以外にもベースでの再結合を考えるべきである。また、ベースからエミッタへの正孔注入でも、エミッタが厚い場合には再結合は無視できない。ここでは再結合の効果のみを考えよう。

<u>ベースでの再結合による影響</u>

ベース中での再結合もベース電流を作り出す。この場合、再びベース中性領域中のベース端を x=0、コレクタ端を $x=W_B$ として、ベース中の少数キャリヤ分布を出そう。

$n_B(0)=n_{B0}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$、$n_B(W_B)=n_{B0}$ を仮定して、一般解

$n_B(x)-n_{B0}=A\exp(-x/L_{nB})+B\exp(x/L_{nB})$ に当てはめればよい。ここで L_{nB} はベースの少数キャリヤの拡散長である。これを解くと

$$n_B(x)=\frac{n_{B0}\{\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1\}\sinh(\frac{W_B-x}{L_{nB}})}{\sinh(\frac{W_B}{L_{nB}})}+n_{B0}$$

がでる。通常は $\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ がかかる項だけが非常に大きく、他は無視して良い。そこで x で微分して拡散係数を掛けることで、ベース中の拡散電流

$$J_B(x)=-\frac{qD_{nB}n_{B0}}{L_{nB}}\frac{\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})\cosh(\frac{W_B-x}{L_{nB}})}{\sinh(\frac{W_B}{L_{nB}})}$$

が得られる。$x=W_B$ の電流が流れ出すコレクタ電流であり、

$$J_C(0)=-\frac{qn_{B0}D_{nB}}{L_{nB}}\frac{\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})}{\sinh(\frac{W_B}{L_{nB}})}$$ となる。

x=0 での電流

$$J_B(0)=-\frac{qn_{B0}D_{nB}}{L_{nB}}\frac{\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})\cosh(\frac{W_B}{L_{nB}})}{\sinh(\frac{W_B}{L_{nB}})}$$ と

$x=W_B$ での電流の差がベース電流となる。正孔との再結合で無くなった分の正孔は、ベース端子から横方向に流れ込む正孔によって補充される。ここでは先に習って、エミッタ端から流れ込んだベース中電子拡散電流とコレクタ端から流れ出すベース中電子拡散電流の比；<u>輸送効率 α_T</u>だけを求めると、

$\alpha_T=\cosh(\frac{W_B}{L_{nB}})^{-1}\cong 1-\frac{1}{2}(\frac{W_B}{L_{nB}})^2$ になる。ここで、$\tau_B=\frac{W_B^2}{2D_{nB}}$ と $L_{nB}=\sqrt{D_{nB}\tau_{nB}}$ とを考えると $\alpha_T=1-\frac{\tau_B}{\tau_{nB}}$ とも書ける。すなわちベース走行時間とベース中の少数キャリヤ寿命時間でベースでの再結合を割合が決まる。

現在のトランジスタでは再結合が抑制されていることから、ベース中での再結合によって生成されるベース電流は、エミッタへの正孔注入による電流に較べて 1/100 以下であり、通常は無視して良い。しかしながら、極端にベースを厚くしたりすると無視できない。

このエミッタのキャリヤ濃度の高さは時として再結合を大きくして、上記二つの中間的な式によってエミッタへの正孔電流を表す様になる。再びエミッタ幅 $x=-W_E$ で、オーミック電極を設定しここの界面では非常に早い再結合として一般解

$p_E(x)-p_{E0}=A\exp(-x/L_{pE})+B\exp(x/L_{pE})$

で解くと、

$$p_E(x)=\frac{p_{E0}\{\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1\}\sinh(\frac{W_E-x}{L_{pE}})}{\sinh(\frac{W_E}{L_{pE}})}+p_{E0}$$

となり、電流は

$$J_B(0)=-\frac{qp_{E0}D_{pE}}{L_{pE}}\frac{\{\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-1\}}{\sinh(\frac{W_E}{L_{pE}})}$$ となる。

本来、透明(再結合しない)エミッタと有限の再結合速度を持ったポリシリコン-シリコン界面での例がエミッタとしては最も多用されている例であろう。しかしこの例は通常の学部の講義の範囲から逸脱し、また今までの枠組みで容易に計算できることからここでは説明しない。