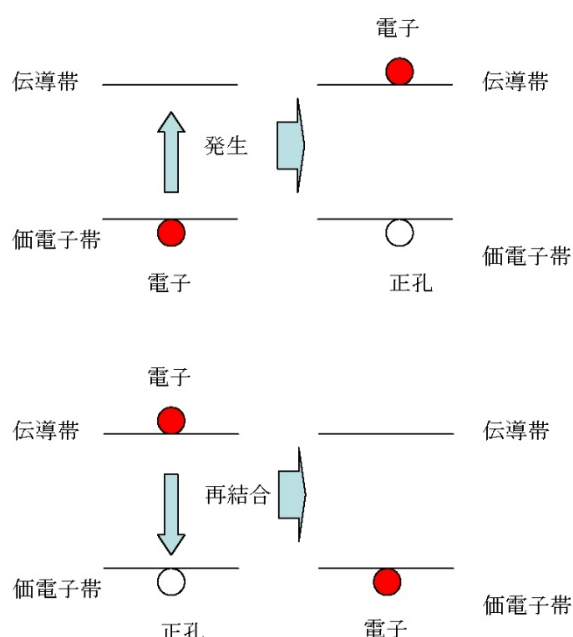


第7回 バイポーラトランジスタにおける再結合

今回は、式が面倒に成るからやめようと思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。まず最初は定義から

平衡に戻ろうとする力：発生と再結合

拡散とドリフトはキャリアが移動する現象だが、もし一様にキャリアが発生する状態（光を全面照射された様な状態）を作り出すと、キャリアは動かずに消滅することで平衡点に近づこうと努力をする。これが電子と正孔が一緒になる再結合である。（エネルギーを放出する：熱や光等）



光照射による発生は一方のキャリアだけが出来るわけではなく、価電子帯の電子がエネルギーを貰って伝導帯に上がることで、価電子帯の正孔と伝導体の電子を同時に作っている。

一様に光照射をして、キャリアが発生すると、始めはキャリアの数が増える。しかし平衡状態から離れると、熱などを放出して再結合して元に戻ろうとする。いま、光照射による単位時間当り、単位体積当りの少数キャリアの発生量を g 、再結合による単位時間当り、単位体積当りの少数キャリアの消滅する量を r とすると、定常状態では $g=r$ となり、キャリアの数は一定となる。すなわち r は平衡状態からキャリアの数が離れると増える。これを比例とし、一つの定数

$$r = \frac{n-n_0}{\tau_n}$$

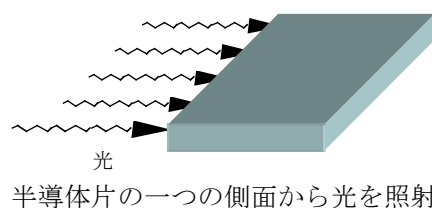
で表そうとすると、 τ_n となる。ここでは p 型中の電子を考え、平衡状態のキャリアを n_0 、寿命時間を τ_n とした。

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アが発生し、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アがいるので、それぞれの場所で再結合する。ある一カ所でみると

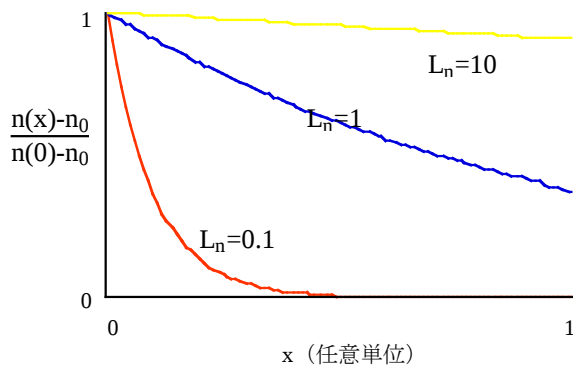
再結合で減るキャリアは $\frac{n-n_0}{\tau_n}$ である。この減るキャリアは、隣の $x-\frac{\Delta x}{2}$ の点から流れ込むキャリア $-D_n \frac{dn}{dx} \bigg|_{x=x-\frac{\Delta x}{2}}$ と反対の隣の $x+\frac{\Delta x}{2}$ の点から流れ出すキャリア $D_n \frac{dn}{dx} \bigg|_{x=x+\frac{\Delta x}{2}}$ の差 $D_n \frac{d^2n}{dx^2} \Delta x$ と等しい。従って $D_n \frac{d^2n}{dx^2} - \frac{n-n_0}{\tau_n} = 0$ という微分方程式で、キャリア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、少数キャリアによる電流は全て多数キャリア側での電流（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。



微分方程式を解いたキャリア濃度の一般解は $n-n_0 = A \exp(-x/L_n) + B \exp(x/L_n)$ 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ア分布を図示する。



拡散長が異なる三つの場合についての
キャリア分布

ここでは、発生されたキャリア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アを増やすメカニズムが働くが、この場合も同じキャリア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、少数キャリアは

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

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。

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

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

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

一方、p 層から n 層へ入る正孔による電流は

$$J_p(\text{diffusion}) = -q \frac{D_p p_{n0}}{L_{np}} \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \text{ となり、}$$

これを併せて電流となる。

$$J_{\text{total}}(\text{diffusion})$$

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

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。

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

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。

ベースでの再結合による影響

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ア分布を出そう。

$$n_B(0) = n_{B0} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right), \quad n_B(W_B) = n_{B0} \text{ を仮定}$$

して、一般解

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

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

がでる。通常は $\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)$ 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、

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

$x=0$ での電流

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

$x=W_B$ 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；輸送効率 α_T だけを求めると、

$$\alpha_T = \cosh(\frac{W_B}{L_{nB}})^{-1} \cong 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_B}{L_{nB}}\right)^2 \text{ になる。ここ}$$

$$\text{で、 } \tau_B = \frac{W_B^2}{2D_{nB}} \text{ と } L_{nB} = \sqrt{D_{nB}\tau_{nB}} \text{ とを考える}$$

$$\text{と } \alpha_T = 1 - \frac{\tau_B}{\tau_{nB}} \text{ とも書ける。すなわちベース走行}$$

時間とベース中の少数キャリア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ア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と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

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

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。