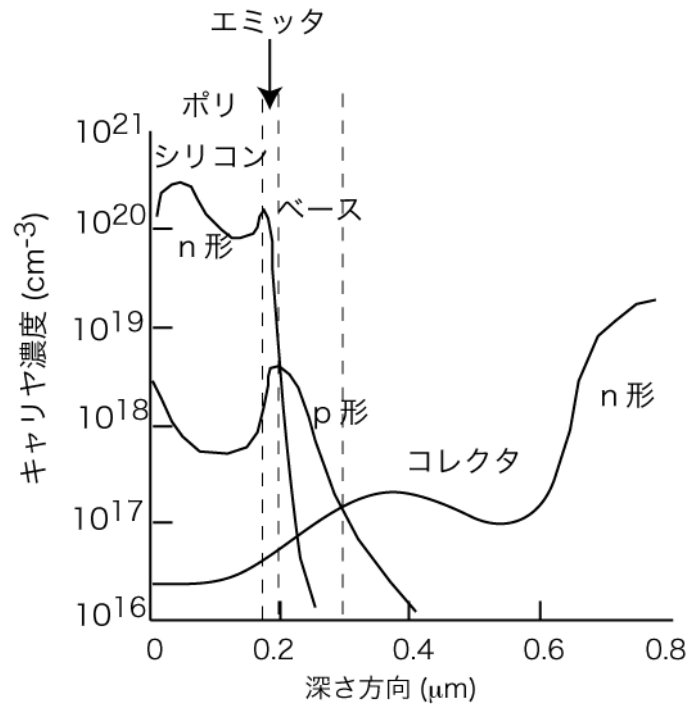


第2回 バイポーラトランジスタの動作

バイポーラトランジスタは世界で始めてできたトランジスタである。1947年にベル研究所のブラッティンとバーディーンがゲルマニウムに針をたてていて、発見した。1949年にショックレーがpn接合理論と接合型トランジスタを提案して、この3人がノーベル賞を貰っている。バイポーラトランジスタは、少数キャリアを使うところに特徴がある（多数キャリアだけならユニポーラトランジスタ）。初期のトランジスタや集積回路はすべてバイポーラトランジスタでできている。その後1960年にMOSトランジスタが発明（CMOSは1963年）され、80年代にMOSが強くなり、デジタル回路における主流が入れ替わったのは90年位だったので、いまのところトランジスタの歴史の多くを占めるのはバイポーラであり、その歴史的経緯によりアナログ回路では未だバイポーラトランジスタが使われている例が多い。（と言っても最近はこちらもMOSに浸食され始めている。）

さらに大電流・大電圧を扱う場合には、バイポーラの概念は必須となる。またMOSもpn接合は使っているので、寄生で（良くない）バイポーラトランジスタが出来るときもある。ということで、バイポーラトランジスタもやはり未だ必須である。そこでここからはバイポーラトランジスタについて始めよう。

バイポーラトランジスタは、高校の教科書で習ったかもしれないが、npnの三層構造である。各層にエミッタ(Emitter)-ベース(Base)-コレクタ(Collector)という名前を付けている。またpnp構造でもトランジスタは同様に動作するが、電子と正孔を置き換えれば動作が理解できること、現時点でバイポーラに残された応用が高速応用であり、その場合移動度/拡散定数の差でnpn構造が有利であることから、ここではnpn構造のみを扱う。また一般的には再結合（平衡状態から外れた少数キャリアが多数キャリアと結合して消滅するプロセス）を考慮することが多いが、現在のSiバイポーラトランジスタでは、通常の動作では半導体中の再結合はほとんど無視できる。一方、再結合を考慮すると、式が難しくなる。そこで、再結合無しで出来るだけ行う。



現在のバイポーラトランジスタのキャリア濃度分布

コレクタ電流

通常バイポーラを動作させるときには、エミッタ-ベース間に順方向になる電圧 $V_{BE} > 0$ を印加して、ベース-コレクタ間には逆方向になる電圧 $V_{BC} < 0$ (時として0の時もあるが)を印加することが通常である。エミッタ-ベース間pn接合の順方向に電圧 $V_{BE} > 0$ を加えると、電子はn型エミッタの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形ベース中性領域に入る。入って来た電子はn型エミッタ中性領域では充分衝突していたが空乏層ではほぼ衝突をしないで来る。n形の平衡状態のままp形ベースにきている。

電圧がかかっているの、pn接合の拡散を止める拡散電位が低くなる。従ってp型ベース中性領域のエミッタ側端面を座標 $x=0$ とすると、少数キャリア濃度は、

$$n_B(0) = n_{E0} \exp\left(-\frac{q(\Phi_D - V_{BE})}{kT}\right) = n_{B0} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \text{ となる。ここで、}$$

n_{E0} はエミッタの平衡時の多数キャリア濃度、 n_{B0} はベースの平衡時の少数キャリア濃度である。

中性領域のベース幅を W_B とすると、ベース中性領域内でのコレクタ側端面での少数キャリア濃度は、コレクタ側の平衡状態になるはずなので、

$$n_B(W_B) = n_{B0} \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \text{ となる。順方向に加える電圧}$$

V_{BE} は通常 0.4-1 V であり、このとき $\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right)$ は、 $5 \times 10^6 \sim 5 \times 10^{16}$ という非常に大きな数となる。一方 $V_{BC} < 0$

では $\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right)$ は 1 より小さいので、比較すると非常に小さな値になる。そこで事実上 $n_B(W_B)$ は 0 と考えて

良い。ここで、 $n_{B0} \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) < 1$ ということは、コレクタ側に電子が抜け出すことで、ベースでの電子の平衡状

態がコレクタと同じになっているという見方がする必要がある。

ベースの両端のキャリア濃度が決まり、中性領域内は電界が無いので、拡散による電流を考慮すればよいことになる。

一般的には再結合を考慮しながら拡散を考慮する必要がある。しかし Si においては、間接遷移なので直接遷移における再結合の主メカニズムである発光遷移またはオージェ遷移(他の電子にエネルギーを与える)は非常に少ない。従って禁制帯中の深い不純物等の再結合中心を介した遷移が中心(Shockley-Read 再結合)であるが、これが充分起こるのに必要な拡散長とわれる長さは数 μm から数 mm あり、通常のデバイスサイズに比べて考えると、再結合は無視出来る場合が多い。

キャリアの流れは $-D_n B \frac{dn_B}{dx}$ だが、途中で再結合を無視すると流束は一定で、キャリア濃度の傾きも一定。そこで両端での大きなキャリア濃度の差を考えると、 $x=0$ で $n_B(0)=n_{B0}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ 、 $x=W_B$ で $n_B(W_B)=0$ と考えてその間を直線で結んだキャリア分布で考えれば良い。

すると傾きは $\frac{n_{B0}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})}{W_B}$ 。流束は $\frac{n_{B0}D_n B \exp(\frac{qV_{BE}}{kT})}{W_B}$ となる。電子を考えているので、 $-q$ を掛けてベース中の電子の拡散電流は

$J_C = -qD_n B \frac{n_{B0}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})}{W_B}$ であり、これがコレクタ電流となる。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。

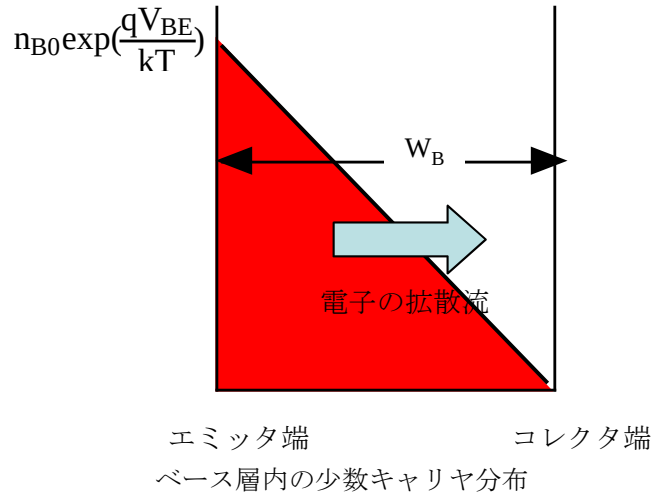
指数関数的であり、ベースエミッタ間の電圧が 60 mV 変化すると 10 倍変わる電流変化となる。

ただし、この式は直感的理解を重視したこと、いくつかの問題点がある。

まず、 $n_B(W_B)$ を 0 にしたことによる。 $V_{BE}=0$ でも式では電流が流れる形になっていることと、また V_{BC} 依存性が全く無くなってしまったことに影響が出ている。この二つをきちんと入れるためには、

$n_B(W_B)=n_{B0}\exp(\frac{qV_{BC}}{kT})$ とすればよく

$J_C = -qD_n B \frac{n_{B0}}{W_B} (\exp(\frac{qV_{BE}}{kT}) - \exp(\frac{qV_{BC}}{kT}))$ となる。しかし正常動作状態では、 $n_B(W_B)$ を 0 としても得られる電流値は同じである。



さて、まずはコレクタ電流がでた。この駆動状態ではベース-エミッタ電圧にのみ依存していることになる。ただしこのままではベース電流が流れない。トランジスタとしては実は流れなくても良いのだが、バイポーラトランジスタは通常コレクタ電流の百分の一程度のベース電流が流れ、素子の動作上無視できない。

ベース電流 ベースからエミッタへの正孔注入

ベース電流を決める要因は三つある。ベースからエミッタへの正孔注入、ベースでの再結合、およびベースコレクタ接合でのなだれ効果である。なだれ効果は、通常のデバイス動作では抑制するように心がける。また、再結合によるベース電流は通常のシリコンバイポーラトランジスタでは、ベースからエミッタへの正孔注入の 1/100 以下の働きしかしない。そこで、ここでは、ベースからエミッタへの正孔注入だけで説明する。

ベースエミッタ接合の正孔に注目しよう。順方向バイアスが加わった場合、エミッタ中性領域のベース端を $x=0$ として考えると、少数キャリア側も

$p_E(0)=p_{E0}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ とバイアス分大きくなり、エミッタ中性領域で拡散電流が流れるようになる。ここで p_{E0} はエミッタでの平衡時の少数キャリア濃度である。

さて、現在のバイポーラトランジスタのキャリア濃度分布に示したように、エミッタ層は非常に薄く、ここの再結合を無視しても良い。そしてポリシリコンの電極層に達するが、ポリシリコン/シリコン界面で再結合が起こり、少数キャリアは少なくなる。ここでもっとも簡単な近似として、エミッタ幅 $x=-W_E$ で、オーミック電極となるポリシリコン層が始まるとして、ここの界面では非常に早い再結合(すなわち $p_E(-W_E)=p_{E0}$)であると考えよう。 $L_p \gg W_E$ を仮定すると、通常 $p_E(0) \gg p_{E0}$ なので、ベースの時の同様に単純な直線で表せ

$p_E(x) \approx p_E(0)(1 + \frac{x}{W_E})$ となる。ベース端 $x=0$ での電流

$J_{pE}(\text{diffusion}) = -q \frac{D_p p_E(0)}{W_E} \exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ がベース電流となる。

注入効率・電流伝送率と電流増幅率

ベース電流もコレクタ電流も $\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ の依存性を持つので、比例する。またベース電流はコレクタ電流と併せてエミッタ電流の一部となる。コレクタ電流が興味の対象なので、エミッタ電流に対するコレクタ電流（正確にはベース中に入る電子拡散電流）の比を注入効率と呼び α_E で表す。ベース電流とコレクタ電流はベースエミッタ電圧に対して同じ依存性を持つことから、その注

$$\alpha_E = \frac{\frac{D_n n_{B0}}{W_B}}{\frac{D_p p_{E0}}{W_E} + \frac{D_n n_{B0}}{W_B}} = \left(1 + \frac{D_p W_B N_B}{D_n W_E N_E}\right)^{-1}$$

入効率は $\frac{W_E}{W_B}$ となり、電圧に依存しない。

注入効率を 1 に近づけるためには、 $N_E \gg N_B$ が必要である。

注入効率以外にもベース中の再結合によりコレクタ電流が減ることをしめす輸送効率、ベースコレクタ接合でのなだれ効果によるコレクタ効率も厳密には考えるべきであるが、通常の動作状態では、どちらも注入効率に較べてずっと 1 に近いので、ここでは無視する。（コレクタ効率は第 3 回で、輸送効率は第 7 回で扱う。）

コレクタ電流対エミッタ電流の比率は電流伝送率 α と

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

呼ばれ、 $\frac{I_C}{I_E}$ である。この α は、ほぼ α_E と等しい。

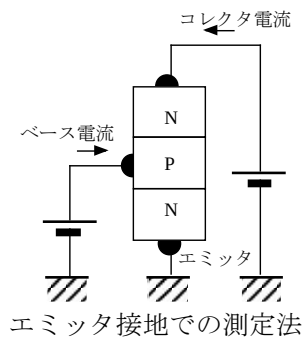
またトランジスタの使い方は、エミッタ接地回路で使うことが最も一般的であるが、その場合は、ベース電流でコレクタ電流を制御ようになる。この比は電流増

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

幅率 β と呼ばれ $\frac{I_C}{I_B}$ であり、 β と α には

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} = \frac{I_C}{I_E - I_C} = \frac{I_C/I_E}{1 - I_C/I_E} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

の様な関係がある。 β は普通、数十から数百程度の値である。したがって α は 1 に非常に近い。



高い電流増幅率を満たすために必要な条件は

エミッタキャリア濃度 > ベースキャリア濃度 (注入効率改善のため)

薄いベース幅 (コレクタ電流増大の為)
が代表的な条件である。