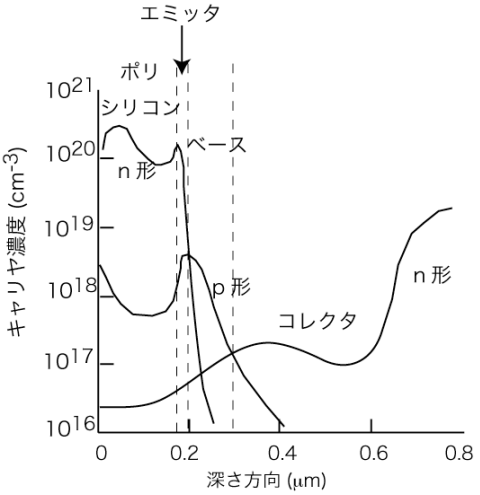
第 6 回　バイポーラトランジスタの動作

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、少数キャリヤを使うところに特徴がある（多数キャリヤ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れも 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。

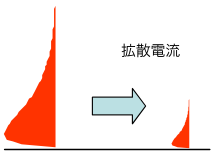
トランジスタに拡張しよう。皆さんご存じのように npn の三層構造である。通常のトランジスタでは、各層にエミッタ(Emitter)-ベース(Base)-コレクタ(Collector)という名前を付けている。また pnp 構造でもトランジスタは同様に動作するが、電子と正孔を置き換えれば動作が理解できること、現時点でバイポーラに残された応用が高速応用であり、その場合移動度/拡散定数の差で npn 構造が有利であることから、ここでは npn 構造のみを扱う。また一般的には再結合（平衡状態から外れた少数キャリヤが多数キャリヤと結合して消滅するプロセス）を考慮することが多いが、現在の Si バイポーラトランジスタでは、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ヤ濃度分布

拡散

バイポーラトランジスタを扱うときの最低限の半導体の物理をおさらいしよう。あるところが局所的に高い濃度のキャリヤがあると、その濃度を下げるために、濃度勾配を打ち消すようにキャリヤが動く。通常拡散定数を D とすると、拡散による流れは $-D\frac{dn}{dx}$ である。この拡散による電流がバイポーラトランジスタの動作原理である。電流とするには電子については電荷が-q であることを考慮して $J_n(\mathrm{diffusion})=qD_n\frac{dn}{dx}$ (但し　J_n は電流密度、q は単位電荷、D_n は電子の拡散定数)。正孔についても同様で $J_p(\mathrm{diffusion})=-qD_p\frac{dp}{dx}$ (但し　J_p は電流密度、D_p は正孔の拡散定数)。

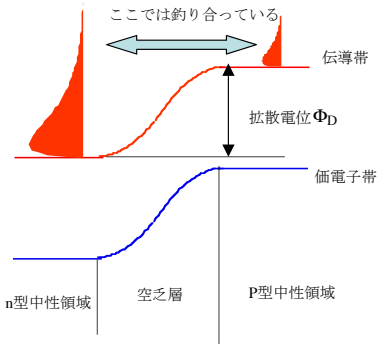


pn 接合

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。ここを空乏層あるいは空間電荷領域等と呼ぶ。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 型中性領域とする。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。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。



コレクタ電流

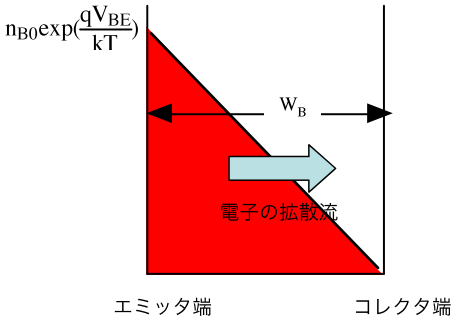
通常バイポーラを動作させるときには、エミッタ-ベース間に順方向になる電圧 $V_{BE}>0$ を印加して、ベースコレクタ間には逆方向になる電圧 $V_{BC}<0$ (時として 0 の時もあるが)を印加することが通常である。さて、ベース中性領域内でのエミッタ側端面での少数キャリヤ濃度は $n_B(0)=n_{BO}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ となる。一方、中性領域のベース幅を W_B とすると、ベース中性領域内でのコレクタ側端面での少数キャリヤ濃度は $n_B(W_B)=n_{BO}\exp(\frac{qV_{BC}}{kT})$ となる。順方向に加える電圧 V_{BE} は通常 0.4-1 V であり、このとき $\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ は、5×10^6 ～5×10^{16} という非常に大きな数となる。一方 $V_{BC}<0$ では $\exp(\frac{qV_{BC}}{kT})$ 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。ベースの両端のキャリヤ濃度が決まり、中性領域内は電界が無いので、再結合を考慮しながら拡散による電流を考慮すればよいことになる。

しかしながら、通常 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、拡散長は数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。キャリヤの流れは $-D_{nB}\frac{dn_B}{dx}$ だが、途中で再結合を無視すると流束は一定で、キャリヤ濃度の傾きも一定。そこで両端での大きなキャリヤ濃度の差を考えると、x=0 で $n_B(0)=n_{BO}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$、$x=W_B$ で $n_B(W_B)=0$ と考えてその間を直線で結んだキャリヤ分布で考えれば良い。

すると傾きは $-\frac{n_{BO}}{W_B}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$。流束は $\frac{n_{BO}D_{nB}}{W_B}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ 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 $J_C=-qD_{nB}\frac{n_{BO}}{W_B}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ であり、これがコレクタ電流となる。

ただし、この式は直感的理解を重視したことから、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、$n_B(W_B)=n_{BO}\exp(\frac{qV_{BC}}{kT})$ とすればよく $J_C=-qD_{nB}\frac{n_{BO}}{W_B}(\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})-\exp(\frac{qV_{BC}}{kT}))$ 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正しい。



ベース層内の少数キャリヤ分布

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。

<u>ベース電流</u>　ベースからエミッタへの正孔注入

ベース電流対コレクタ電流の比を決める要因は大きく三つある。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。なだれ効果はコレクタの設計と深く関わり、通常のデバイス動作では抑制するように心がける。また、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し、ベース電流がコレクタ電流と比例していることを示す。

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の少数キャリヤも $p_E(0)=p_{E0}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ とバイアス分大きくなり、拡散電流が流れるようになる。
さて、現在のバイポーラトランジスタのキャリヤ濃度分布に示したように、エミッタ層は非常に薄く、やはり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、少数キャリヤは少なくなる。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。
$L_{pE}>>W_E$ を仮定すると、通常 $p_E(0)>>p_{E0}$ 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 $J_{pE}(\mathrm{diffusion})=-q\frac{D_{pE}p_{E0}}{W_E}\exp(\frac{qV_{BE}}{kT})$ が電流となる。ここで出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<u>注入効率</u>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ろから、その注入効率は

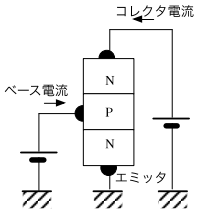
$$\alpha_E=\frac{\frac{D_{nB}n_{B0}}{W_B}}{\frac{D_{pE}p_{E0}}{W_E}+\frac{D_{nB}n_{B0}}{W_B}}=(1+\frac{D_{pE}W_BN_B}{D_{nB}W_EN_E})^{-1}$$

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、$N_E>>N_B$ が必要である。

<u>電流伝送率と電流増幅率</u>

以上のようにコレクタ電流とベース電流は比例の関係にある。このコレクタ電流対エミッタ電流の比率は電流伝送率 α と呼ばれ、$\alpha=\frac{I_C}{I_E}$ である。この α は、ほぼ α_E と等しい。当然ながら α は 1 に非常に近い。

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するようになる。この比は電流増幅率 β と呼ばれ $\beta=\frac{I_C}{I_B}$ 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。



エミッタ接地での測定法

高い電流増幅率を満たすために必要な条件は
　エミッタキャリヤ濃度>ベースキャリヤ濃度(注入効率改善のため)
が代表的な条件である。