第 1 回 トランジスタの増幅とはなにか/ および半導体の物理の復習

トランジスタってなんだ？

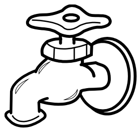
トランジスタとは、増幅またはスイッチ動作をさせる半導体素子で、電子工学のほぼすべてで使われている。

半導体メモリ・マイクロプロセッサ・その他の論理回路では、膨大なトランジスタが入っている。例えばインテルの第五世代 Core プロセッサ(2015)では 13 億個のトランジスタが、Apple の iPhone7 に入っている A10（2016）は 33 億個のトランジスタが入っている。

また、信号を大きくする操作、例えば携帯電話の送信を 1W 程度の出力まで大きくしたり、受信した信号レベルを論理回路などほかの回路に使えるまで大きくしたりなども行っている。

トランジスタの増幅/スイッチ

まず、はじめに増幅と言う概念を整理しよう。増幅の機能は電気信号を大きくすることである。電気信号のエネルギーを大きくすると言っても良い。しかし、何も無いところからエネルギーを大きくするのはエネルギー保存則に反する。ここでいう増幅とは、大きな信号を小さな信号で制御すれば良いのだから、電源/電池などの大きな直流エネルギー等を小さな信号で操作することをもって増幅と呼ぶ。トランジスタのイメージとしてよく使われるのは、ダムでの放水や蛇口の開閉による水の出入りである。



半導体の中で電流を流すのは、電子または正孔である。

信号にデジタルとアナログがあるので、増幅にもその二つの考え方がある。

デジタルでは、01 の世界なので、インバーターで考えるとノイズで 1 より小さくなった信号をきれいな 0 に、ノイズで 0 より大きくなった信号をきれいな 1 にする。スイッチとして考えることもできる。

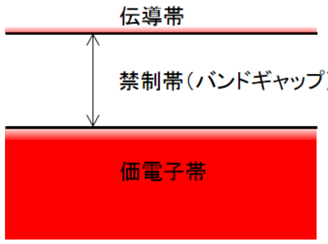
アナログでは入ってくる信号強度に比例させた信号を出す。通常の電子デバイスはこの比例での増幅を基本とする。出力はできれば理想的な電流源(すなわち電圧とは関係なく制御された電流が出る)または電圧源(すなわち電流とは関係なく制御された電圧が出る)の方が回路に組み込むときに使いやすい。

電子デバイスで扱うトランジスタは、通常出力としては電流源であり、その電流量を入力で制御する形である。入力は通常電圧と扱うのが原理としては望ましいが、バイポーラトランジスタの場合は電流として扱う方が線形的で扱いやすいので、こちらで扱う例も多い。

ここから、バイポーラトランジスタを扱うときの最低限の半導体物性をおさらいし、必要な半導体物理の言葉を確認しよう。

半導体のバンド構造

半導体のバンド構造は、電子がいられないバンドギャップ（禁制帯）とその上の電子が流れる伝導帯と、電子でほぼ充たされて正孔が流れる価電子帯という状態がある。



ドーピング・ドーパント

普通、半導体は不純物によりドーピングされ、電子または正孔のどちらかが多い状態になっている。熱平衡時状態に電子が多ければ n 形(n>p)、低ければ p 形(p>n)と考える。

n 形であっても、正孔は存在し、p 形であっても電子は存在し、少数キャリヤと呼ばれる（多いほうは多数キャリヤ）。後で示すように pn 積一定を使ってドーピング濃度から平衡時の少数キャリヤ濃度を計算できる。

フェルミ準位とボルツマン分布

あるエネルギーの準位にどれだけ電子が満たされているかは、フェルミ準位とのエネルギー差で決まり、フェルミディラック分布 $f = \dfrac{1}{1+\exp(\frac{E-E_f}{kT})}$ と表される。フェルミ準位と等しいエネルギーを持てば 1/2 の占有確率となる。しかしながら、デバイスの計算を行うと時には、フェルミ準位が禁制帯中にあるとして、ボルツマン分布を使うのが通例である。すなわち $f = \exp(-\frac{E-E_f}{kT})$ として扱う。高濃度にドーピングされた場合、フェルミ分布を使うべき場合もあるが、他のパラメータをいじって、ボルツマン分布のままで表記するのが普通である。

平衡状態での pn 積一定と少数キャリヤ密度

光や電圧などのエネルギーを与えず、熱的に安定な平衡状態では、フェルミレベル E_f を用いて伝導帯の電子の数 n、価電子帯の正孔の数 p を表すと $n=N_C \exp(-\frac{E_C-E_f}{kT})$, $p=N_V \exp(\frac{E_V-E_f}{kT})$ となる。ここで、ここで、E_c は伝導帯底のエネルギー、E_V は価電子帯の頂点のエネルギーであり、N_C は伝導帯の実効状態密度、N_V は価電子帯の実効状態密度である。この式は伝導帯底（または価電子帯上端）から無限大（0）までのエネルギーを持つ電子（正孔）を積分して得られていることに注意すること。

実効状態密度は有効質量と縮退したバレーの数と温度で決まる。

電子デバイス第一　宮本恭幸

また、この積から

$$pn=N_VN_c\exp\left(-\frac{E_c-E_f}{kT}+\frac{E_V-E_f}{kT}\right)=N_VN_c\exp\left(\frac{E_V-E_c}{kT}\right)$$

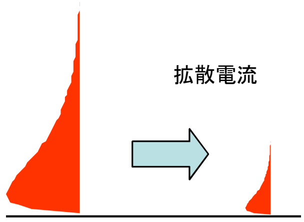
となり、pn 積一定となる。そして pn 積の平方根を**真性キャリヤ密度** n_i と呼ぶ。(Si では室温で $n_i=1.4\times10^{10}[cm^{-3}]$)。さらに p=n の時のフェルミ準位を**真性フェルミ準位** E_i と呼ぶ。フェルミ準位と併せて $n=n_i\exp\left(\frac{E_f-E_i}{kT}\right)$ と書ける。

デバイス物理を扱うときには、実効状態密度よりも真性キャリヤ濃度を用いるときの方が圧倒的に多い。

拡散

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)。

一般的に拡散は少数キャリヤで考慮すべき輸送機構である。



ドリフト

電界がかかった時のキャリヤ輸送はドリフトと呼ばれる。多数キャリヤ（少数キャリヤの反対）で主に用いられる。

電界Eがかかって電荷が加速され平均的時間 τ で原子や不純物にぶつかり散乱される。そのあいだの平均速度は電界に比例する。平均速度に電子数を掛ければ電流なので

$J_n(\mathrm{drift})=qn\mu_nE$　ここで、μ_n は電子の移動度。

正孔では $J_p(\mathrm{drift})=qp\mu_pE$, μ_p は正孔の移動度。

ここで、拡散定数と移動度には次のアインシュタインの関係があることに注意しよう。

$$D=\frac{kT}{q}\mu$$

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ヤが移動する現象だが、もし一様にキャリヤが発生する状態（光を全面照射された様な状態）を作り出すと、キャリヤ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）

半導体物性では、発生・再結合から拡散長を出して、拡散長によって半導体の中のキャリヤの挙動が決まると教わったと思う。

実際には、高速電子デバイスでは、再結合は非常に少なく、無視できる。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。また再結合を入れると式の扱いが面倒になる場合が多い。そこでこの講義では第 7 回までは基本再結合を使わないで説明していく。

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。ここは**空乏層**と呼ばれる。キャリヤがいないので、不純物がそのまま表れ、一様な電荷が分布している領域でもあり、**空間電荷領域**とも呼ばれる。このバンドの曲がり方は、電荷に基づいてポアソンの方程式を解けばよい。第 3 回で行う。

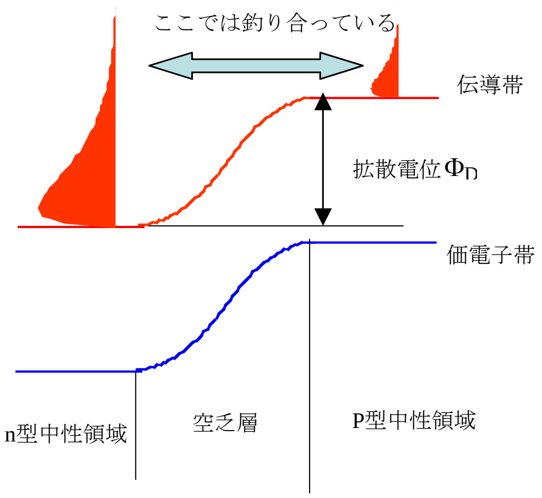
空乏層の外側ではキャリヤと不純物の数が釣り合っている。それぞれ p 型**中性領域**,n 型中性領域と呼ぶ。この中性領域では N_A と N_D が各々正孔、または電子を作り出すための p,n 領域の不純物濃度とすると $p_p=N_A$、$n_n=N_D$ である。中性領域では、電荷が無いので、バンドは曲がらずフラットである。

空乏層で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。

$n_{p0}=N_D\exp\left(-\frac{q\Phi_D}{kT}\right)=\frac{n_i^2}{N_A}$。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。



<u>pn 接合の順方向電圧印加時</u>

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。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 形中性領域に入る。入って来た電子は n 形中性領域では充分衝突していたが空乏層では衝突をしないで来ている。n 形の平衡状態のまま p 形にきている。

電圧がかかっているので、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を x=0 とすると、

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

ここで、p 層中の平衡状態の少数キャリヤ密度が n_{p0} である。
キャリヤの分布はボルツマン分布で仮定できることから、障壁の高さを変えるとキャリヤの数が指数関数的に変わっていくことになる。

本来ボルツマン分布はある準位で決まる分布だが、あるエネルギーから、その無限大までを積分しても、おなじボルツマン分布＝指数関数が残ることに注意しよう。

いま p 形中性領域は幅 W_p で、この中性領域では再結合が無視でき、それが終わると非常に再結合速度が速い層になるとしよう。この再結合速度が速い層は電極界面と考えても作れるし、強くドーピングした層で考えてもよい。すると、p 形中性領域が終わる場所では、少数キャリヤが平衡状態の n_{p0} となっていると考えることができる。

ここで、キャリヤの流れは $-D\frac{dn}{dx}$ 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である。

そこで少数キャリヤ濃度は

$$n_p(x)-n_{p0}=\frac{W_p-x}{W_p}\left(n_{p0}\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-n_{p0}\right)$$ と表せ、

傾きは $-\frac{n_{p0}}{W_p}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$ 。流束は $\frac{n_{p0}D_{np}}{W_p}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$ となる。電子を考えているので、-q を掛けて p 層での電子の拡散電流は

$$J_{np}(\mathrm{diffusion})=-qD_{np}\frac{n_{p0}}{W_p}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$ となる。

一方、n 層にも正孔による電流が流れる。同様に n 形中性領域は幅 W_n でとして電流は

$J_{pn}(\mathrm{diffusion})=-qD_{pn}\frac{p_{n0}}{W_n}\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$ となる。合わせて電流は、$J_{total}(\mathrm{diffusion})=-\left(qD_{pn}\frac{p_{n0}}{W_n}+qD_{np}\frac{n_{p0}}{W_p}\right)\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$ 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。

順方向に電流が流れるときは、バンドギャップより小さいものの、同程度の電圧を印加する。0.7V から 0.8V が目安である。kT は 26meV であり、<u>60mV 変化すると $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ は 10 倍変わる</u>。0.72V では $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ は 10^{12} であり、通常の順方向状態では、$\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$ は $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ で近似できる。

<u>pn 接合の逆方向電圧印加時</u>

今度は V が負としよう。実は考え方は全く一緒である。ただし電圧方向が逆なので、拡散電位が高く見え、p 型の少数キャリヤが逆に n 型中性領域に流れ出す形になる。式の形は全く一緒で従って

$$J_{total}(\mathrm{diffusion})=-\left(qD_{pn}\frac{p_{n0}}{W_n}+qD_{np}\frac{n_{p0}}{W_p}\right)\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$$ である。

V<-0.3V では $\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)$ は 10^{-5} より小さくなるので、$\left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)-1\right)$ は-1 となり、一定の電流 $q\left(\frac{D_p n_{p0}}{W_p}+\frac{D_n p_{n0}}{W_n}\right)$ に飽和する。この値は逆方向飽和電流 I_o と呼ばれる。

両方あわせると整流特性がでる。
すなわち、キャリヤが注入できる様に電圧が印加された場合は電流が流れるが、逆方向では電流が流れない。