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

トランジスタの増幅

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。

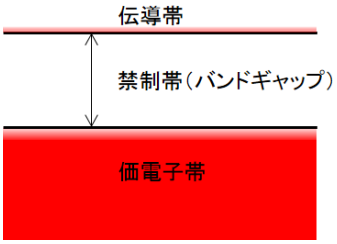
アナログでは入ってくる信号強度に比例させた信号を出す。通常の電子デバイスはこの比例での増幅を基本とする。出力はできれば理想的な電流源(すなわち電圧とは関係なく制御された電流が出る)または電圧源(すなわち電流とは関係なく制御された電圧が出る)の方が回路に組み込むときに使いやすい。

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の物理をおさらいし、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。



フェルミ準位

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。

また、この積から

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

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 $n=n_i\exp(\frac{E_f-E_i}{kT})$ と書ける。

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。熱平衡時状態で真性フェルミ準位よりフェルミ準位が高ければ n 形(n>p)、低ければ p 形(p>n)と考える。

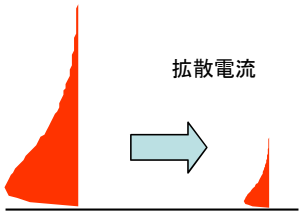
n 形であっても、正孔は存在し、p 形であっても電子は存在し、少数キャリヤと呼ばれる、pn積一定が成立するので、ドーピング濃度が判れば、少数キャリヤ濃度を計算できる。　デバイス物理を扱うときには、実効状態密度よりも真性キャリヤ濃度を用いるときの方が圧倒的に多い。

電子デバイス第一　宮本恭幸

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 $J_n(\text{diffusion})=qD_n\frac{dn}{dx}$ (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 $J_p(\text{diffusion})=-qD_p\frac{dp}{dx}$ (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

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

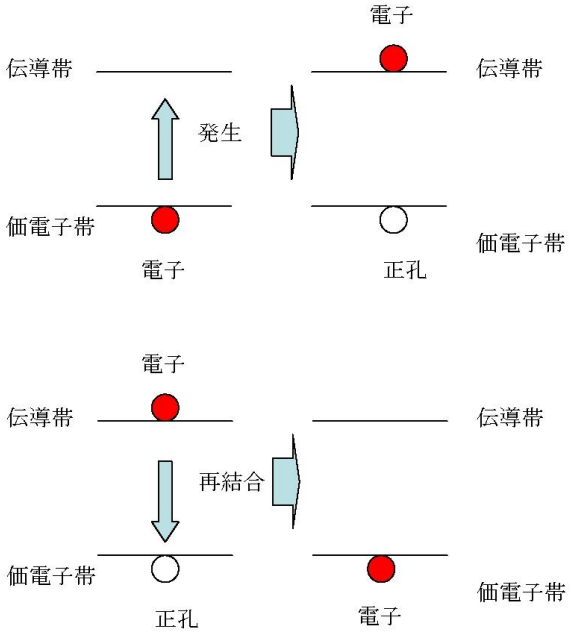
正孔では $J_p(\text{drift})=qp\mu_p E$，$\mu_p$ は正孔の移動度。

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）



光照射による発生は一方のキャリヤ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、キャリヤが発生すると、始めはキャリヤの数が増える。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ヤの発生量を 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ヤの消滅する量を r とすると、定常状態では g=r となり、キャリヤの数は一定となる。すなわち r は平衡状態からキャリヤの数が離れると増える。これを比例とし、一つの定数で表そうとすると、$r=\frac{n-n_0}{\tau_n}$ となる。ここでは p 型中の電子を考え、平衡状態のキャリヤを n_o、寿命時間を τ_n とした。

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。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 回までは極力再結合を使わないで説明していく。