

第6回 速度の推定

トランジスタの速度は、使う回路の速度に基づいて考えるべきであるが、回路毎に推定するのは煩雑である。そこで、いくつかの指標がある。アナログ回路応用では、小信号等価回路を用いて電流利得が1になる遮断周波数(cutoff frequency: f_T)と電力利得が1になる最大発振周波数(Maximum oscillation frequency: f_{max})が、良く用いられる。デジタル回路応用では実際に多段インバータ回路での発振器(リングオシレータ)を作り、その発振周波数を段数で割ることで一段当たりの遅延時間を求めるゲート遅延時間が一番信用されているが、回路解析によれば、代表的な回路では遮断周波数・最大発振周波数および小信号等価回路における等価回路成分に分解することが出来る。そこで、ここでは、高速動作解析を行うための容量を含んだ形の等価回路を扱うと共に、そこからの遮断周波数の導出を説明し、最大発振周波数を表記する代表的な式を示す。容量変化とは電圧変化による電荷の変化なので、その原理に基づいてまず計算する。

拡散容量

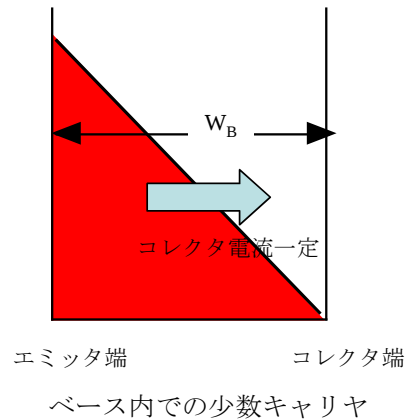
ベース中に存在する少数キャリアによる容量のことを拡散容量と呼ぶ。コレクタ電流は、拡散による流れを持ち、ベース中の少数キャリア(電子)の総電荷数 Q_B を持つ。ここでベース幅を W_B 、再結合がまったく無いとする。従って、キャリア分布の傾きは一定であり、ベース面積を S として

$$Q_B = -qS \int_0^{W_B} n_B(0) \left(1 - \frac{x}{W_B}\right) dx = -qn_B(0) \frac{SW_B}{2}$$

$I_C = \frac{qSD_{nB}n_B(0)}{W_B}$ なので、 $Q_B = -I_C \frac{W_B^2}{2D_{nB}}$ とも書けることに注意しよう。これを電圧で微分すると単位面積当たりの拡散容量が出る。

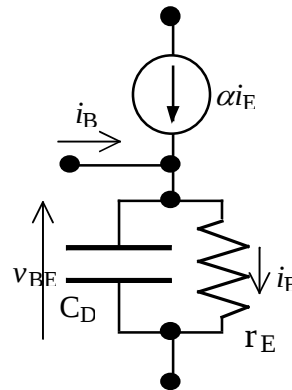
$$n_B(0) = n_{B0} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \quad \text{な の で、}$$

$$C_D = \left| \frac{dQ_B}{dV_{BE}} \right| = \left| \frac{q}{kT} Q_B \right| \quad \text{である。}$$



拡散容量のみを考慮した場合の遮断周波数

大電流動作時には速度は主に拡散容量で決まるので、初めはキャパシタンスとして拡散容量 C_D だけとする。容量の計算には接合面積を考慮すべきことに注意しよう。等価回路解析は、電流源1個と抵抗1個にキャパシタンス1個で行う。抵抗はエミッタの微分抵抗 $r_E = \frac{dV_{BE}}{dI_E}$ である。コンデンサに流れる電流はベースエミッタ間高周波電圧成分を V_{BE} とすると $j\omega C_D V_{BE}$ であるが、抵抗を流れるエミッタ電流の小信号高周波成分を i_E とすると $V_{BE} = r_E i_E$ の関係があるので、 $j\omega C_D r_E i_E$ で表す。

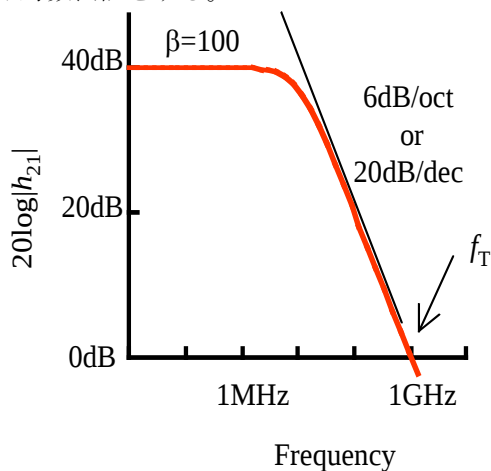


小信号等価回路

遮断周波数は、出力端を短絡したときの出力電流対入力電流の比率が1になる周波数で定義される。ベース電流の小信号高周波成分を i_B とすると交点での電流は、 $j\omega C_D r_E i_E + i_E = i_B + \alpha i_E$ である。整理すると $(1 - \alpha + j\omega C_D r_E) i_E = i_B$ となる。ここで出力電流

対入力電流の比は $\frac{\alpha i_E}{i_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha + j\omega C_{DRE}}$ となる。
 $1 - \alpha \gg j\omega C_{DRE}$ である低い周波数では利得は β となるが、 $1 - \alpha \ll j\omega C_{DRE}$ の領域では利得は $\frac{i_C}{i_B} \approx \frac{1}{\omega C_{DRE}}$ となり、 $\omega C_{DRE} = 1$ となる周波数で利得は 1 となる。この周波数が遮断周波数であり、 $f_T = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi C_{DRE}}$ である。ここで注意すべきは $C_D = \frac{q I_C W_B^2}{kT I_C 2D_{nB}}$ と書けるので、 C_D は I_C に比例し、 $r_E \approx \frac{kT}{q I_C}$ と書けるので、 r_E は I_C に反比例するので、その積 $2D_{nB}$ は電流に依存しない量であることである。

遮断周波数の測定は実際にはマイクロ波での S パラメータを測定してそれを h パラメータに戻した値の周波数特性からだす。通常利得は $20\log|h_{21}|$ で表し、対数表記の周波数で対数-対数表記をする。



電流利得の周波数特性

電子の速度

ここでベース走行時間 τ_B を示そう。計算し

よう。 $n_B(x) = n_B(0)(1 - \frac{x}{W_B})$ 、 $J = \frac{-qD_{nB}n_B(0)}{W_B}$ であり、一定の拡散電流を各場所でのキャリア数と電子の単位電荷でわると電子の速度が出る。

$$v(x) = \frac{-qD_{nB}n_B(0)}{-qW_Bn_B(0)(1 - \frac{x}{W_B})} = \frac{D_{nB}}{W_B - x}$$
 速度。端に行くほど早い。(電子の量が減っても同じ

電流を流すために早くなった) 走行時間は速度の逆数を積分すれば良く、

$$\tau_b = \int_0^{W_B} \frac{dx}{v(x)} = \frac{W_B^2}{2D_{nB}}$$
 となる。ベース幅が小さいほど、また拡散係数が大きいほどこの時間は早くなることになる。そしてこれはまさに先ほど求めた C_{DRE} 積と等しい。拡散容量はその定義から、ベース中の少数キャリアであり、その時間応答をみたのは、ベース中の走行時間を観たことになる。ベース走行時間を使うと先に示したベース中の少数キャリアの総電荷数 Q_B とコレクタ電流の関係も $I_C = \frac{Q_B}{\tau_B}$ と表記できる。

なお、空乏化したコレクタ層中を走行する場合も、実際には飽和速度で走行した、ある一定の電荷がある。実際には、遅延時間の中にこのコレクタの走行時間を入れる必要があるが、シリコン系ではベース走行時間に較べて短く、無視する場合が多い。

接合容量

一方、コレクタ電流が小さいときには、いわゆる充電時間が効いてくる。最も効くのは pn 接合の空乏層による容量(多数キャリアの動きによる容量)を充電する成分である。階段接合(すなわち pn 各層がそれぞれ様な不純物濃度の場合)の場合を考えよう。片側のキャリア濃度が充分高い場合、低い方だけに空乏層が広がると考えて良い。キャリア濃度が低い側がベース側なのでここが主となり、ベ

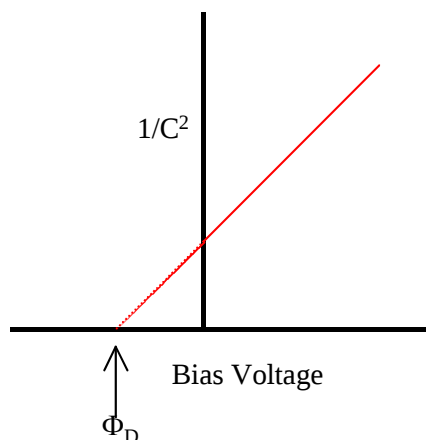
ース層に広がる空乏層幅は $\sqrt{\frac{2\epsilon_s(\Phi_D - V_{BE})}{qN_B}}$

であり、このときの電気力線を発生している電荷は単位面積当たり $Q = -qI_B N_B$ である。単位面積当たりの電圧に対する電荷の変化、すなわち接合容量は

$$C_E = \frac{dQ}{dV_{BE}} = -qN_B \frac{dI_B}{dV_{BE}} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_B}{2(\Phi_D - V_{BE})}}$$

この容量が接合容量と呼ばれている。従って容量は電圧の -1/2 乗に比例する形を取る。この容量と印加電圧の関係は、逆方向に電圧を印加して電流を流さない条件で容量計と電圧源をつなぐことで簡単に測定できる。この -1/2 乗に比例するというのは階段接合だけの特徴であり、不純物分布によって変わる。またこ

のグラフから、内蔵電位 Φ_D を求めることも出来る。



C-V 特性
(点線部はリークではかれない)

一方、空乏層幅の式を見較べると空乏層幅 l_n に対して、 $C_E = \frac{\epsilon_s}{l_B}$ の関係がある。(この関係は不純物の分布や量に依らずいつも成り立つ。)

接合容量を入れたモデル

エミッタベース間の接合容量を入れると、従来の拡散容量に並列にはいるので、 $f_T = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi(C_D + C_E)R_E}$ となる。このとき、 $(C_D + C_E)R_E$ を総遅延時間と見れば、接合容量による充電時間とベースの走行時間の和で遅延時間が決まると考えられる。ここで、 C_E は電流にあまり依存しない(実際には少し依存するが非常に弱い)ので、エミッタ(直流)電流が小さくなると、エミッタ抵抗が大きくなり、接合容量による充電時間が無視できなくなる。遮断周波数は拡散容量のみの時よりも下がる。本来総遅延時間にはベースコレクタ間接合容量充電時間と、コレクタ走行時間、エミッタ空乏層走行時間などもはいり、またまた電流密度を上げすぎると、コレクタ中を走行する電荷量がコレクタのポテンシャル形状を変えて速度が劣化するベース押し出し効果またはカーク効果という現象などもあるが、いずれも大学院レベルと考えここでは割愛する。

最大発振周波数

遮断周波数の解析では電流利得のみが現れ、ベースエミッタ間の電圧は関係なかった。しかしながら、ベースエミッタ間の電圧とベースエミッタ間の電流の積が実際に投入される電力である。電力を増幅するためには、ベースに入れる電力対コレクタから出る電力の比が重要である。現在の等価回路では、出力電圧は無限に取り出せるし、入力電圧は任意であった。そこで等価回路をもうすこし複雑にしないと電力増幅率を出せない。ベース抵抗 R_B とベースコレクタ間の接合容量 C_C を入れて等価回路を書き直す。電力増幅率をとるためには、ベースエミッタ電圧を小さくするためにベース抵抗を下げること及びコレクタエミッタ電圧を大きくとるために接合容量 C_C を小さくすることが重要である。 f_T と同じように電力増幅率が1になる周波数を f_{max} と呼ぶ。

f_{max} の定義では最大電力利得が得られるように入出力のインピーダンスを整合させるので、計算はすこし面倒であり、ここでは結果だけを示そう。(教科書には纏めてある) 通常のトランジスタで適用される近似の範囲

では $f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi R_B C_C}}$ の関係式がよく用いられる。

