

● バイポーラ・トランジスタの直流特性

バイポーラ・トランジスタ(BJT)の直流特性は図1に示す、横軸にベース・エミッタ間電圧、縦軸にベース電流とコレクタ電流をとったガンメル・プロットで説明されます。

二つの線の距離が電流増幅率を表し、コレクタ電流は大電流域で高注入効果のため飽和し、ベース電流は微小電流域でキャリアの生成-再結合電流により増加しています。まずは、この直流特性をモデル化する必要があります。

● 接合のモデル化

ベース-エミッタ間とベース・コレクタ間のおおのの接合をモデル化するのが、図2に示すGummel-Poonモデルのそれぞれ二つのダイオードです。

右側が接合の中電流域の特性を表し、左側が微小電流域での再結合電流をモデル化しています。

また高注入による飽和は q_b に組み込み、半導体のバルク抵抗などの影響は、各電極に接続された直列抵抗 r_C, r_E, r_{BB} でモデル化しています。

接合容量、拡散容量はダイオードと同様にモデル化しています。

● トランジスタ動作のモデル化

トランジスタとしての増幅動作はおおのの接合電圧で制御される電流源 I_{CC}, I_{EE} でモデル化しています。

● ICにおける寄生素子のモデリング

ディスクリートのトランジスタではなく、ICの中で使われるトランジスタでは、その構造により寄生素子加わるので、それをモデル化する必要があります。

● パーチカルBJTとラテラルBJTの構造

図3は、ICの中に作られるパーチカルとラテラルの二つのBJTの構造です。

この図では実際によく使われる、パーチカルNPNトランジスタとラテラルのPNPトランジスタを示しました。

パーチカル構造ではコレクタとサブストレート間に、ラテラル構造ではベースとサブストレート間に寄生ダイオードと寄生容量が生じることがわかります。

そこで、パーチカルからラテラルかによって、図2に示したように寄生ダイオードと容量をモデルに追加します。ただし、図2はNPNトランジスタを示しているので、ラテラルでの寄生ダイオードの向きに注意してください。

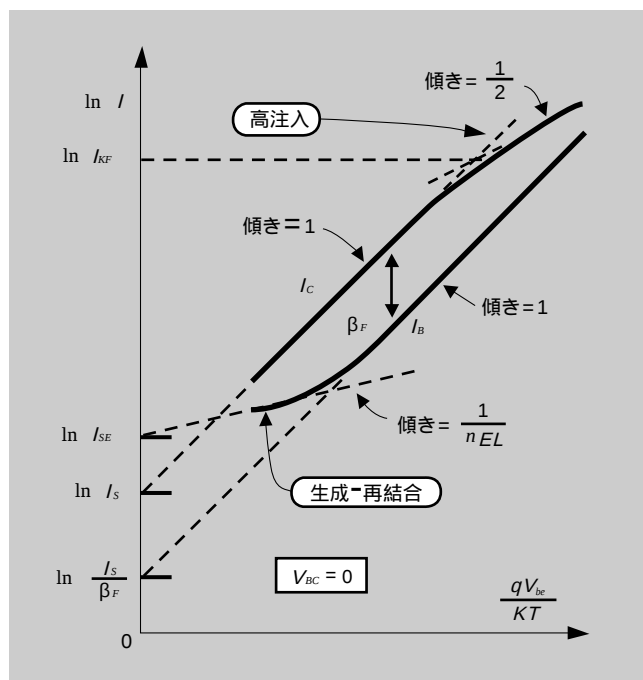
● ベース-コレクタ間容量のモデル化

また、図3からもわかるように、ベース・コレクタ間容量は、トランジスタとして能動的に動作するエミッタ付近の容量 C_{JC} のほかに、ベース電極付近とコレクタ埋め込み層間の C_{JX} 、ベース電極付近とコレクタ電極付近間の C_{BCP} に分割されます。

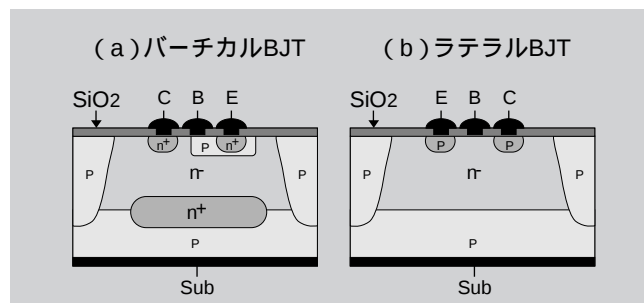
● パワーBJTとそのモデリング

さて、パワー用のBJTも増えていますが、そこではコレクタ耐電圧を高くするためにコレクタの不純物濃度を变化させて、図4(a)に示すような4層構造にしています。

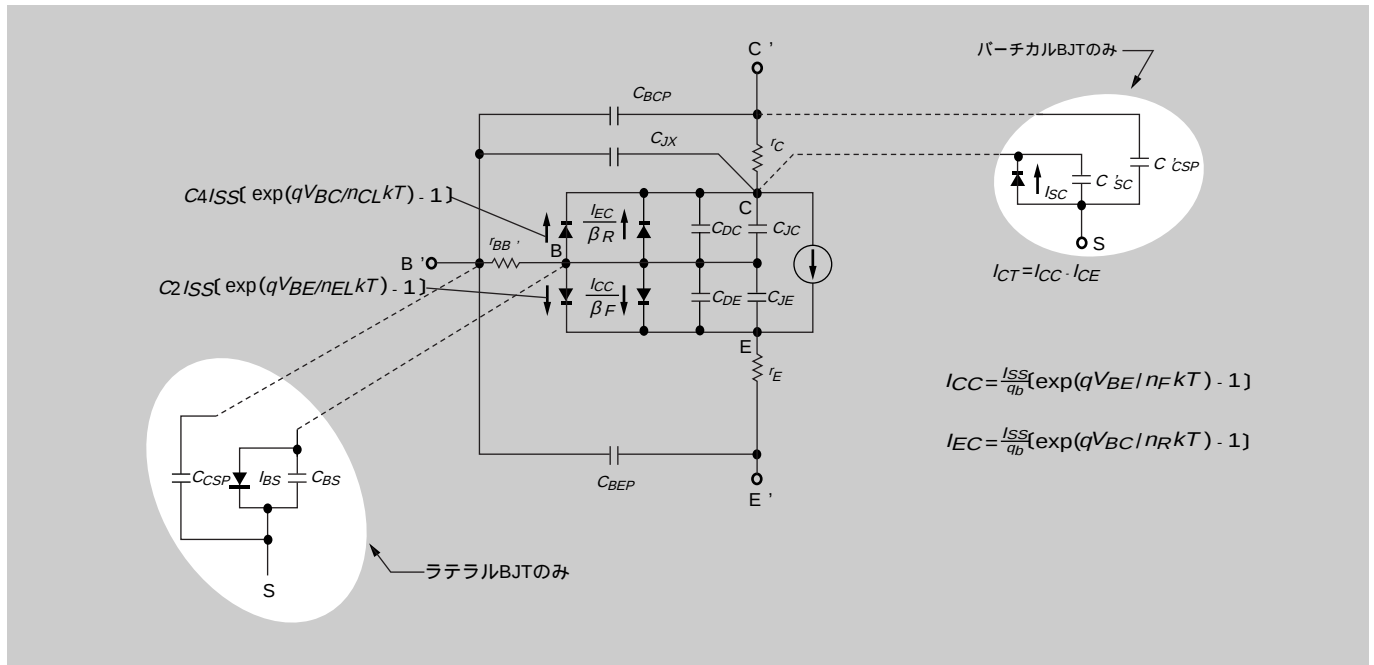
この構造では、飽和動作付近で内部のベース・コレクタ接合は順バイアスです



〔図1〕BJTのガンメル(Gummel)プロット



〔図3〕パーチカルBJTとラテラルBJTの構造(断面図)



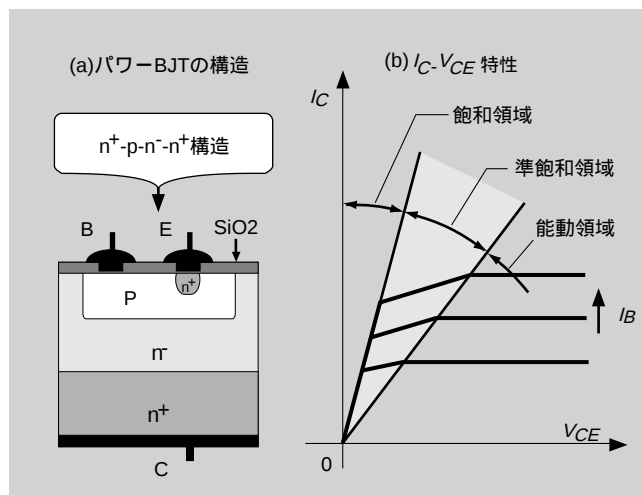
〔図3〕BJTのGummel-Poonモデル⁽¹⁾

が、外部のベース・コレクタ電極間は逆バイアスとなる準飽和動作領域が生じ、図4(b)のような直流特性となります。

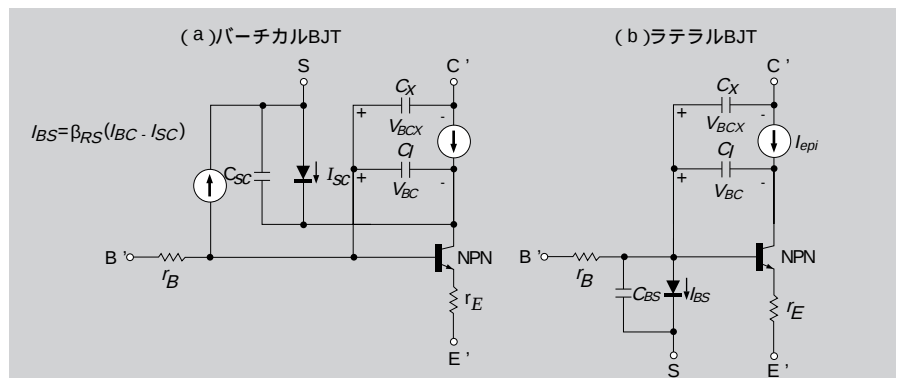
図5に示すのが、この準飽和を含めたモデルで、コレクタに準飽和を表す電流源が設けられています。

引用文献

(1) Giuseppe Massobrio, Paolo Antognetti; Semiconductor Device Modeling With SPICE, 2nd. Ed., McGraw-Hill, 1993.



〔図4〕パワーBJTとその直流特性



〔図5〕パワーBJTとその準飽和を含んだモデル⁽¹⁾