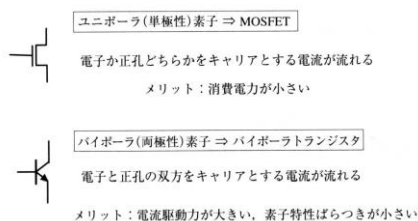


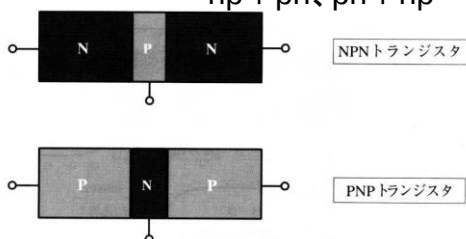
トランジスタの記号



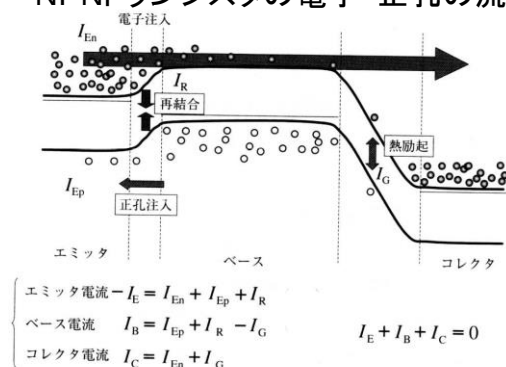
ある npn (pnp もある) トランジスタと、ユニポーラトランジスタである MOS トランジスタの動作について説明します。

【npn トランジスタのバンド図】

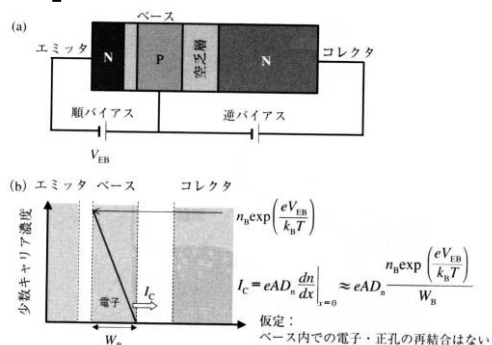
トランジスタ=2つのpn接合の突合せ
np+pn, pn+np



NPNTランジスタの電子・正孔の流れ



【npn トランジスタの増幅作用】



ダイオードの理解を基にして、三端子デバイスであるトランジスタについて説明する。トランジスタには**バイポーラトランジスタ(BPT)**と**ユニポーラ・ジャンクション・トランジスタ(UJT)**がある。バイポーラトランジスタでは、負電荷を持つ電子と、正電荷を持つ正孔の両方**(バイ=二つの)**が流れる電流が動作に関係する。一方、ユニポーラトランジスタでは、どちらか一方**(ユニ=一つの)**のキャリアが流れる電流に寄与する。この講義では、このバイポーラトランジスタで

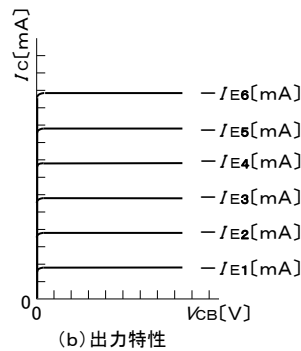
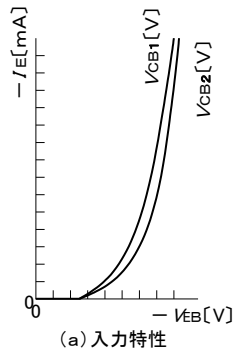
pn 接合の時と同様に npn 接合のバンド図を描く。最初にバイアス電圧が加わっていない**熱平衡状態**の npn 接合のバンド図です。バイアス電圧が加わっていないので**フェルミ準位エネルギーは npn**の三つの領域で**一定**になっています。nnp トランジスタは、np のエミッタ接合と pn のコレクタ接合の二つの pn 接合が接続されている構造になっています。トランジスタ動作は、エミッタ接合の np 接合に順バイアス電圧を加えて、pn 接合のコレクタ接合に逆バイアス電圧を印加して用います。このときの npn トランジスタのバンド図を描きます。

トランジスタの動作をさせるときには、色々な回路形式があります。代表的な回路形式はベースを接地つまりアースにして、エミッタとコレクタに共通に接続して使う回路形式です。これを**ベースコモン、あるいはベース接地回路**といいます。また、エミッタを接地して、ベースとコレクタに共通に接続して使う回路形式があります。これを**エミッタ接地、あるいはエミッタコモン回路**といいます。

ベース接地回路の回路図を描きます。はじめに、nnp 接合の p 領域(ベース領域)の幅が広い場合を考えます。広いというのは、エミッタ接合の np 接合の n 領域から順バイアス電圧によって p ベース領域に注入される少数キャリアである電子の拡散長 $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ が p ベース領域の幅 W_B よりずっと小さい場合です。この場合は W_B が電子の拡散長 $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ より幅広いので、n エミッタ領域

から p ベースに注入された少数キャリアである電子は p ベース領域の中ですべてホールと再結合してしまいますから、pn コレクタ接合まで到達しません。従って、逆バイアスされている pn コレクタ接合では、逆方向飽和電流のとても小さな電流しか流れません。この時、トランジスタ動作(増幅)は起こりません。状況がいつ

ぺんするのは、p ベース幅が狭くなったときです。p ベース領域の幅 W_B が電子の拡散長 $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ より小さくなったとき、典型的には W_B が $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ の 0.1 程度以下になると、n エミッター領域から p ベース領域に注入された少数キャリアの電子が p ベース領域内で再結合しないで、逆バイアスされた pn コレクター領域まで到達し、**ほぼ**エミッター電流と同じ電流が流れます。



ここで、ベース接地トランジスタ回路の、出力特性を描きます。出力特性とは、コレクター-ベース間の順方向バイアス電圧に対するコレクター電流の変化です。エミッター電流を増やすとそれに応じて、ほとんど同じくらいのコレクター電流が流れ、一定値で飽和します。エミッター電流を増加すると、それに応じてコレクター電流も増加します。これでは一見、増幅されていないように思えますが、ここで接合の抵抗を考えます。エミッターの np 接合は順

バイアス電圧が印加されていますから、入力抵抗 R_E は小さい。一方、pn コレクター接合は逆バイアス電圧が印加されていますから、出力抵抗 R_C は非常に高い。従って、出力端の電圧は「抵抗×電流」なので、

$R_C \times I_C$ と、入力電圧 $R_E \times I_E$ の比は、ほぼ R_C/R_E となるから、**電圧（あるいは電力 $W=RI^2$ なので）が増幅**される。これがトランジスタの増幅効果。色々な回路形式があるが、簡単に説明するために、p ベース領域を接地にした、ベース接地回路で説明した。

【電流利得】

ベース接地の、npn トランジスタの電流利得について。エミッター接合は順バイアスされた np 接合なので、ベースに流れ込む電流は、エミッター n 領域から注入される電子電流 I_{pE} に加え、p ベース領域から逆に注入されるホール電流 I_{pE} の和になる。コレクター np 接合に到達した電子電流を I_{eC} とすると、その電子電流の差の分、つまり $I_{pE} - I_{eC}$ が、エミッターから注入された電子電流の内、p ベース領域内へ注入された電子と再結合して消滅した p ベース内のホールを補うためにベースからエミッターに流れ込む再結合電流 I_{Br} になる。またコレクター接合は逆バイアスされているが、逆バイアスされたコレクター接合で流れる電流は、小さな逆バイアス飽和電流なので、コレクター接合に流れ込む電子電流 I_{eC} と較べて非常に小さいものとなる。これを I_{CB0} と表して、**コレクタ**

遮断電流という。従って、電流連続の関係は**キルヒホッフの法則**から次のようになります。 $I_E = I_C + I_B$

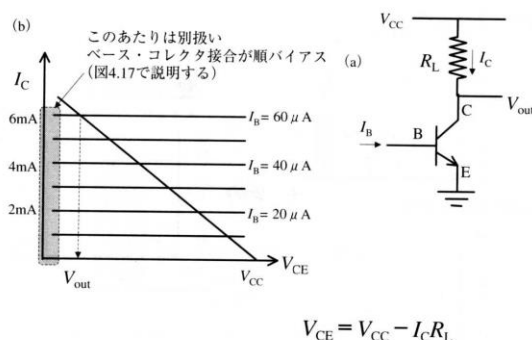
$I_E = I_{pE} + I_{nE}$ $I_C = I_{pC} + I_{nC}$ となる。これらの式からベース電流 I_B は次のようになります。

$$I_B = I_E - I_C = I_{nE} + (I_{pE} - I_{pC}) - I_{nC} = I_{nE} + I_{Br} - I_{CB0}$$

ベース接地の**電流利得 α** は、エミッター電流に対するコレクター電流の比で定義されるから、逆方向飽和電流が

小さいので、 $\alpha = \frac{I_{PC}}{I_E} \cong \frac{I_C}{I_E}$ となる。ベース電流はわずかに流れるので、通常 α は 1 より少し小さな値、0.95-0.99 の値をとる。ベース接地では、電流増幅は行われないが、電圧(電力増幅)が行われる。

【エミッター接地回路】



電流増幅を行うためには、エミッター接地回路を用いる。エミッター接地回路では、ベース電流(音や映像等の入力信号)に対してコレクタ電流がどれだけ変化するかという動作をする。その場合、上の式からコレクタ電流とベース電流の関係を導くと、途中は省略しますが、 $I_C = \frac{\alpha}{1-\alpha} I_B + \frac{I_{CB0}}{1-\alpha}$ となる。エミッター接地回路の

電流利得 β は、ベース電流に対するコレクタ電流の比ですから、 $\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha}$ となる。 α は 1 に非常に近い値をとり

ますので、 β は非常に大きく、20-100 の値を示す。電流利得 β を大きくするためにはベース電流を小さく抑えることが重要。ベース電流が流れる原因は、ベース領域内の少数キャリア(p 型ベースでは電子)の再結合電流なので、これを抑えるためには、再結合の源となる欠陥などがない、つまりよい結晶性のベース領域を形成することが大事。また、ベース領域内で生じる再結合電流がエミッター領域に流れ込むことが電流増幅率 β を下げる原因となりますから、ベース領域で発生する再結合電流が流れ込まないように、ベースとエミッターの間にポテンシャルバリア(障壁)を作る構造がある。ポテンシャルバリアを作る方法として、禁制帯幅が異なる構造(ヘテロ接合)を形成してホールに対するポテンシャルバリアをつくり、ベース領域に流れ込むホールがエミッター領域に行かないようにする。具体的には、エミッターやコレクタの材料より禁制帯幅が小さな材料でベース領域を作り、エミッターとベースの間にホールに対するポテンシャルバリアを作る。この構造を使っているのが、HBT(ヘテロバイポーラトランジスタ)と言う。

【バイポーラトランジスタの動作速度】

バイポーラトランジスタでは、順バイアス電圧を印加されたエミッター np 接合からベース領域に注入される少数キャリアが、どれほど早くベース領域を抜けてコレクタ接合へ到達するかによって動作速度が決まる。p ベース領域をキャリア濃度勾配による拡散で通るから、通常遅くなる。エミッターから注入された電子がベースを通り抜け

るために要する時間(ベース走行時間)は大体 $t_B = \frac{W_B^2}{2D_p}$ で与えられる。トランジスタが動作しなくなる周波

数(カットオフ周波数)は $f_T = \frac{D_p}{\pi W_B^2}$ で与えられる。また、トランジスタの入出力端子に整合回路を付けて寄生容量をインダクタンスで打ち消すと、トランジスタが持つ本質的な増幅限界まで動作周波数を高くすることがで

きるが、この限界周波数を最大発振周波数 f_{max} という。これは $f_{max} = \sqrt{\frac{f_T}{8\pi\tau_b C_C}}$ で与えられる。ここで

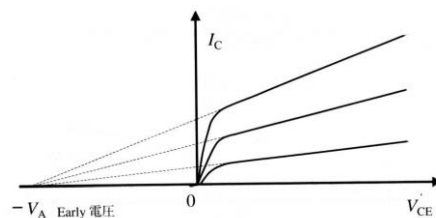
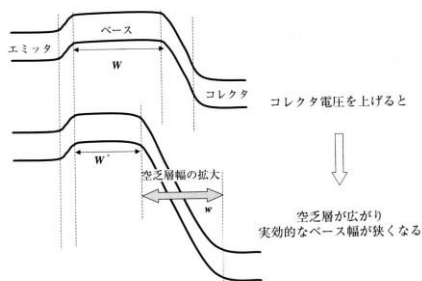
τ_b はベース抵抗であり、 C_C はコレクタ接合容量である。高周波で動作するトランジスタを作るためには、ベース抵抗を小さくして、コレクタ接合容量を小さくする工夫がなされている。現在使われているトランジスタは、ベース領域の不純物濃度に勾配を持たせて、内部電界を生じさせ、その内部電界で加速して、エミッターか

ら注入されるホールを効果的にそして拡散よりも高速にコレクター接合へ到達させる構造をとる。その結果、エミッターからベースに注入されるホールの到達率も向上し、電流増幅率も高くなる。これを**ドリフトベーストランジスタ**と言う。初期のバイポーラトランジスタはベース領域の不純物濃度勾配が平らで、高速に動作せず、せいぜい数 KHz 程度しか動作しなかったが、現在は、すべてこのドリフトベーストランジスタ構造になっているので、実用になった。バイポーラトランジスタの性能を高めるためには、ベース幅を狭くし、エミッターからの電流到達率を高めればよいように思えるが、ベース層を薄くしていくと、不具合がある。その現象を二つ説明する。

【ピンチオフ現象】

ベース幅を薄くすると、順バイアスされたエミッター np 接合から注入される少数キャリアの電子が、ベース領域内での拡散や電界によるドリフトをしないで、直接コレクター接合の逆バイアスされた pn 接合に流れ込む現象が生じる。その時、特定のコレクター電圧以上ではコレクター電流がほぼ一定になるはずが、急激にコレクター電流が増加して制御できなくなる。これを**ピンチオフ現象**という。

【アーリー効果】

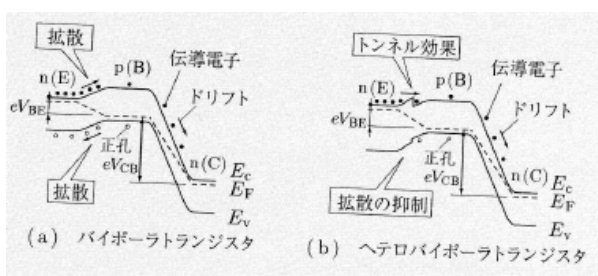


コレクター接合は逆バイアスされているから、逆バイアス電圧を大きくしていくと、当然コレクター pn 接合の空乏層がベース領域にも広がる。するとあたかもベース幅が狭くなるようになり、電流到達率つまり

電流増幅率が大きくなる。本来はコレクター電圧に対してコレクター電流が一定であるべきなのに、わずかに増加する飽和しない特性が現れる。これを**ベース変調効果(アーリー効果)**という。

【バイポーラトランジスタ 例題】

- ① バイアス電圧が印加されていない npn トランジスタのエネルギーバンド図を描きなさい。
- ② ベース接地における npn トランジスタのエネルギーバンド図を描きなさい。
- ③ 多結晶シリコンに多量の酸素とリン(P)を添加すると、単結晶シリコンよりも禁制帯幅が広い n-型半導体を得ることが出来る。あるいは、InP 化合物半導体と InAlP の組み合わせ等もある。これをエミッターとして、単結晶シリコンをベース、コレクターとしたトランジスタをヘテロバイポーラトランジスタと言い、エミッター注入効率を高くすることが出来る。その理由をエネルギーバンド図を用いて説明しなさい。



注釈 カリフォルニア大学サンタバーバラ校の物理学教授であった Herbert Kroemer 氏は、1950 年代に HBT を提案した。Kroemer 氏とともに 2000 年にノーベル賞を受賞したロシアの物理学者 Zhores I Alferov 氏も、独自にヘテロトランジスタを発明している。Kroemer 氏は、ガリウムひ素 (GaAs) など、

周期表における III 族 - V 族の化合物を組み合わせた半導体を中心に研究を行っていた。

ちなみに、2000 年のノーベル物理学賞には、集積回路を発明したジャック・キルビー氏 (テキサス・インスツルメンツ) も受賞している。