

半導体デバイス工学 講義資料

第4章 バイポーラデバイス

(p. 68～p. 79)

4. バイポーラデバイス

4.1 バイポーラトランジスタ

4.1.1 バイポーラトランジスタの構造と接地方式

4.1.2 動作原理

4.1.3 電流増幅率

4.1.4 バイポーラトランジスタの静特性

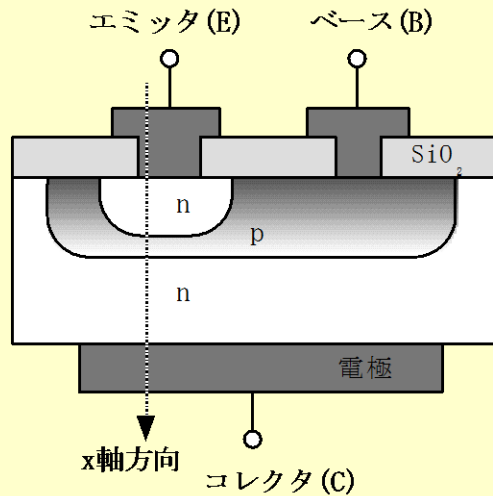
4.2 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

4.3 電力制御デバイス

4.1.1 バイポーラトランジスタの構造と接地方式(1)

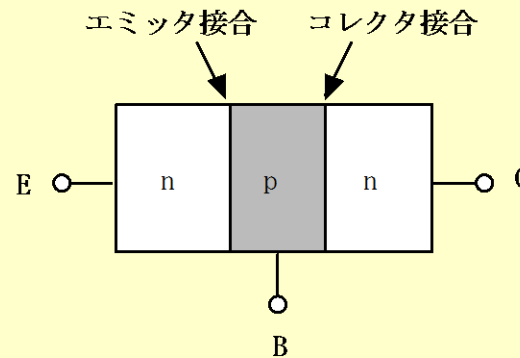
バイポーラトランジスタ

- ・n形またはp形の半導体を異なる伝導形の半導体で挟んだ3端子素子
- ・挟まれた領域をベース(base: B), ベースに対して不純物濃度の高い領域をエミッタ(emitter: E), もう一方の領域がコレクタ(collector: C)
- ・エミッタ, ベース, コレクタで, それぞれにオーム接触の電極
- ・ベース部分は他の領域に比べて極めて薄く作られている
- ・2つのpn接合: B-E間はエミッタ接合, B-C間はコレクタ接合

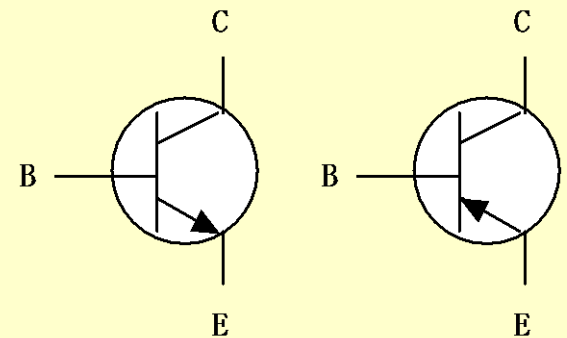


(a) 断面構造

図4-1 バイポーラトランジスタの断面構造 (プレーナ法)



(b) x軸方向のモデル図



(a) npn形

(b) pnp形

図4-2 トランジスタの回路記号

4.1.1 バイポーラトランジスタの構造と接地方式(2)

- ・エミッタ接合には順方向バイアス, コレクタ接合には逆方向バイアス
- ・1つの端子を入出力で共通に使用, 残りを入力端子と出力端子に使用

① ベース接地: E-B間に入力を加え, C-B間から出力を取り出す
電流増幅率は1より小さく, 主に電圧増幅用に使われる.

② エミッタ接地: B-E間に入力を加え, C-E間から出力を取り出す
電流増幅率が大きく, 主に電流増幅用に使用される

③ コレクタ接地: B-C間に
入力を加え, E-C間から出
力を取り出す

出力抵抗が小さく, 主に入
出力のインピーダンス変
換に使用される

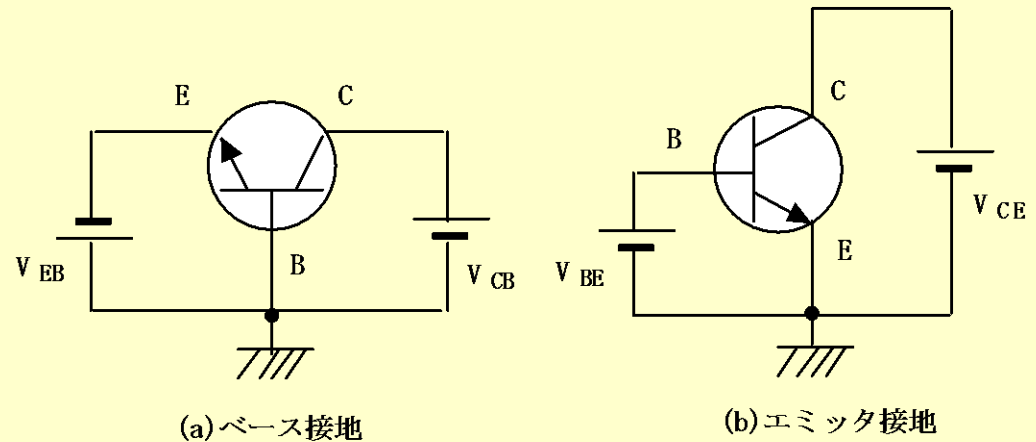


図4-3 トランジスタの接地方式 (npn形)

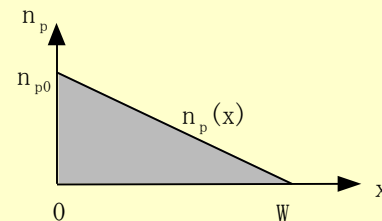
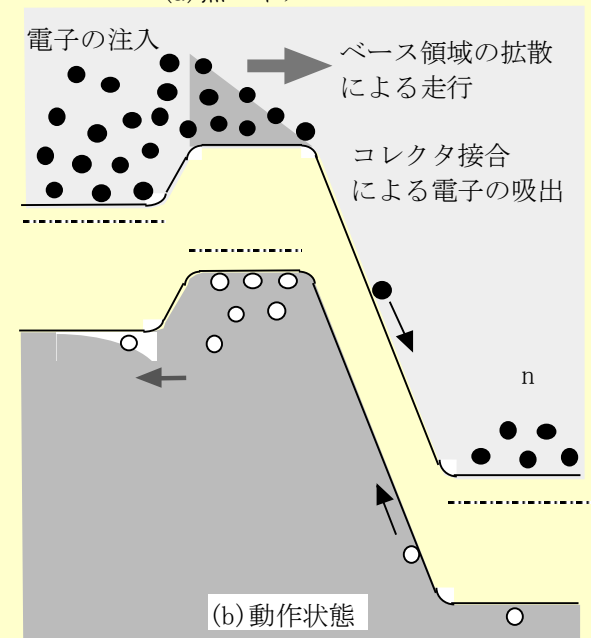
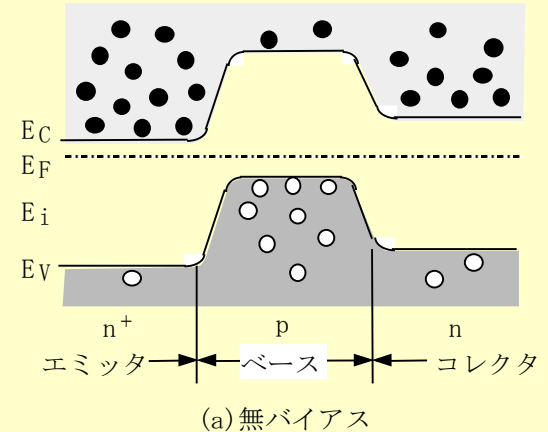
4.1.2 動作原理

無バイアス

拡散電位により電子と正孔は他領域に拡散しない。

動作状態

- ・電子がエミッタからベース領域内へ注入される。注入量はエミッタ・ベース間電圧で制御される。
- ・電子はベース内を再結合しながら拡散しコレクタ接合へ到達する。
- ・ベース幅は薄く、再結合はほとんど起こらない。
- ・ベースに注入された電子のほとんどはコレクタ側で吸出される。ここでの電子密度はほとんどゼロと考えられ、ベース内の電子密度は直線的に近似できる。



(c) ベース領域内の電子濃度

4.1.3 電流増幅率 (1)

エミッタ電流 I_E , コレクタ電流 I_C , ベース電流 I_B の間には次式が成り立つ.

$$I_E = I_C + I_B \quad (4.1)$$

ベース接地電流増幅率 α とエミッタ接地電流増幅率 β を定義する.

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} \quad (4.2) \quad \beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (4.3)$$

$$\alpha \text{ と } \beta \text{ の関係は } \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (4.4)$$

ベースでの再結合は少ないので, α は1に非常に近い値となる. 例えば α の値を0.99とすれば β は99となり, 大きな電流増幅作用が得られる.

npnトランジスタにおいて, 電子がエミッタからコレクタに達する過程は次の3段階である.

- ①エミッタからベースへの電子の注入
- ②ベースでの電子の拡散
- ③B-C間の逆バイアスによるコレクタ領域への電子の移動

これらの効率はそれぞれ,

- ①エミッタ効率 (γ)
- ②ベース輸送効率 (α_T)
- ③コレクタ効率 (α_C)

と呼ばれている.

α は次式で表すことができる.

$$\alpha = \gamma \cdot \alpha_T \cdot \alpha_C \quad (4.4)$$

4.1.3 電流増幅率 (2)

ベース領域の電子濃度が直線的に表現されるならば、ベース面積をA、ベース幅をwとして、式(3-13)は次のように書直すことができる。

$$I_E = I_{En} + I_{Ep} = Aq \left(\frac{D_n n_{n0}}{w} + \frac{D_p p_{p0}}{L_p} \right) \exp\left(\frac{-qV_d}{kT}\right) \left\{ \exp\left(\frac{qV_{EB}}{kT}\right) - 1 \right\} \quad (4.5)$$

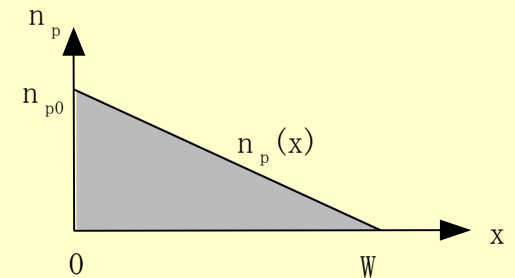
I_{En} は I_E の電子電流成分、 I_{Ep} は I_E の正孔電流成分、 V_{EB} はE-B間の順方向電圧

エミッタ効率 γ は全エミッタ電流のうち、電子電流成分の比で表され、

$$\gamma = \frac{I_{En}}{I_E} = \frac{I_{En}}{I_{En} + I_{Ep}} = \frac{\frac{D_n n_{n0}}{w}}{\frac{D_n n_{n0}}{w} + \frac{D_p p_{p0}}{L_p}} = \frac{1}{1 + \frac{D_p p_{p0}}{D_n n_{n0}} \cdot \frac{w}{L_p}} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{w}{L_p}} \quad (4.6)$$

σ_B と σ_E は、ベースとエミッタ領域の導電率である。

γ を大きくするには、エミッタ領域の不純物濃度を高くして $\sigma_B \ll \sigma_E$ とすると同時に、エミッタ領域の拡散距離と比べてベース幅Wを小さくする必要がある。



(c) ベース領域内の電子濃度

4.1.3 電流増幅率 (3)

ベース輸送効率を近似的に求める。
ベース領域内の電子濃度は図より、

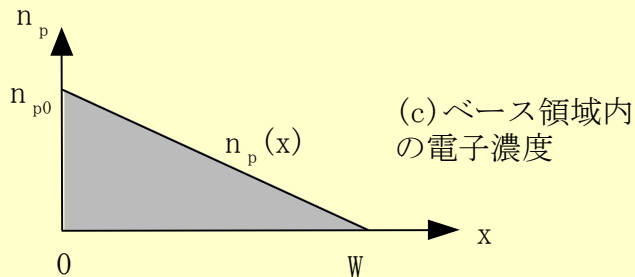
$$n_p(x) = -\frac{n_{p0}}{w}x + n_{p0} \quad (4.7)$$

電子による拡散電流 I_{Be} は、

$$I_{Be} = -AqD_n \left. \frac{dn_p(x)}{dx} \right|_{x=0} = AqD_n \frac{n_{p0}}{w} \quad (4.8)$$

再結合による正孔電流は、再結合による正孔の消滅分を積分して、

$$I_{Bp} = Aq \int_0^w \frac{n_p(x)}{\tau_n} dx = \frac{Awqn_{p0}}{2\tau_n} \quad (4.9)$$



ベース輸送効率は、ベースに注入された電子電流とコレクタに到達した電子電流の比であるから、

$$\begin{aligned} \alpha_T &= \frac{I_{Bn} - I_{Bp}}{I_{Bn}} = 1 - \frac{I_{Bp}}{I_{Bn}} = 1 - \frac{\frac{Awqn_{p0}}{2\tau_n}}{AqD_n \frac{n_{p0}}{w}} \\ &= 1 - \frac{w^2}{2D_n\tau_n} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w}{L_n} \right)^2 \quad (4.10) \end{aligned}$$

ここで $L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$

L_n に比べてベース幅 w を小さくすればベース輸送効率は大きくなる

4.1.3 電流増幅率 (4)

コレクタ効率はコレクタ接合を流れる電子に対する全コレクタ電流の比で表されるが、コレクタ接合を流れる正孔は電子と比べて著しく小さく無視できる。したがって通常は1と考えてよい。
以上を整理するとベース接地電流増幅率 α は次式のように表せる。

$$\alpha = \gamma \cdot \alpha_T \cdot \alpha_C \cong \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{w}{L_n} \right)^2}{1 + \frac{\sigma_B}{\sigma_E} \cdot \frac{w}{L_p}} \quad (4.11)$$

α 大きくするには、

エミッタ領域の不純物濃度を高くして $\sigma_B \ll \sigma_E$ とする。
 L_n と L_p に比べてベース幅 w を小さくする

4.1.4 バイポーラトランジスタの静特性 (1)

ベース接地の静特性

コレクタ接合は逆バイアスに印加されているので、pn接合ダイオードの特性を反転した状態を考えることができる。エミッタ接合は順バイアスなのでキャリアが注入され、これがコレクタ接合に到達することから、エミッタ電流にほぼ等しい電流が重畳されてコレクタ電流となる。

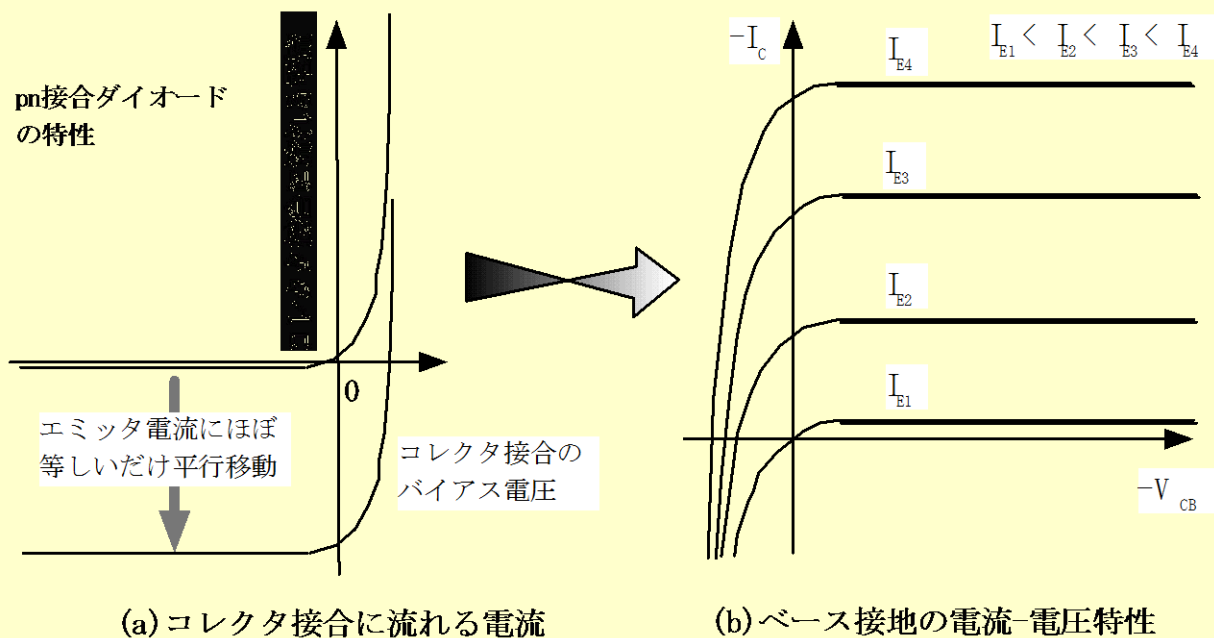


図4-5 ベース接地の静特性

4.1.4 バイポーラトランジスタの静特性 (2)

エミッタ接地の静特性

B-E間には順バイアス(V_{BE})が加えられ, C-E間には, 逆バイアス V_{CE} が加えられている. 図4.5でバイアス電圧を比較すると, I_C , I_E が等しいとすれば,

$$V_{CE} = V_{CB} + V_{EB} \quad (4.12)$$

である. I_C , I_E 変わらないので, この式からエミッタ接地の静特性は, ベース接地の特性はコレクタ電圧軸方向に $V_{BE} = -V_{EB}$ だけ平行移動させることによって得られ, エミッタ接地の静特性はすべて原点を通る. エミッタ接地ではベースが入力となるため, ベース電流をパラメータとして特性を表すことが一般的である.

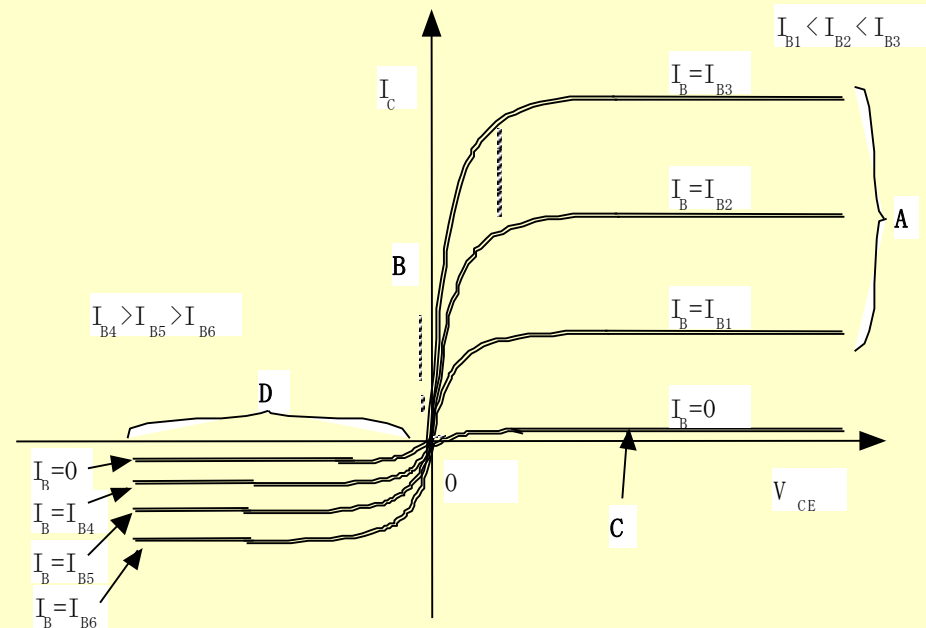


図4-6 エミッタ接地の静特性

A: 能動領域, B: 飽和領域, C: 遮断領域, D: 逆接続領域

4.2 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ

トランジスタの α を大きくするには $\rightarrow \gamma$ と α_T を大きくする $\rightarrow \sigma_B \ll \sigma_E$ とする
ところが・・・①ベース抵抗が大きくなる ②コレクタ接合容量の増大により
高周波応答が悪化 ③ベース全体が空乏化する
一方、エミッタ領域の不純物濃度を高くするにも限界がある

ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)

禁制帯幅の大きな異種材料によるヘテロ接合構造でエミッタ領域を形成し、
エミッタ効率を大きくしたもの

ベースからエミッタへの正孔
に対する障壁が大きいため、
エミッタのキャリア濃度を高く
しても γ が低下しない

ベースのキャリア濃度を高
ければ、ベース抵抗を小さく
できるので高周波応答が維
持される

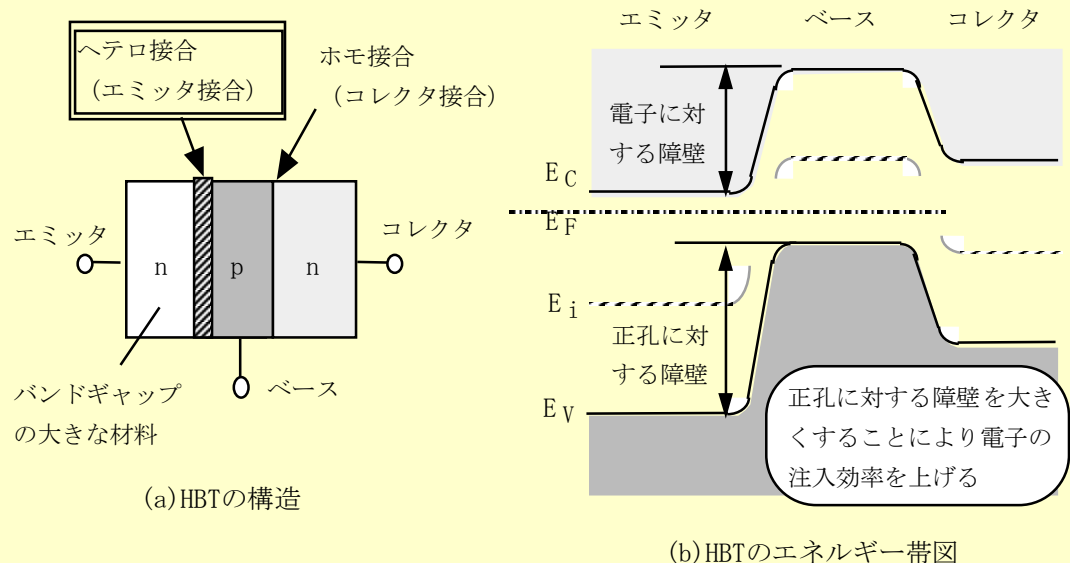


図4-7 HBTの原理

4.3 電力制御デバイス (1)

サイリスタの構造と動作原理

p-n-p-nの4層構造で構成され、陽極(A)、陰極(K)、ゲート電極(G)をもつ3端子素子である。pnpとnpnトランジスタが接続された等価回路を考える。

陽極に正、陰極に負電圧を加えた場合が順方向で、この時、 J_2 が逆バイアスとなる。 $I_G=0$ の状態では電圧を増加するとブレークオーバー電圧(V_{BF})でただれ増培が起こり、サイリスタが導通状態となる。ゲート電流 I_G がある場合は I_G がpnpトランジスタのコレクタ接合への流入となってただれ降伏を引き起こし、その結果 V_{BF} は低下する。

一方、陽極に負、陰極に正の電圧を加えた場合は、 J_1 と J_3 の接合が逆方向となり電流が阻止され、それらの接合が降伏を起こす電圧(V_{BR})まで電流は流れない。

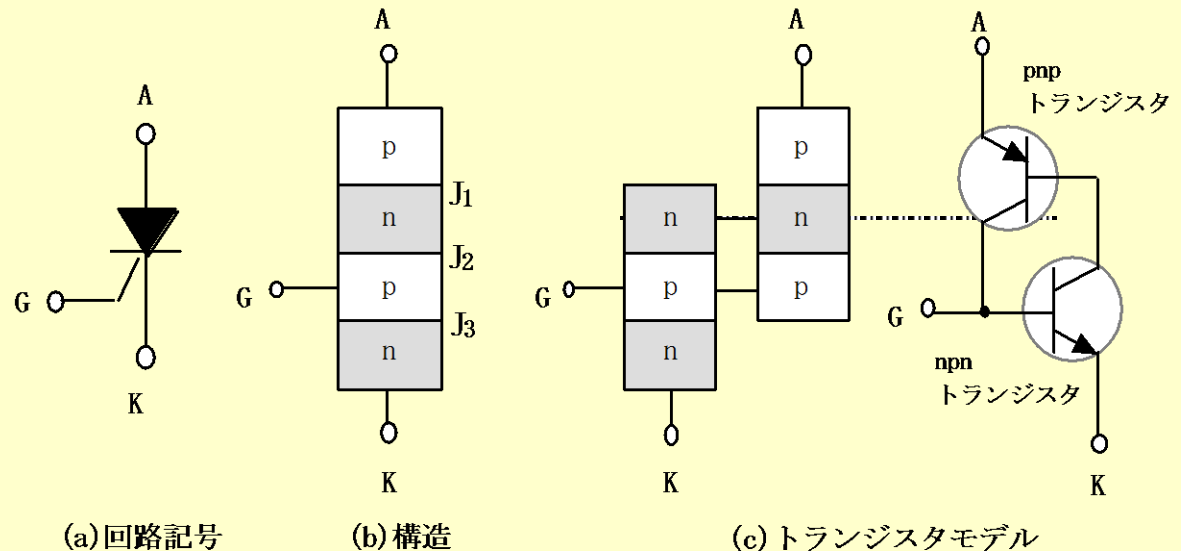


図4-8 回路記号，サイリスタの構造とトランジスタによるモデル

4.3 電力制御デバイス (2)

サイリスタの特性と電力制御

サイリスタではゲートにより陽極-陰極間の電流を制御することができるので、図に例を示すように電力制御デバイスとして用いることができる。ゲート電流を流すタイミング (t_d) を制御することにより負荷で消費される電力を制御できる。

サイリスタにおける制御できる電流と電圧は、電流が5000A、電圧が10,000Vまでである。

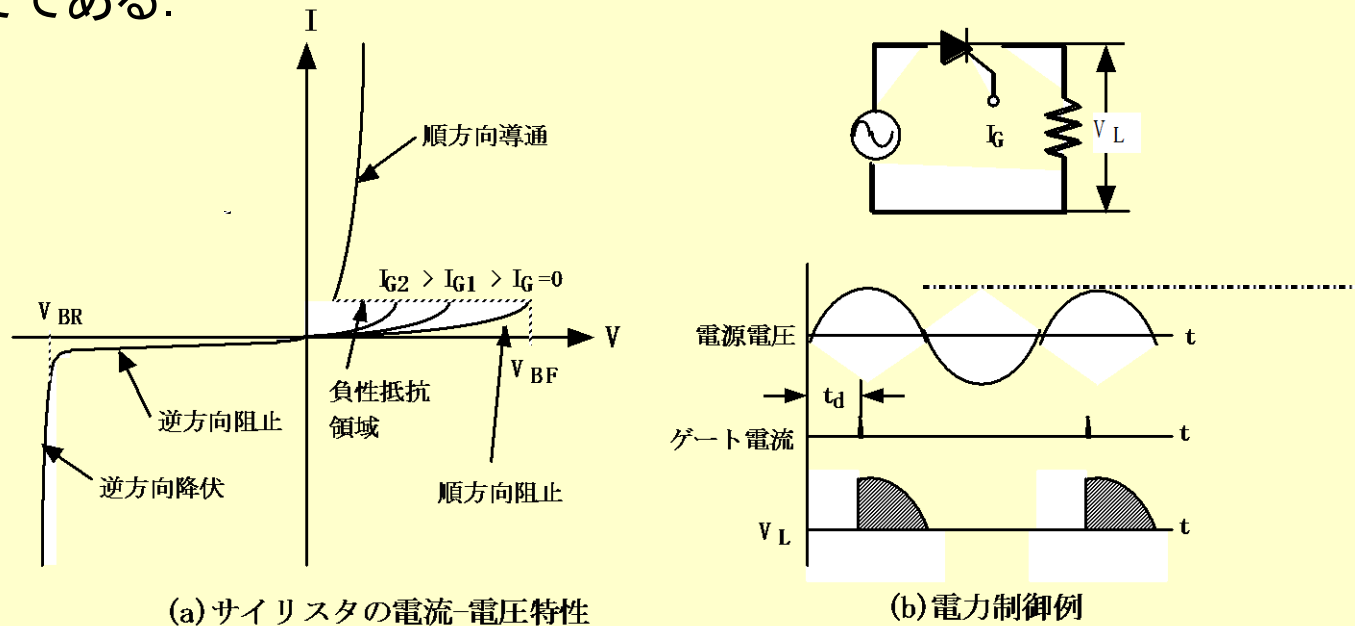


図4-9 サイリスタの電流-電圧特性と電力制御例

4.3 電力制御デバイス (3)

トライアック

双方向の3端子サイリスタである。低電圧，低電流パルスをゲートと M_1 または M_2 の間に流すことにより，どちらの向きにもスイッチング動作を行うことができる。サイリスタと同様にゲート電流を調整して，両方向のブレークオーバー電圧を変えることもできる。

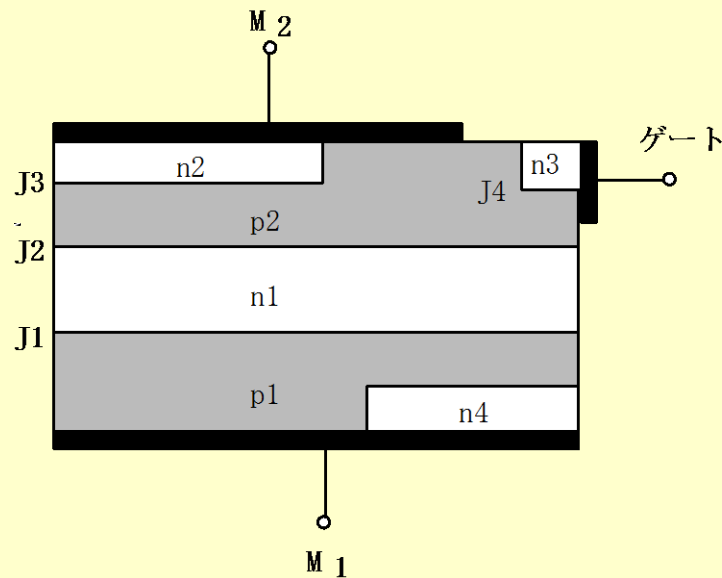


図4-10 トライアックの断面構造図

演習問題

- 問1 ベース接地電流増幅率 α が0.99であった。エミッタ接地電流増幅率 β はどれだけか。
- 問2 pnp形トランジスタの無バイアス時と動作時のエネルギー帯図を描け。
- 問3 トランジスタの電流増幅率を大きくするには、どのように設計すれば良いか考えよ。
- 問4 バイポーラトランジスタのエミッタ端子とコレクタ端子を入れ替えて用いるとどのような動作を示すか考えよ。
- 問5 電力制御デバイスの家電機器への利用例を調べよ。