

13 トランジスタの特性

トランジスタはダイオードとともに電子工学の最も基礎的な回路素子であり、電子工学を理解するためには、これらの素子の基本的な動作を理解しておくことが不可欠である。最近是集積回路の普及により、トランジスタやダイオードをディスクリートな単体部品として用いる機会はやや少なくなってきているが、集積回路も所詮はトランジスタやダイオードの組合せなのである。また自分の意図する回路を設計するに際しても、トランジスタやダイオードをディスクリートな能動部品として使いこなすことが求められる。

1 理論

トランジスタにはバイポーラトランジスタと電界効果トランジスタの2種類があるが、本実験ではより歴史が古く、ダイオードの動作とも関連が深いバイポーラトランジスタを取り扱う。ダイオードがpn接合によって構成されるのに対して、バイポーラトランジスタはpnp、またはnnpなる3極素子として構成される。この3極素子の3つの部分はエミッタ(E)、ベース(B)およびコレクタ(C)と呼ばれる。バイポーラトランジスタの表記には以下のような記号が用いられる。このテキストの以降では、バイポーラトランジスタを単に「トランジスタ」と呼ぶことにする。

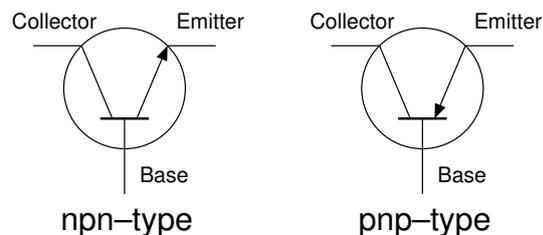


図 13.1: バイポーラトランジスタ

1.1 トランジスタの基本動作

以下では pnp 型（本によっては、PNP 型と表記してある場合もある）のトランジスタについて、動作原理を示す。pnp 型トランジスタでは、図 13.2 に示すようにエミッタ側の pn 接合 (E-E 面) には順方向電圧を加える。したがってエミッタの多数キャリア（この場合ホール）がベースに注入される。これはベース内部では少数キャリアとして振る舞う。通常少数キャリアはその空間の多数キャリアと再結合してしまうのだが、ベース領域は非常に薄く作られているため、これらのホールはベース電極で捕らえられることなくコレクタ側の np 接合 (C-C 面) に到達する。するとコレクタ側には逆方向電圧が印加されているので、ベース側から接合に到達したホールは加速されてコレクタへと流

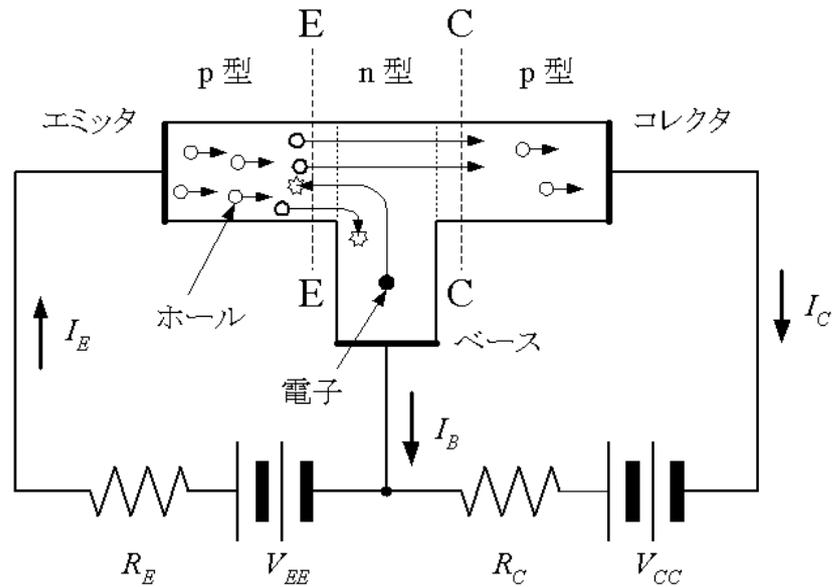


図 13.2: pnp 型トランジスタの動作

れる。(pn 接合におけるホール、電子の動きかたについては、テキストのダイオードの項、ホール効果の項なども参照のこと。)

このように、エミッタからベースに流れ込んだ電流 i_e のほとんどの部分はベースを通り抜けてコレクタに到達し、コレクタ電流 i_c となる。このとき、電流比 $\alpha = i_c/i_e$ はほぼトランジスタの構造にによって定まり、この値 α を電流増幅率と呼ぶ。通常のトランジスタにおいて、電流増幅率は 1 よりもわずかに小さい値 (0.98 ~ 0.99 程度) をとる。

なお、既にのべたように、トランジスタには pnp 型のものと npn 型のものがあり、用途によって使い分けられているが、npn 型の場合には以上の議論において、キャリアおよび印加電圧の極性が反対となることに注意する。この実験で用いるトランジスタは、npn 型のものである。

市販のトランジスタは pnp 型と npn 型によって名前も次のように区別されている。

	pnp 型	npn 型
高周波用	2SA	2SC
低周波用	2SB	2SD

Q. npn 型のトランジスタについて、図 13.2 に対応する図を書いてみよ。

1.2 トランジスタ回路

通常のバイアス条件下における npn 型トランジスタの、最も簡単な等価回路は図 13.3 のように書ける。通常のバイアス条件とは、エミッタ - ベース間

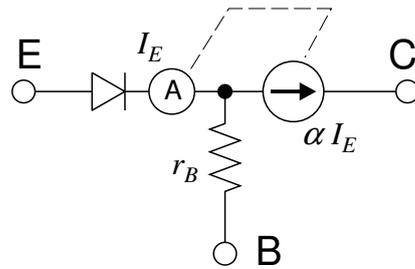


図 13.3: トランジスタの等価回路

には順方向電圧が、ベース - コレクタ間には逆方向電圧がかかっている状態である。コレクタ側にはエミッタ電流の α 倍分 ($\alpha < 1$ に注意) の電流を引き込む直流電流源があると考える。

トランジスタの基本回路としては、ベース接地回路、エミッタ接地回路、コレクタ接地回路 (= エミッタフォロア回路) の 3 つがある。これらの 3 つの回路はそれぞれ特徴があつて、目的によって使い分けられているが、本実験においては、ベース接地回路とエミッタ接地回路について、その静特性を調べ、トランジスタの電流増幅作用について理解する。

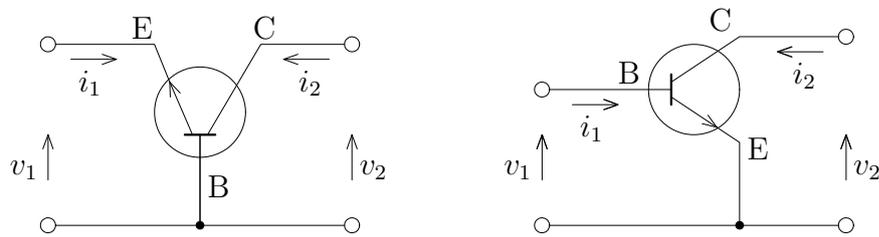


図 13.4: (a) ベース接地回路 と (b) エミッタ接地回路

図 13.4 (a) のベース接地回路のトランジスタの部分を図 13.3 の等価回路で置き換えてみると、ベース接地回路、エミッタ接地回路それぞれにおいて

$$-\frac{i_2}{i_1} = \alpha \quad (\text{ベース接地}) \quad (13.1)$$

$$\frac{i_2}{i_1} = \beta \left(\equiv \frac{\alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (\text{エミッタ接地}) \quad (13.2)$$

となる。

α は 1 よりわずかに小さい値であつたので、 β 、つまりエミッタ接地回路での i_2/i_1 は非常に大きな値となり、エミッタ接地回路が電流増幅回路として利用できる理由となっている。

2 実験

2.1 実験装置

半導体実習装置、デジタルマルチメータ (Advantest) × 2、
デジタルマルチメータ (METEX)、供試トランジスタ、外部電流源

半導体実習装置 岩通製のもので、内部に電流源と電圧源が内蔵されている (ただし内蔵の電流源は使用しない)。パネルの手前左にある主電源を入れる際には、電流調整つまみが左いっぱい、電圧調整つまみが中央にあるのを確かめるようにする。

表示盤上の各端子は線でつながれているが、この線が実線のものには実際に電気的につながっているもの、破線のものには便宜のために書かれているだけで実際にはつながっていないものである。パネル上のアースの絵につながっている端子は全て電気的に接続されている。また、電流源、電圧源の出力端子の另一端もこのアースにつながれている。

供試トランジスタ：2SC815 (npn 型) すでに実習装置に実装されているものを用いる。最大定格は $V_{CE} < 60V$ 、 $P = V_{CE} \cdot i_c < 250mW$ であるので、実験条件がこれらの値を越えないように注意する。

外部電流源 菊水電子製のもの。実習装置に内蔵の電流源は電流の極性が決まってしまうので、本実験ではこの外部電流源を用いるものとする。

中央部の口 - タリ - スイッチで電流レンジを決め、3つのダイヤルによって出力電流を変化させる。電流レンジによって違う位置に赤色の LED ランプが点灯するが、これが小数点の位置を表している。

なお、インピ - ダンスの関係で、ダイヤルによる表示電流と、METEX マルチメータで測定した電流値が異なる場合があるが、その場合はマルチメータの読みを採用する。

2.2 実験手順

2.2.1 ベース接地回路

実習装置の主電源をはじめ、全ての電源が切れているのを確認した後、ベース接地特性の測定回路を図 13.5 のように組む。 i_e には外部電流源を、 E_{bb} には内蔵の電圧源をそれぞれ接続する。外部電流源のレンジは 10 mA レンジとし、図中のアース端は実習装置のア - スに接続する。また、npn 型トランジスタに対しては正の E_{bb} をかけなければならないことに注意し、極性が反対にならないようにする。

コレクタ電圧測定用には、Advantest マルチメータの 10 V 電圧モード、コレクタ電流測定用にはもう一台の Advantest マルチメータの 10 mA 電流モード

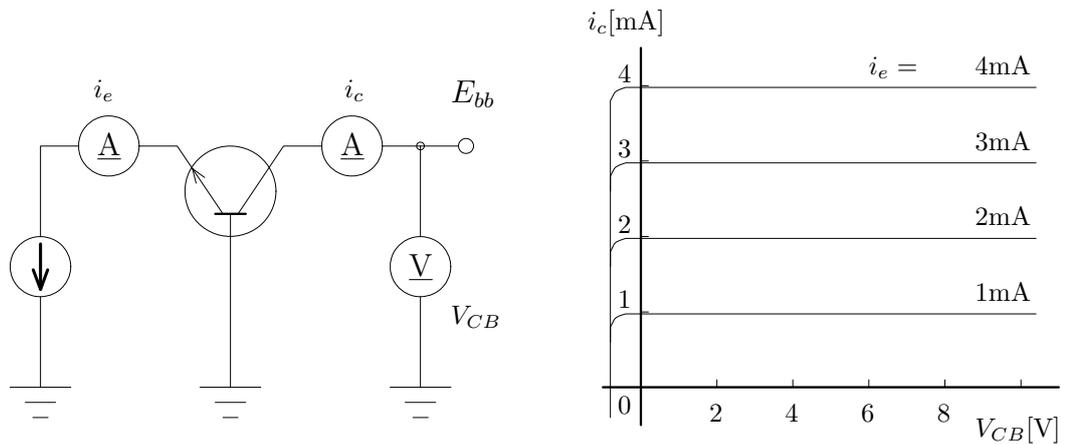


図 13.5: (a) ベ - ス接地特性測定回路 (b) ベ - ス接地特性の測定例

ドをそれぞれ用いる。またベ - ス電流の測定用には METEX マルチメータの DCA 200mA レンジを用いる。電圧源、電流源の出力がゼロ設定であることを確認の後、各装置の電源を投入する。

エミッタ電流 i_e をパラメータとし、 V_{CB} を 0 V から正方向へ上昇させた時の i_c を測定し、その結果をグラフとして表示する。

エミッタ電流としては 1 mA、3 mA、5 mA、7 mA をとる。コレクタ電流が正の値をとり、かつトランジスタの最大定格を超えないような範囲でコレクタ電圧を変化させ、測定を行う。ベース接地特性の一例は図 13.5 (b) に示した。

2.2.2 エミッタ接地回路

ベ - ス特性の測定が終了したら、全てのスイッチを切り、回路を図 13.6 (a) のように組み変える。組み変えの際、外部電流源の極性が逆になっていることに注意せよ。

コレクタにつないだ Advantest マルチメータおよび内蔵電圧源の部分は変更する必要がない。外部電流源は $100 \mu A$ レンジとし、ベ - ス電流の測定には METEX マルチメータの DCA $200 \mu A$ レンジを用いる。

測定のパラメータ i_b としては $20 \mu A$ 、 $40 \mu A$ 、 $60 \mu A$ 、 $80 \mu A$ 、 $100 \mu A$ を選択し、 $i_c - V_{CE}$ の関係を記録する。エミッタ接地特性の例は図 13.6 (b) に示す。

3 解析

エミッタ接地回路及びベース接地回路のグラフが測定できたら、 α 、 β をグラフから求める。グラフには緩やかな電圧依存性が見られるが、例えば $V_{CB} = 6V$

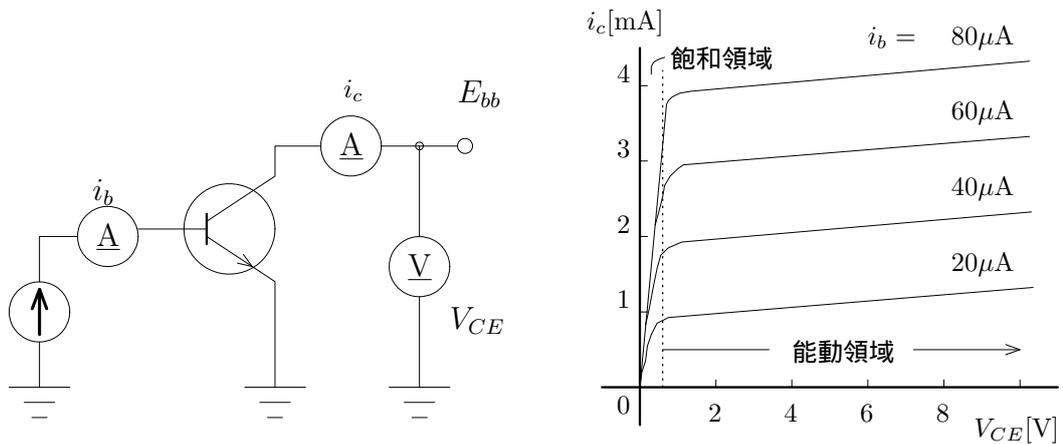


図 13.6: (a) エミッタ接地特性測定回路 (b) エミッタ接地特性の測定例

や $V_{CE} = 6V$ のところでの電流比を取ってみればよい。

実験グラフから得られた両者が、測定誤差の範囲で式 13.2 の右側の等式の関係を満たしているかどうかを確認してみよう。その際には、 α や β の電流・電圧依存性をどのように扱えば良いか考察してみよう (当日の実験はここまでできれば OK)。

さらに、参考文献に挙げている書籍なども参考にしながら、各グラフの特徴を抽出し、それらを決定している因子を等価回路から推測してみよう。すでにダイオードの実験を行っている人には、pn 接合特性から考えた、トランジスタの静特性のグラフの特徴に関するより進んだ考察を期待する。

さらに、トランジスタの具体的な応用例 (増幅素子、スイッチング素子等) において、測定した静特性の各領域がどのような役割を果たしているかについて調べてみよう。

参考文献

- [1] 庄野克房：「半導体技術 (上)」東京大学出版会.
- [2] 鈴木雅臣：「定本 トランジスタ回路の設計」CQ出版社.
- [3] D.A.Fraser：「オックスフォード物理学シリーズ 16 半導体素子の物理」丸善