

トランジスタ<sup>①</sup>は、ラジオ受信機やテレビジョン受像機などの電子機器に広く利用されている。トランジスタを大別すると、バイポーラトランジスタ<sup>②</sup>と電界効果トランジスタ<sup>③</sup>に分けることができる。ここでは、バイポーラトランジスタの特性や利用方法などについて学ぶ。バイポーラトランジスタは、たんにトランジスタとよぶことが多い。

## 1 トランジスタとは

### 1 構造と図記号<sup>④</sup>

トランジスタには、ベース<sup>⑤</sup>B・コレクタ<sup>⑥</sup>C・エミッタ<sup>⑦</sup>Eとよばれる三つの電極がある。ベースを中間に、コレクタとエミッタがはさんだ構造になっている。また、図1のようにn形-p形-n形半導体のnpn形トランジスタと、p形-n形-p形半導体のpnp形トランジスタの2種類がある。

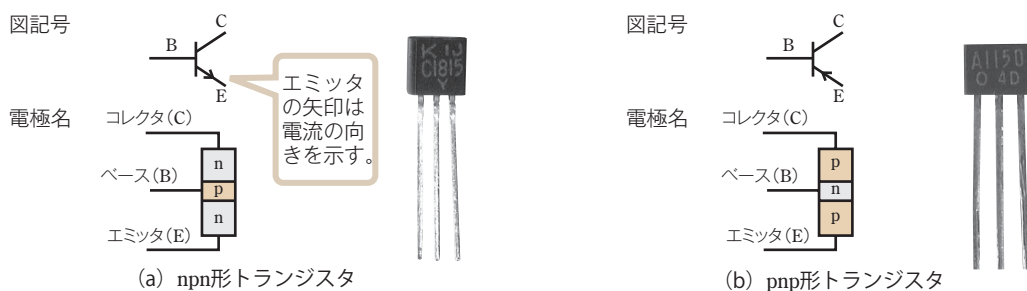


図1 npn形トランジスタとpnp形トランジスタの図記号と電極名

### 2 動作原理

図2にnpn形トランジスタの動作を示す。エミッタEを入出力の共通端子とし、電圧 $V_1$ 、 $V_2$ を図2のように加える。このようにエミッタを入出力の共通端子にする場合をエミッタ接地回路という。

ベースBに電流 $I_B$ を流すと、コレクタCからエミッタEに電流 $I_C$ が流れる。このとき、エミッタEの電子がベースBへ移動する。電子はベースで正孔と結合するが、ベースの幅がきわめて狭いので、ベースで正孔と結合する電子は少数であり、大部分(99~99.8%)はコレクタCに到達する。

① transistor

② bipolar transistor

電子と正孔の2種類の電荷をキャリアとするトランジスタ。本書では、トランジスタと表記したものは、バイポーラトランジスタを示す。

③ field-effect transistor

FETともいう。電子または正孔のいずれか1種類の電荷をキャリアとするトランジスタで、ユニポーラ(unipolar)トランジスタともいう。p.127参照。

④ 図記号の矢印は電流の向きを表す。

⑤ base

「基準」の意味。

⑥ collector

「集めるもの」の意味。

⑦ emitter

「放射するもの」の意味。

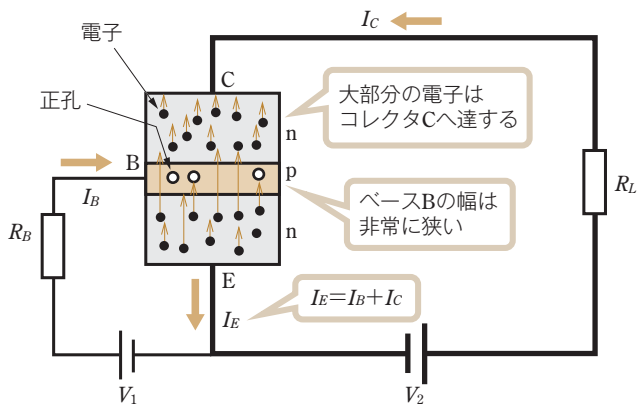


図2 npn形トランジスタの動作原理

したがって、入力電流であるベース電流  $I_B$  はひじょうに小さく、出力電流であるコレクタ電流  $I_C$  はひじょうに大きくなる。ここで、 $I_B$  と  $I_C$  の比を直流電流増幅率といい、 $h_{FE}$ <sup>①</sup> を用いる。 $h_{FE}$  は次の式で表される。

① 電流増幅率には、直流電流増幅率  $h_{FE}$  と小信号電流増幅率  $h_{fe}$  がある。小信号電流増幅率は、 $\Delta I_C / \Delta I_B$  で表されるように、変化した分の比になる。

●直流電流増幅率 
$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B} \quad (1)$$

5

このことから、小さなベース電流  $I_B$  で大きなコレクタ電流  $I_C$  を制御できることになる。また  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $I_E$  の間には次の関係がある。

●エミッタ電流 
$$I_E = I_B + I_C \quad (2)$$

**例題 1** 図2の回路で、ベース電流  $I_B$  が  $5 \mu\text{A}$  のとき、 $I_C$  が  $1 \text{ mA}$  になった。このトランジスタの  $h_{FE}$  を求めよ。

10

解答… 式(1)より、
$$h_{FE} = \frac{1 \times 10^{-3}}{5 \times 10^{-6}} = 200$$

**問 1** 図3の回路で、コレクタ電流  $I_C$  が  $3 \text{ mA}$ 、ベース電流  $I_B$  が  $10 \mu\text{A}$  であった。この回路のエミッタ電流  $I_E$  を求めよ。

**問 2** pnp形トランジスタを図3に示すように接続したとき、キャリアはどのように移動するか。図の中のキャリアに矢印をかき、キャリアが移動する向きと流れる電流の向きを示せ。

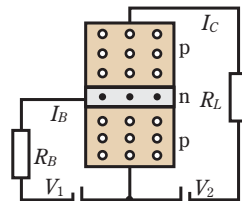


図3

15

### 3 特性

エミッタ接地のトランジスタの特性を調べるには、図4のように電源・可変

20

抵抗器・直流電圧計および直流電流計を接続して測定する。

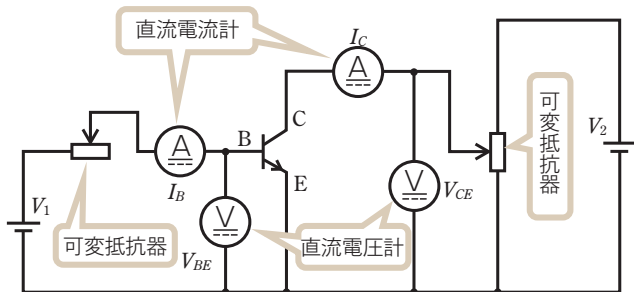


図4 トランジスタの静特性の測定(エミッタ接地)

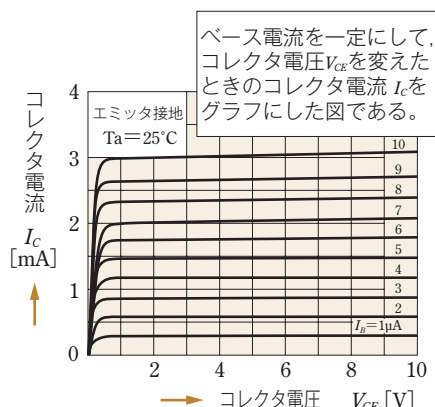


図5 トランジスタの出力特性

エミッタを共通にし、トランジスタの各端子間の直流電圧と電流  
の関係を表したものを、**エミッタ接地の静特性<sup>①</sup>**という。

① static characteristics

図5は静特性の一部で、出力特性ともよばれている。ベース電流  
 $I_B$ を一定にしておき、エミッタとコレクタ間の電圧  $V_{CE}$ とコレクタ  
電流  $I_C$ の変化をグラフに表したものである。

## 試してみよう

トランジスタの小信号電流増幅率  $h_{fe}$  を求めてみよう

小信号電流増幅率  $h_{fe}$  は、トランジスタを動作状態に  
おき、ベース電流をわずかに増加させたときに、コレク  
タ電流がいくら増加するかで表す。すなわち、 $h_{fe}$  は、

$$h_{fe} = \frac{\text{コレクタ電流の増加分}}{\text{ベース電流の増加分}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$

【測定順序】

① 可変抵抗器 VR・抵抗  $10\text{k}\Omega$ ・直流電流計・トラン  
ジスタ・電池を、測定回路図に従って接続する。可変  
抵抗器 VR は、アース(ー側)に回しておく。

② 可変抵抗器 VR を調整して、ベース電流  $I_B$  を流し、  
そのときのコレクタ電流  $I_C$  を記録する。

③ 測定値をもとに、図7のように横軸にベース電流  $I_B$   
を、縦軸にコレクタ電流  $I_C$  をとり、グラフをかく。

【測定例】

トランジスタ 2SC2240 の小信号電流増幅率  $h_{fe}$  は、

$$\begin{aligned} h_{fe} &= \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{1\text{mA}}{3\mu\text{A}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{3 \times 10^{-6}} = \frac{1000}{3} \\ &= 333 \end{aligned}$$

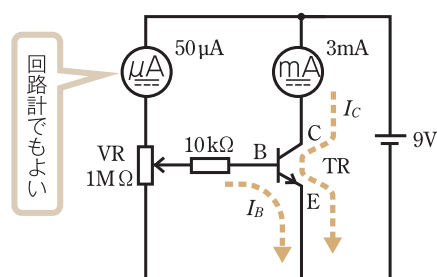


図6 測定回路図

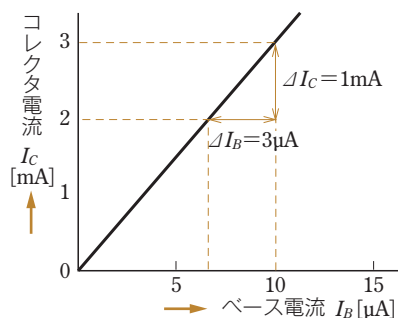


図7 測定結果のグラフ

① 電子情報技術産業協会 (JEITA) で定められている規格。

## 4 名称

ダイオードやトランジスタなどの半導体の名称は、EIAJED-4001A<sup>①</sup>において

図8のように定められている。

1	S	R	99	R
1項 (数字)	2項 (文字)	3項 (文字)	4項 (数字)	5項 (添え字)
有効電氣的接続から1を引いた数	半導体素子を表す大文字のSとする	おもな機能および構造を表す	1項および3項の文字によって区分された種別ごとの2桁以上の連続数字	JEITAで定められている原則による。
1: ダイオード 2: トランジスタ 3: FET (ゲートが2つ出ているもの)	A: pnp形トランジスタ (高周波用) B: pnp形トランジスタ (低周波用) C: npn形トランジスタ (高周波用) D: npn形トランジスタ (低周波用) E: pnp形とnpn形を組み合わせた複合トランジスタ (高周波用) F: pnp形とnpn形を組み合わせた複合トランジスタ (低周波用) G: p形チャネル絶縁ゲートバイポーラトランジスタ H: n形チャネル絶縁ゲートバイポーラトランジスタ	J: p形チャネルFET K: n形チャネルFET M: p形チャネルおよびn形チャネルトランジスタを組み合わせた複合形FET R: 整流ダイオード S: 信号ダイオード V: 可変容量ダイオード Z: 定電圧ダイオード		A~H, J, K : 変更を表す添字 M: マイクロ波用ダイオードの整合の対を表す添字 R: ダイオードの逆極性に對する添字 その他

図8 個別半導体素子の形名

## 2 増幅動作

② amplification

### 1 増幅とは

増幅<sup>②</sup>とは、小さな入力信号を大きな出力信号にすることをいう。図9では、マイクロホンの小さな信号を増幅回路で増幅して、スピーカを鳴らしている。スピーカを鳴らしているエネルギーのほとんどは直流電源なので、入力信号で直流電源が制御されたことになる。

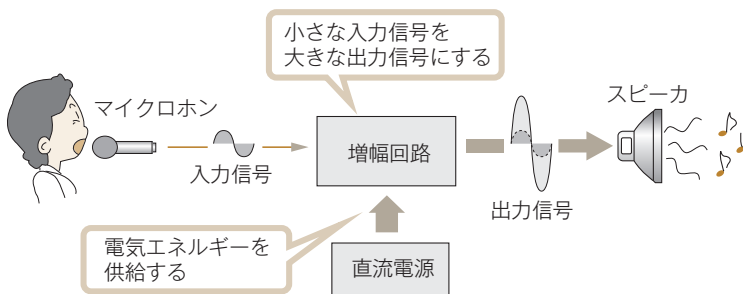


図9 増幅の原理

### 2 増幅度

出力電圧と  
入力電圧の

③ voltage amplification

④ current amplification

比を電圧増幅度<sup>③</sup>といい、出力電流と入力電流の比を電流増幅度<sup>④</sup>という。電圧増幅度と電流増幅度の関係は、図10のようになり、次の式(3)、(4)で表される。

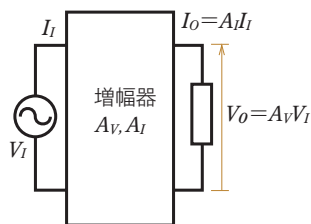


図10 増幅度

●電圧増幅度  $A_V = \frac{\text{出力電圧 } V_O}{\text{入力電圧 } V_I}$  (3)

●電流増幅度  $A_I = \frac{\text{出力電流 } I_O}{\text{入力電流 } I_I}$  (4)

問 3 入力電流  $I_I$  が  $250\mu\text{A}$  のとき、出力電流  $I_O$  が  $50\text{mA}$  であった。電流増幅度はいくらか。

5 問 4 電圧増幅回路の入力電圧  $V_I$  が  $20\text{mV}$  のとき、出力電圧  $V_O$  が  $3\text{V}$  であった。電圧増幅度  $A_V$  を求めよ。

問 5 電流増幅度  $A_I = 200$  の増幅器の出力電流を  $40\text{mA}$  とするには、入力電流はいくらか。

### 3 固定バイアス回路

図 11 は、npn 形トランジスタのエミッタ接地増幅回路である。このような回路では、入力信号が正または負に変化しても、ベース電流  $i_B$  は正の半波しか流れない。そこで正、負の全サイクルを増幅するために、無信号のときでもベースに電流を流しておく必要がある。この電流をバイアス電流<sup>①</sup>とよぶ。図 12 の回路は、固定バイアス回路<sup>②</sup>とよばれ、動作原理は、①～③のようになる。

① 無信号のときでも、電源  $V_{CC} \rightarrow$  抵抗  $R_B \rightarrow$  ベース B というようにバイアス電流を流しておく。

② 入力信号が正の半波のときは、バイアス電流に入力信号からの電流が加わるのでベース電流  $i_B$  が増える。

③ 入力信号が負の半波のときは、バイアス電流と入力信号からの

参考 トランジスタの量記号と意味

量記号	意 味
$V_{BE}, V_{CE}$	直流分の電圧
$v_{BE}, v_{CE}$	直流分と交流分を含む電圧の瞬時値
$I_B, I_C$	直流分の電流
$i_B, i_C$	直流分と交流分を含む電流の瞬時値
$V_i, V_o$	交流分の電圧の実効値
$v_i, v_o$	交流分の電圧の瞬時値
$I_i, I_o$	交流分の電流の実効値
$i_i, i_o$	交流分の電流の瞬時値

① bias current

② fixed bias circuit

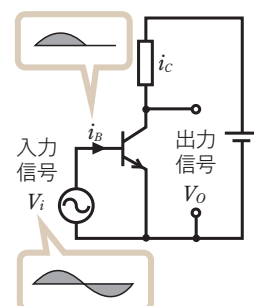


図 11 npn 形トランジスタの動作

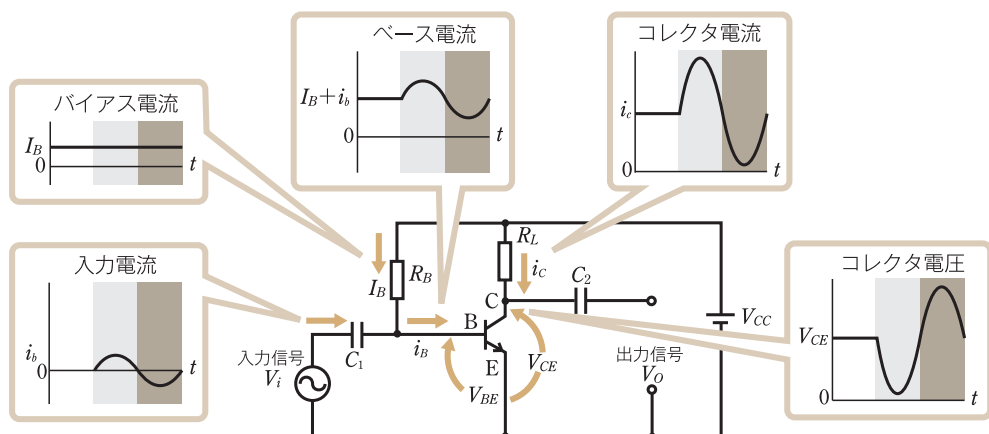


図 12 固定バイアス回路を用いた増幅回路

電流が逆方向になるのでベース電流  $i_B$  が減る。

固定バイアス回路では、温度が変化するとバイアス電流も変化するという欠点がある。また、回路中のコンデンサ  $C_1$ 、 $C_2$  は結合コンデンサといい、直流分は通さず交流分だけを通す役目をする。

#### 4 固定バイアス回路の動作

ベース側の回路では、次の式がなりたつ。

$$\bullet \text{ ベース側回路での電圧の関係} \quad V_{CC} = I_B R_B + V_{BE} \quad (5)$$

式(5)をもとに、ベース電流  $I_B$  は次の式から求められる。なお、シリコントランジスタの場合、 $V_{BE}$  は約  $0.6\text{V}$  である。

$$I_B = \frac{V_{CC} - 0.6}{R_B} \quad (6)$$

また、コレクタ側の回路については次の式がなりたつ。

$$\bullet \text{ コレクタ側回路での電圧の関係} \quad V_{CC} = V_{CE} + I_C R_L \quad (7)$$

#### 例題2 図13の固定バイアス回

路において、 $V_{CC} = 6\text{V}$ 、 $I_C = 1\text{mA}$  としたときの、コレクタ・エミッタ間電圧  $V_{CE}$  と、 $R_B$  の値を求めよ。ただし、 $h_{FE} = 200$ 、 $V_{BE} = 0.6\text{V}$  とする。

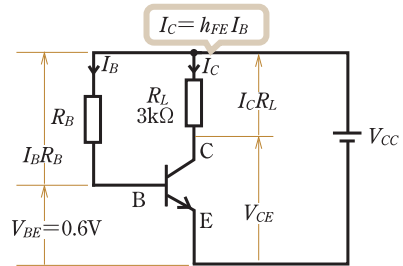


図13

解答…  $V_{CE}$  を求めるためには、式(7)より、

$$\begin{aligned} V_{CE} &= V_{CC} - I_C R_L \\ &= 6 - 1 \times 10^{-3} \times 3 \times 10^3 = 3\text{V} \end{aligned}$$

$R_B$  を求めるために、 $I_B$  を求める。式(1)より、

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{1 \times 10^{-3}}{200} = 5 \times 10^{-6} = 5\mu\text{A}$$

式(5)より、

$$R_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{I_B} = \frac{6 - 0.6}{5 \times 10^{-6}} = 1.08 \times 10^6 = 1.08\text{M}\Omega$$

**問 6** 図13の回路において  $V_{CC} = 12\text{V}$ 、 $I_B = 10\mu\text{A}$  としたとき、 $R_B$  の値を求めよ。ただし、 $V_{BE} = 0.6\text{V}$  とする。

**問 7** 図13の回路において  $V_{CC} = 12\text{V}$ 、 $I_C = 2\text{mA}$  としたときのコレクタ・エミッタ間電圧  $V_{CE}$  と  $R_B$  の値を求めよ。ただし、 $h_{FE} = 250$ 、 $V_{BE} = 0.6\text{V}$  とする。

## 5 電流帰還増幅回路

固定バイアス回路は、周囲の温度が上がったとき、動作が不安定になる場合

がある<sup>①</sup>。

この対策として考え出されたのが、図14に示す電流帰還増幅回路である。この回路は、周囲温度が上がっても次の①～⑤のような動作によってコレクタ電流が増えず、安定した増幅回路となる。

- ① 周囲温度が上昇する。
- ② コレクタ電流  $I_C$  が増える。
- ③ エミッタ電圧  $V_E$  が増加する。( $V_E = I_E R_E \approx I_C R_E$ )
- ④  $V_{BE}$  が減少する<sup>②</sup>。
- ⑤  $I_B$  が減り、 $I_C$  が減る。

① 温度が上昇するとコレクタ電流が増え、さらに温度が上がり、トランジスタが破損することがある。このような現象を熱暴走という。

$$\begin{aligned} \textcircled{2} \quad V_B &= V_{BE} + V_E \\ V_{BE} &= V_B - V_E \\ &= V_B - I_C R_E \end{aligned}$$

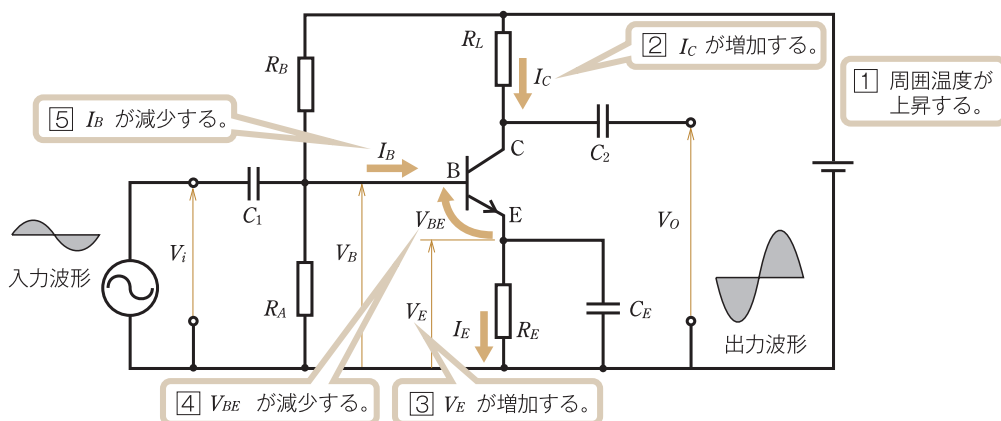


図14 電流帰還増幅回路

入力電圧  $v_i$  が加わると、 $v_i$  の増加とともにベース電流  $i_b$  が増加し、コレクタ電流  $i_c$  も増える。そのため、負荷抵抗  $R_L$  の電圧降下が大きくなり、コレクタ電圧  $V_{CE}$  は低くなる。すなわち、入力電圧が増加するとコレクタ電圧は低下し、逆に入力電圧が減少するとコレクタ電圧は増加する。

このような動作によって、入力電圧とコレクタ電圧（出力電圧）との間には  $180^\circ$  の位相差が生じ、図のような関係の出力波形となる。

## 6 電力増幅回路

電力増幅回路は、スピーカを鳴らしたり、電波を発射したりするような、大きな出力を得るための回路である。図15は電力増幅回路の原理図で、音声信号を増幅してスピーカを鳴らすことができる回路である。

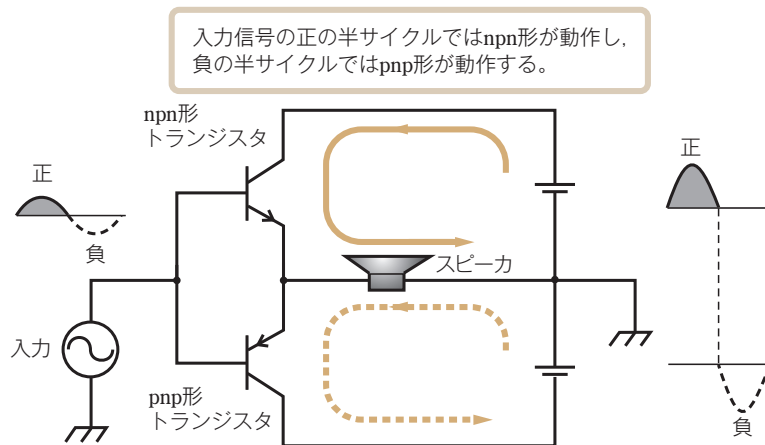


図 15 電力増幅回路

入力信号がベースに加わると、入力波形の正の半波では npn 形トランジスタが動作し、負の半波では pnp 形トランジスタが動作して入力信号を増幅し、スピーカに電流を流す。波形を半波に分けて増幅するので、2 個のトランジスタは、特性のそろったものが必要になる。

5

## 7 スイッチ動作

図 16 の回路でベース電流  $I_B$  を流すと、コレクタ電流  $I_C$  が流れる。この状態でベース電流を大きくしていくと、コレクタ電流も大きくなるが、コレクタ電流は最大電流  $I_{Cm} (\equiv V_{CC}/R_L)$  以上には増えない。このようなときトランジスタのコレクタとエミッタ間は短絡しているのと同じ働きをするので、トランジスタはオンの状態になる。

10

次に、ベース電流を流さないようにすると、コレクタ電流も流れなくなり、トランジスタはオフの状態になる。このように、トランジスタの動作をスイッチに置き換えることができるので、このことをトランジスタのスイッチ動作という。

15

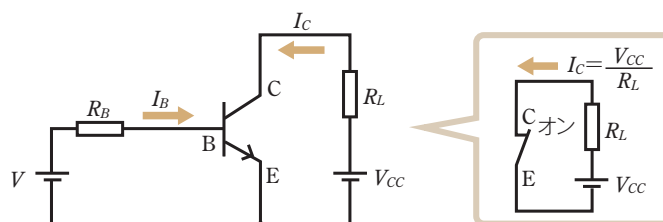


図 16 トランジスタのスイッチ動作



### 3 電界効果トランジスタ

電界効果トランジスタは<sup>エフイーティー</sup>**FET**<sup>①</sup>ともよばれ、電圧制御の半導体素子として電子機器の増幅回路などに利用されている。

ここでは、接合形FETとMOS形FETについて学ぶ。

#### 1 接合形FET

接合形FETにはソース<sup>②</sup>、ゲート<sup>③</sup>、ドレーン<sup>④</sup>とよぶ電極があり、キャリアが移動する領域をチャンネル<sup>⑤</sup>とよぶ。図17(a)はチャンネルがn形半導体なので、**n形チャンネル**といい、図(b)はp形半導体なので、**p形チャンネル**という。また、図(c)はそれぞれの図記号である。

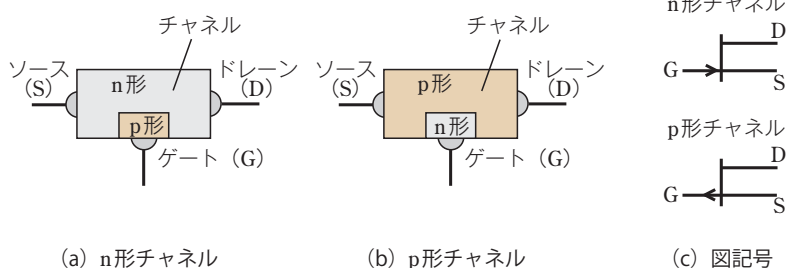


図17 接合形FETの構造と図記号

図18にn形チャンネルFETの動作を示す。

① 図(a)のようにゲート電圧 $V_{GS}$ を加えないとき、n形領域の電子はドレーンに引き寄せられるので、ドレーン電流 $I_D$ が流れる。

② 図(b)のように、 $V_{GS}$ を逆電圧とすると空乏層が広がり、 $I_D$ が流れにくくなる。

③ したがって、 $V_{GS}$ により $I_D$ の値が変化する。

図19は接合形FETの特性例である。

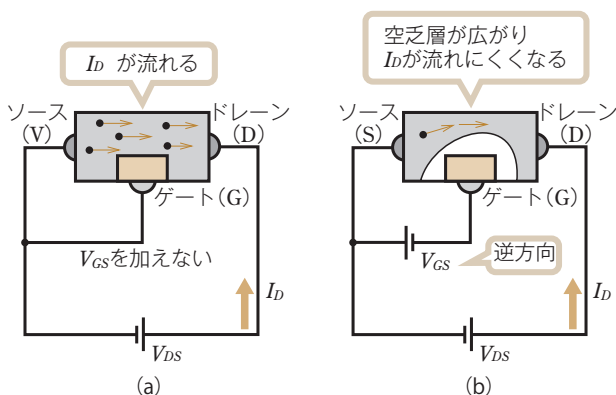


図18 接合形FETの動作

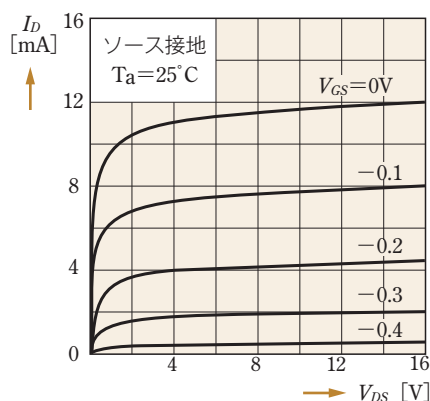


図19 接合形FETの特性例

① field-effect transistor

FETはトランジスタに比べて入力インピーダンスが大きく、雑音が少なく、消費電力も小さくて、集積回路化が進んでいる。

② source

③ gate

④ drain

⑤ channel

#### 参考

トランジスタと異なり、S-G間は逆方向電圧なので電流が流れない。したがって入力インピーダンスの大きな増幅器をつくることができる。

① metal oxide semiconductor  
金属 (M), 酸化物 (O), 半導体 (S) の構成。

② depletion  
消耗, 減少の意味。

③ enhancement  
増進, 増加の意味。

## 2 MOS形FET

MOS<sup>①</sup>形FETは酸化絶縁膜を利用したものである。図20(a)のような構造

で, 接合形FETに比べて小さくつくることができ, 入力抵抗は $10^{14}\Omega$ 程度と, きわめて大きいという特徴がある。MOS形FETは, その特性上からデプレッション形<sup>②</sup>とエンハンスメント形<sup>③</sup>に分けられる。それぞれにp形チャネルとn形チャネルがあり, 図(b)に図記号を示す。

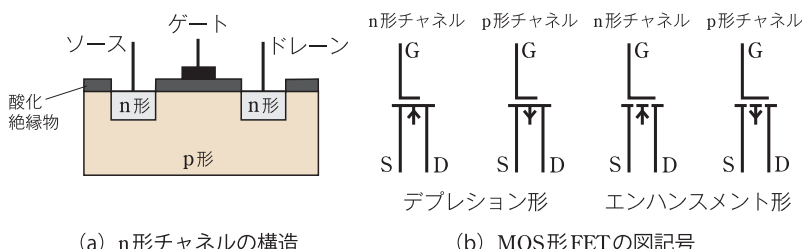


図20 MOS形FET

デプレッション形は, ゲートに電圧を加えなくても回路電流 $I_D$ が流れる。図21のように, デプレッション形はゲートとソース間電圧 $V_{GS}$ が負の領域で動作させる特性をもつ。エンハンスメント形は, ゲートに電圧を加えないと電流が流れない。 $V_{GS}$ が正の領域で動作させる特性をもつ。

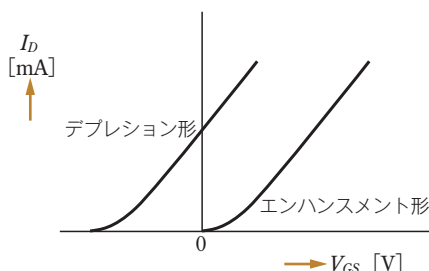


図21 デプレッション形の動作特性

## 4 その他の半導体素子

④ p.136参照。

ダイオードやトランジスタおよびIC<sup>④</sup>以外にも, いろいろな半導体素子が電子機器の各部に利用されている。ここでは, いろいろな制御に利用されているサイリスタ, 磁束を検出するホール素子, 温度センサとして利用されているサーミスタおよび光を検出するCdSセルについて学ぶ。

⑤ thyristor

## 1 サイリスタ

サイリスタ<sup>⑤</sup>は, 図22に示すように, pnpn4層構造の素子で, スイッチング素子として使われる。ゲート (G) に制御電圧を加えると, アノード (A) とカソード (K) の間に電流が流れはじめる。これをターンオン<sup>⑥</sup>という。

⑥ turn on

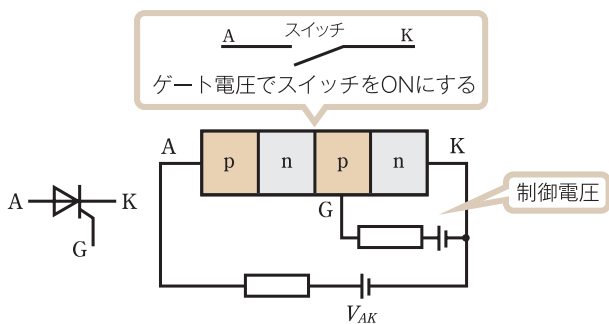


図22 サイリスタの図記号と原理

アノードとカソードの間に電流が流れないようにするには、 $V_{AK}$ を0Vまたは逆電圧にする。これをターンオフ<sup>①</sup>という。

① turn off

## 2 ホール素子

図23の  
ように

半導体に電流を流して、それと垂直に磁界を加えると、電流と磁界に直角に数十mVの電圧が発生する。これをホール効果<sup>②</sup>といい、この現象を利用して、磁束などを検出する素子をホール素子<sup>③</sup>という。

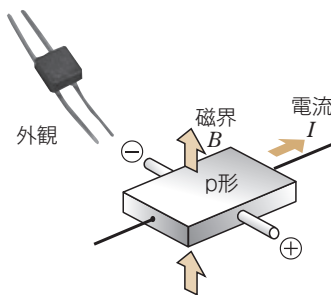


図23 ホール素子

② Hall effect

③ Hall element

## 3 サーミスタ

温度が上昇すると抵抗値が大きく変化する半導体素子をサーミスタ<sup>④</sup> (図24)

という。サーミスタは、おもに温度センサとして家庭用空調機器や冷蔵庫、電子体温計などに用いられている。

④ thermistor

温度上昇とともに抵抗値が徐々に減少するNTCサーミスタ<sup>⑤</sup>が最も多く用いられており、その他に、ある温度で抵抗値が急増するPTCサーミスタ<sup>⑥</sup>や、特定温度で急激に電気抵抗が変化するCTC<sup>⑦</sup>がある。図25に、サーミスタの温度特性例を示す。

⑤ negative temperature coefficient thermistor

⑥ positive temperature coefficient thermistor

⑦ critical temperature coefficient

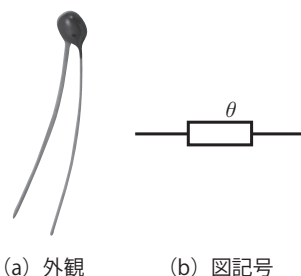


図24 サーミスタ

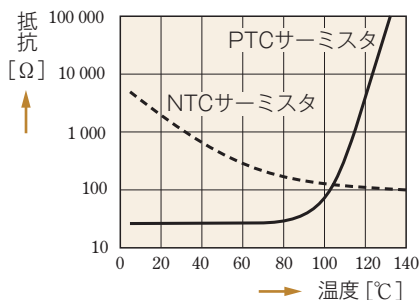


図25 サーミスタの温度特性例

① photoconductive cell

## 4 光導電セル

硫黄 (S) とカドミウム (Cd) の化合物  
でつくられた素子こうどうでんを光導電セル<sup>①</sup> (CdS)

という。CdSに光が当たると、抵抗値が小さくなる。図26にCdSの外観と図記号を示す。CdSは、照明用ランプの自動点灯装置などに使用されている。

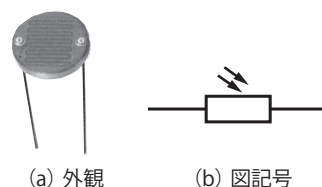


図26 光導電セル

## 5 発振回路

### 1 発振とは

外部から入力信号を加えずに、一定の周波数の交流を継続的に作り出す回路

② oscillation circuit

回路を発振回路<sup>②</sup>という。

### ③ howling

ハウリングは低周波における発振現象である。ここで低周波とは20kHz以下の周波数、それ以上を高周波という。

図27のように、マイクロホンとスピーカが接近してピーという音がする現象をハウリング現象<sup>③</sup>といい、発振回路の発振現象の一種である。

スピーカから出た音は、空間を伝ってマイクロホンにはいる。これが増幅器で増幅されてスピーカから出た音が、ふたたびマイクロホンにはいるというように、しだいに大きくなり、ハウリングが起きる。

これを図28のように発振回路のブロック図に置き換えてみると、増幅回路と帰還回路<sup>④</sup>という組み合わせになる。つまり発振動作では、増幅回路の入力→増幅回路の出力→帰還回路→増幅回路の入力というように、増幅された出力信号の一部を、同じ位相にして入力側へ戻している。

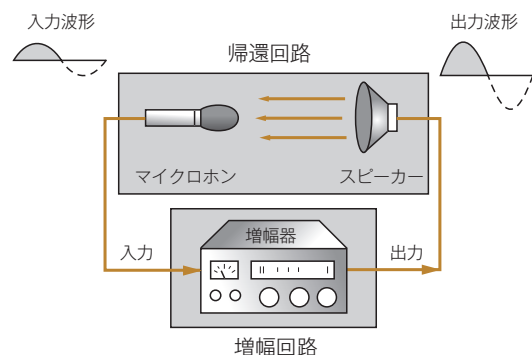


図27 ハウリング現象

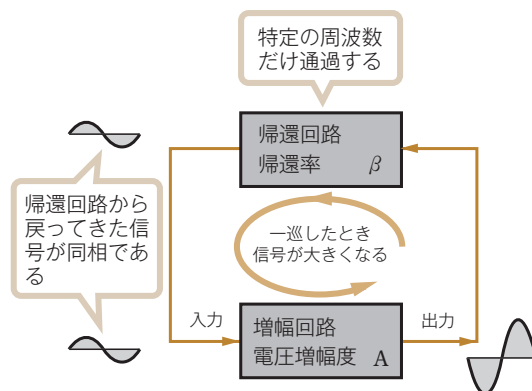


図28 発振回路のブロック図

## 2 LC発振回路

LC発振回路は、帰還回路がコイル $L$ とコンデンサ $C$ で構成され、高周波発振回路に用いられる。

目的の周波数だけが通過するように共振させることを同調といい、  
5 発振回路に用いると同調周波数が発振周波数となる。図29は、コイル $L$ とコンデンサ $C$ を用いた同調形発振回路の原理図である。増幅回路とコイルによる帰還回路で構成されており、発振周波数 $f$ は、次の式で求めることができる。この発振回路は同調回路がコレクタに接続されているので、コレクタ同調形とよぶ。

10 ●発振周波数 
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (8)$$

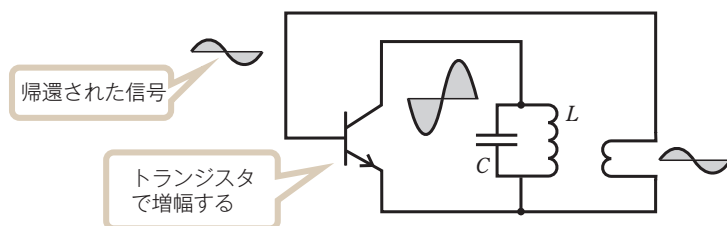


図29 同調形発振回路

## 3 CR発振回路

帰還回路はコンデンサ $C$ と抵抗 $R$ で構成され、低周波発振回路に用いられる。

図30はCR移相形発振回路の原理図で、発振周波数は次の式で求めることができる。

15 ●発振周波数 
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{6CR}} \text{ [Hz]} \quad (9)$$

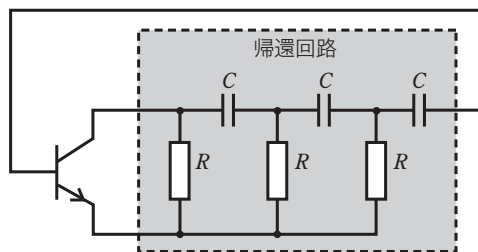


図30 CR移相形発振回路

問 8 図29の回路で、 $L = 34\mu\text{H}$ 、 $C = 330\text{pF}$ としたときの発振周波数 $f[\text{Hz}]$ を求めよ。