

# 能動素子の動作原理

トランジスタやダイオードのような能動素子の動作原理を議論する。また、それらを組み合わせて構成される(理想)オペアンプについて考える。

## 0.1 真空管

今では真空管が使われることはほとんどないが、動作原理がわかりやすいのでまず真空管から考えよう。

### 0.1.1 2極管

整流(一方向にのみ電流を流す)作用がある。ヒータに電流を流すと、陰極の温度が上昇し、陰極から熱電子が真空中に放出される。この状態で陽極を負極より高い電位にすると電子を陰極から陽極に導く電界が発生し、真空中を電子が移動する(すなわち、電流が流れる)。一方、陽極を負極よりも低い電位にすると生じる電界は電子を陰極に押し戻すので電流は流れない。このように陽極と陰極に与える電圧によって、電流が流れたり流れなかったりする。これは整流作用である。

### 0.1.2 3極管

2極管に第3の電極を加えたものである。この電極は格子状(グリッド)になっているので、グリッドと呼ばれる。まず、陰極から陽極に電子の移動が起るようにする。グリッドの穴をすり抜けて電子は陰極から陽極に移動する。次にはグリッドに陰極より負の電位を与えよう。電子は本来ならば陽極に移動するはずだが、途中で負の電位のグリッドが存在するので流れにくくなる。グ

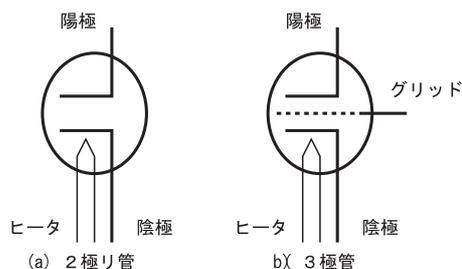


図1 2極管と3極管。電極は真空の中に封じ込められている。

リッドの負の電位が大きくなれば最後には電子は全く陽極に達しなくなる。このようにグリッドの電位を制御することによって、陽極から流れ出す電流を制御することができる。

## 0.2 半導体素子

半導体中の電子や正孔(電気を運ぶのでキャリアと呼ぶ)を真空中の荷電粒子と同様に扱うことによって、様々な機能を持った素子を作ることができる。ここでは、ダイオード、トランジスタ、FETについて触れよう。

### 0.2.1 PN接合ダイオード

p型半導体とn型半導体が一つの結晶内でつながったものをPN接合と呼ぶ。PN接合部では電子と正孔が結合して、これら多数キャリアの不足した空乏層が形成される。この空乏層内は、n型側は正に帯電し、p型側は負に帯電している。このため内部に電界が発生し、空乏層の両端では電位差(拡散電位)が生じる。ただしそれと釣り合うように内部でキャリアが再結合しようとするので、この状態では両端の電圧は0である。

ダイオードのアノード側(p型半導体)に正電圧、カソード側(n型半導体)に負電圧を印加することを順方向バイアスをかけると言う。これはn型半導体に電子、p型半導体に正孔を注入することになる。n型半導体内では電子が空乏層に押し出されるし、p型半導体では正孔が押し出される。これらの電子と正孔は空乏層で再結合して、消滅する<sup>\*1</sup>。半導体全体を見ると、n型半導体に電子が注入され、p型半導体に正孔が注入される(p型半導体から電子が引き抜かれる)ことになり、pn接合を通して電流が流れることになる。また電子と正孔の再結合に伴い、これらの持っていたエネルギーが熱(や光)として放出される。また、順方向に電流を流すのに必要な電圧を順方向電圧降下と呼ばれる。

アノード側に負電圧を印加することを逆方向バイアスをかけると言う。この場合、n型領域に正孔、p型領域

<sup>\*1</sup> 動的に空乏層が消失していると思なすこともできる

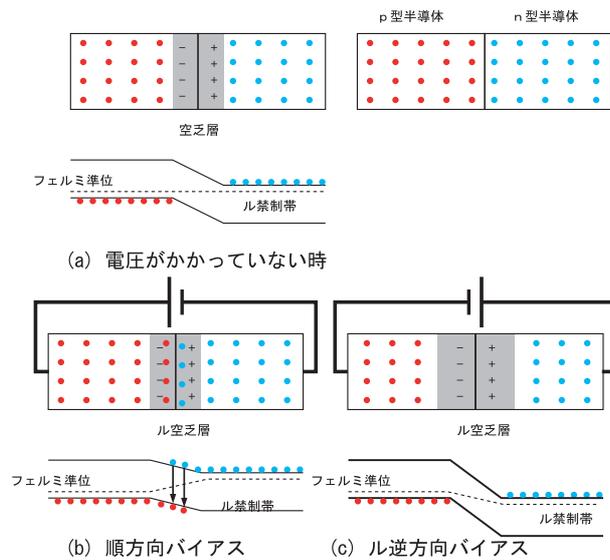


図2 ダイオードの動作原理。電子にとって上はエネルギーの高い状態であるし、正孔にとって下は低い状態に対応する。

に電子を注入することになるので、それぞれの領域において多数キャリアが不足する。従って、接合部付近の空乏層がさらに大きくなり、内部の電界も強くなるため、拡散電位が大きくなる。この拡散電位が外部から印加された電圧を打ち消すように働くため、逆方向には電流が流れにくくなる<sup>\*2</sup>。

### 0.2.2 トランジスタの動作原理

ここではNPN接合（端子は順にエミッタ、ベース、コレクタ）における電子と正孔の振る舞いについて考える。

エミッタとコレクタの半導体はn型で電子が多数キャリアになり、ベースはp型半導体なので、正孔が多数キャリアとなる。なお、ベースの幅は非常に狭くなっていることに注意。まず、トランジスタに電圧（バイアス）がかかっていない状態を考える。この場合、PN接合とNP接合の直列回路と考えて良いだろう。それぞれの接合部にはダイオードの動作原理で議論したように空乏層ができる。

エミッタ-コレクタ間にエミッタが負となるように電圧をかけても、ベース-エミッタ間のPN接合の空乏層が広がり電流は流れない。さらに、エミッタ-ベース間

<sup>\*2</sup> 実際の素子では、真性半導体に由来する少数キャリアのために逆バイアス状態でもごくわずかに逆方向電流が流れる。

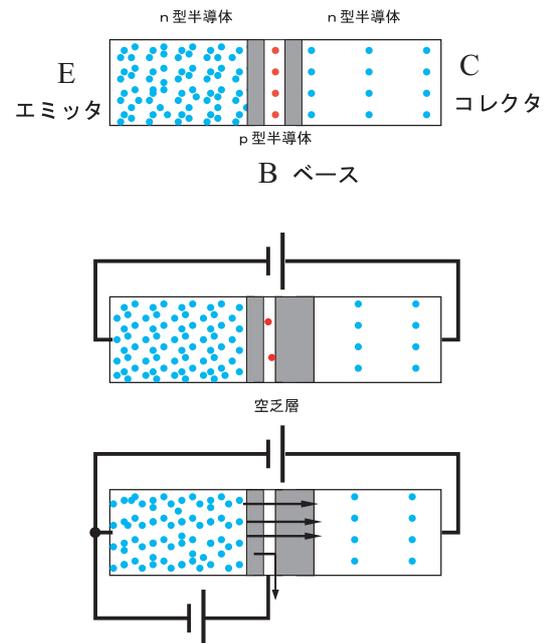


図3 トランジスタの動作原理

にエミッタを負とするように電圧をかけよう。この電圧はエミッタとベースの間のPN接合にとって、順方向バイアスとなる。従って、ベース電極よりp型半導体には正孔が注入されることになり、エミッタから電子がベースに入ってくる<sup>\*3</sup>。この電子は一部はベースの正孔と再結合するが、ベースは薄いので大部分は再結合する間もなくコレクタに入ってしまう。その結果エミッタ-コレクタ間に電流が流れることになる。このコレクタに流れる電流はベース電流の関数であり、コレクタ電流はベース電流によって制御されると言える<sup>\*4</sup>。

PNP型のトランジスタの場合では、電源の極性を逆にして、電子と正孔を入れ替えれば良い。

### 0.2.3 電界効果トランジスタ

電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor; FET) には接合形電界効果トランジスタ (Junction-type FET; JFET) と金属酸化物半導体電界効果トランジスタ (metal-oxide-semiconductor FET; MOSFET) がある。

<sup>\*3</sup> ダイオードの場合と同様に動的にエミッタ-ベース間の空乏層が消失していて、ベースに電子が入ってくると考えても良い。

<sup>\*4</sup> このようなエミッタから注入された電子がベースをすり抜けることができるように、エミッタの電子密度はベースの正孔密度の100倍程度に調整されている。また、コレクタの電子密度はベースの正孔密度のさらに100分の1程度にされ、ベース-コレクタ間の空乏層が大きくなるようになっている。

る。最近では、電界効果トランジスタのほとんどが MOSFET である。ここでは、MOSFET について考えよう。

図のように p 型基盤上に二つの n 型領域を作り、それぞれ S(ソース) と D(ドレイン) とする。電極 G(ゲート) は斜線で示してある非常に薄い絶縁膜の上に作る。この p 型半導体は基板 SB 上に置かれている。図のようにソース(基板 SB) とドレイン間に電圧をかけると、ソースとドレイン間の領域は空乏層になる。したがって、このままではソース - ドレイン間に電流は流れない。次にゲートに図のようなバイアスを与えると、絶縁層のすぐ下の空乏層に電子が誘導され、そこは実効的に n 型半導体となりソース - ドレイン間に電流が流れる。この n 型半導体の電子密度はゲートに与える電圧の大小に依存するので、ゲート電圧を制御することによってソース - ドレイン間電流を制御することができる。

### 0.3 オペアンプ

ダイオードやトランジスタの動作原理を議論したが、これらの素子を活用して実際に使える回路を作るとは難しい。そこで低周波数での応用に限って、オペアンプを用いた回路について議論する。

実際のオペアンプは多数のトランジスタ、コンデンサー、抵抗などから構成される集積回路(IC)であるが、今日では一つの部品として扱うことができる。

#### 0.3.1 理想オペアンプ

次のような特性を持つ増幅器を考える。

- 2つの入力端子(“+”, “-”) と 1つの出力端子をもつ
- 2つの入力端子の「差」 $= V_+ - V_-$  を増幅して出力

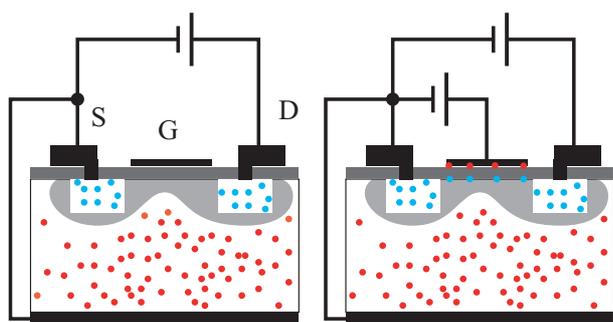


図4 FETの動作原理

とする

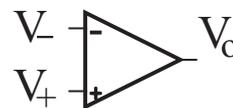


図5 オペアンプ

すなわち、

$$V_0 = A(V_+ - V_-)$$

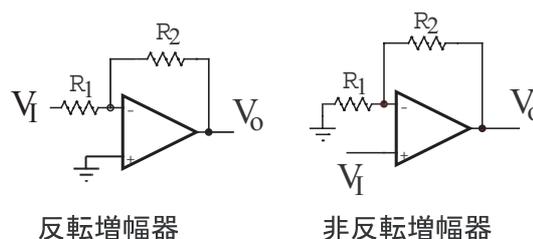
となり、 $A$  を増幅率と呼ぶ。このような増幅器を、演算増幅器 (operational amplifier; オペアンプ) と呼ぶ。さらに、理想オペアンプでは、

- 増幅率  $A$  は無限大 ( )
- 2つの入力端子に電流は流れない
- 出力端子から流れる電流に制限がない
- どのような周波数の信号でも、同じように増幅する

を仮定する。

#### 0.3.2 増幅回路

オペアンプを使った最も基本的な回路は以下の二つである。



反転増幅器

非反転増幅器

図6 基本増幅回路

反転増幅器では、+側の入力を基準電圧(0 V)に固定し、入力電圧  $V_I$  を、抵抗  $R_1$  を通して - 側の入力へつなく。そしてその - 側の入力は、抵抗  $R_2$  を通して出力につながれている。無限大の増幅率  $A$  を持っているので、 $V_0$  が有限であるためには、 $V_+ - V_- = 0$ <sup>\*5</sup>すなわち、ここでは  $V_- = 0$  でなければならない。 $R_1, R_2$  とオペアンプの - 入力が繋がっている点に入る向きの電流

<sup>\*5</sup>  $V_0/A = V_+ - V_-$  であり、 $A$  が無限大なので  $V_+ - V_- = 0$  である。大きいけれど、有限の  $A$  の場合には  $V_+ - V_- \approx 0$  となる。

を正とすると、 $R_1, R_2$  に流れる電流  $I_1, I_2$  はそれぞれ、

$$I_1 = \frac{V_1 - 0}{R_1}, I_2 = \frac{V_O - 0}{R_2}$$

である。また、 $-$  入力には電流は流れ込まないから、 $I_1 + I_2 = 0$  でなければならない。従って、

$$V_O = -\frac{R_2}{R_1} V_1$$

となる。 $R_2$  は出力から入力に信号を戻す役割を果たしているため、帰還抵抗と呼ばれる。

非反転増幅器も同様に考えることができる。まず、有限の出力を得るためには  $-$  側の入力は  $+$  側の入力と同じになる。従って、

$$I_1 = \frac{0 - V_1}{R_1}, I_2 = \frac{V_O - V_1}{R_2}$$

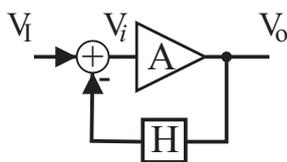
また、 $-$  入力には電流は流れ込まないから、 $I_1 + I_2 = 0$  でなければならない。よって、

$$V_O = \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_1$$

となる。出力と入力の符号が等しいことに注意。

### 0.3.3 オペアンプの伝達関数

オペアンプによる増幅回路は出力の一部を入力に戻す典型的な帰還回路である。ここでは、このような帰還回



⊕ 加算を行なう

図7 帰還回路

路の伝達関数について考察しよう。 $V_i$  はアンプそのものの入力であり、 $H$  は帰還回路の減衰率で  $0 < H < 1$  である。 $\oplus$  の下の  $-$  の記号は下からくる信号の符号を反転して加算を行なうことを示している。

$$V_O = AV_i$$

$$V_i = V_1 - HV_O$$

から  $V_i$  を消去すると、回路全体の伝達関数  $G$  は  $A \gg 1$  なので、

$$G = \frac{V_O}{V_1} = \frac{A}{1 + AH} \approx \frac{1}{H}$$

となり、回路の増幅率は  $1/H$  倍になる。増幅率  $A$  に依存せず、回路全体の増幅率が決まることが重要である。

### 0.3.4 演算回路

以下にオペアンプを使った典型的な演算回路を示す。加算回路が入力の和を出力することは、 $R_2$  に流れる電流が入力の各抵抗を流れる電流の和になることより明らかである。一方、積分回路と微分回路は抵抗の代わりにインピーダンスを導入すれば、理解できる。

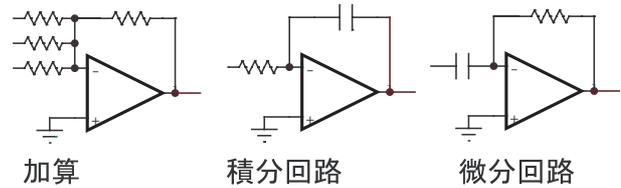
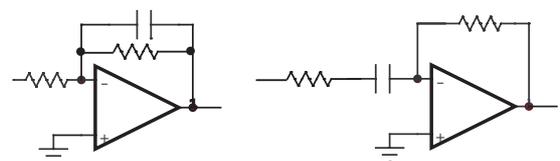


図8 オペアンプによる演算回路

また、微分回路や積分回路を変形することによって、高周波成分のみあるいは低周波成分のみを増幅するハイパス・フィルターやローパス・フィルターを構成することができる。ローパス・フィルターでは帰還抵抗に並列にコンデンサーが接続されている。低周波ではコンデンサーのインピーダンスは高く、存在しないものとみなしても良い。一方、高周波ではコンデンサーのインピーダンスは低くなり、実効的に帰還抵抗の大きさが減る ( $H$  が増える) と考える。ハイパス・フィルターもコンデンサーのインピーダンスの周波数依存性からその働きを理解することができる。



ローパス・フィルター      ハイパス・フィルター

図9 信号処理回路の例

## 0.4 レポート

レポートの骨格は以下のようなものとする。

### 1. 目的

適切な目的を考えて記述せよ。

### 2. 理論

(a) オペアンプとは？

(b) 反転と非反転増幅回路

増幅率と入出力間の位相差を求める式を導出せよ。

(c) ローパス・フィルターとハイパス・フィルター

増幅率と入出力間の位相差を求める式を導出せよ。

### 3. 実験

(a) 増幅率 10 倍のアンプ

(b) 増幅率 1 倍のアンプ

(c) ローパス・フィルターとハイパス・フィルター

実際の回路、測定結果の表を示し、増幅率と入出力の位相差の周波数依存性をグラフを示すこと。レポート用のグラフは gnuplot を用いて描くこと。

また、実測した周波数依存性と  $C$  の値を変化させて描いた理論曲線を比較して  $C$  の値を推定せよ。

### 4. 結論

目的に対応した結論を記述すること。

### 5. 考察

増幅率 10 倍のアンプでは、100 kHz 近くの周波数で理論と実測値に不一致が見られる。その理由について考察せよ。