

医用工学概論

第7回 電子回路

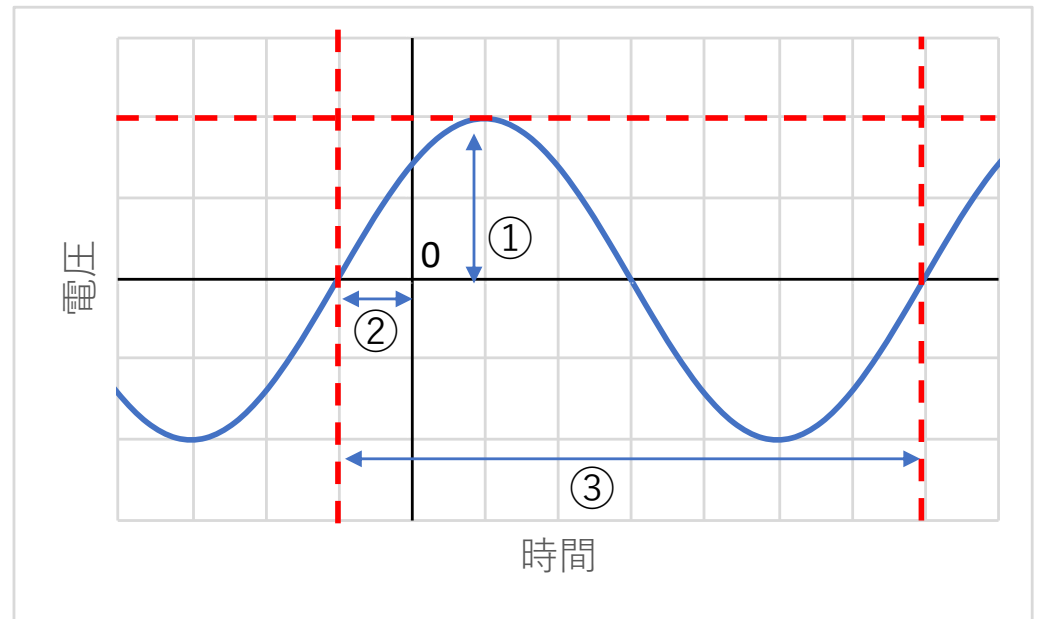
前回の復習

交流電圧の式

$$e(t) = E_m \sin(\omega t + \theta) \quad (\omega = 2\pi f)$$

- E_m : 振幅
- ω : 角周波数
- θ : 位相

- f : 周波数
- $T = 1/f$: 周期



①: 振幅 ②: 位相 ③: 周期

前回の復習

次のあとに続くのは「大きい」「小さい」のいずれか

1. 抵抗のインピーダンス Z_R は
抵抗 R が大きいほど **大きくなる**
2. コンデンサのインピーダンス Z_C は
容量 C が大きいほど **小さくなる**
3. コンデンサのインピーダンス Z_C は
角周波数 ω が高いほど **小さくなる**
4. インダクタのインピーダンス Z_L は
角周波数 ω が高いほど **大きくなる**

ヒント

$$\left(Z = \frac{V_{\max}}{I_{\max}} \right)$$

$$Z_R = R$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega C}$$

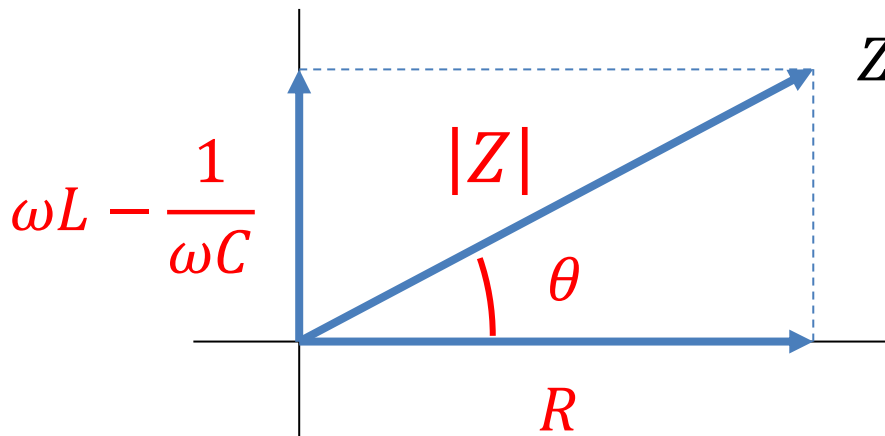
$$Z_L = \omega L$$

インピーダンスが大きいほど電流が **流れにくくなる**

前回の復習

RLC直列回路に流れる電流

- フェーザ図を書いて合成インピーダンスを求める



$|Z| = Z$ の長さ: 振幅の比
→ 三平方の定理で求める

$$|Z| = \sqrt{\text{縦}^2 + \text{横}^2}$$

$\theta = Z$ の角度: 位相差
→ 三角比を使って求める

- 電流を求める

$$i(t) = \frac{E_m}{|Z|} \sin(\omega t - \theta) \quad (\omega \text{は電圧と同じ})$$

交流回路 続き (電力)

交流回路の電力

交流回路の電流、電圧

- 時間によって変化する。 → 電力も同様

瞬間電力 $p(t) = v(t) \times i(t)$

ある時刻における瞬間的な電力(あまり意味はない)

平均電力

1周期分で平均した電力

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{V_m I_m}{2}$$

この時、 $P = V_e I_e$ (直流回路の電力と同じ形)で表した時の V_e , I_e をそれぞれ電流、電圧の **実効値** とよび、以下で表す。

$$V_e = \frac{V_m}{\sqrt{2}}, \quad I_e = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (\text{正弦波の場合})$$

商用交流100Vは実効値を表す。
振幅は約141Vになる。

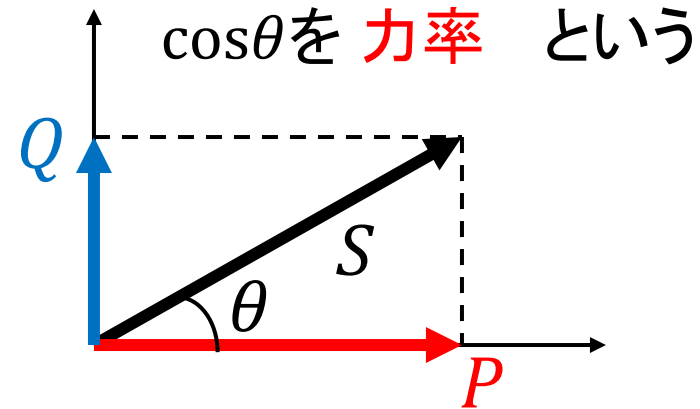
交流回路の電力

交流回路の電力

$$S = V_e I_e [\text{VA}] \quad (\text{ボルトアンペア})$$

$$P = V_e I_e \cos\theta [\text{W}] \quad (\text{ワット})$$

$$Q = V_e I_e \sin\theta [\text{var}] \quad (\text{ヴァール})$$



S : **皮相電力** ベクトル図における見かけ上の電力

P : **有効電力** 実際に負荷によって消費される電力

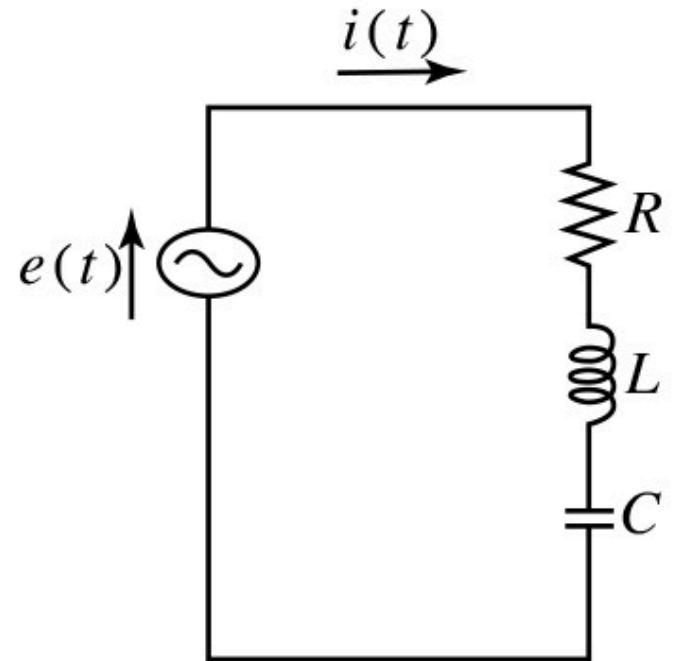
Q : **無効電力** 電源と負荷を往復するだけの電力

交流回路において単に消費電力という時は **有効電力** をさす
 θ を **力率角** とよび、インピーダンスの位相角と同じである

例題3 交流回路の電力

交流電源の最大値を $16\sqrt{2}$ [V]を $1/2\pi$ [Hz]、
 $R=8$ [Ω]、 $L=15$ [H]、 $C=1/7$ [F]とする。

- (1) インピーダンスを求めよ。
- (2) 電流の式を求めよ。
- (3) 有効電力を求めよ。



例題3 解答

(1) インピーダンス

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{2\pi} = 1$$

$$\begin{aligned} |Z| &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \\ &= \sqrt{8^2 + \left(1 \times 15 - \frac{1}{1 \times \frac{1}{7}}\right)^2} \\ &= \sqrt{64 + (15 - 7)^2} \\ &= \sqrt{64 + 64} \\ &= 8\sqrt{2} \text{ [}\Omega\text{]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tan\theta &= \left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) = \left(\frac{8}{8}\right) = \left(\frac{1}{1}\right) \\ \theta &= \frac{\pi}{4} \text{ [rad]} \end{aligned}$$

例題3 解答

(2) 電流

$$\frac{E_m}{|Z|} \sin(t - \theta) = \frac{16\sqrt{2}}{8\sqrt{2}} \sin\left(t - \frac{\pi}{4}\right) = 2 \sin\left(t - \frac{\pi}{4}\right)$$

(3) 電力

$$\text{皮相電力 } P_a = \frac{I_m V_m}{2} = \frac{2 \times 16\sqrt{2}}{2} = 16\sqrt{2} \text{ [VA]}$$

$$\text{有効電力 } P_e = P_a \cos(\phi) = 16\sqrt{2} \times \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = 16\sqrt{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = 16 \text{ [W]}$$

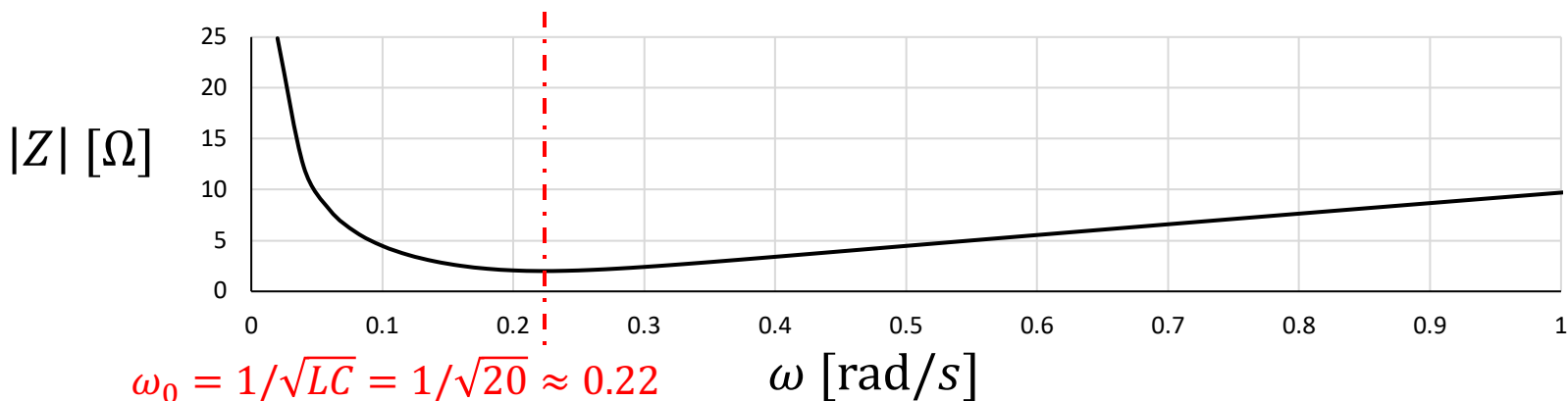
共振

RLC直列回路で、角周波数 ω を変化させていったとき、インピーダンスが最小となる瞬間がある。

この時の角周波数を **共振角周波数**、周波数を **共振周波数** といい、それぞれ次の式で表す

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \qquad f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

共振周波数の時、交流回路の消費電力は **最大** になる



$R = 2, L = 10, C = 2$ の時のRLC直列回路のインピーダンス

共振周波数とインピーダンス

共振周波数の時、インピーダンスのLとCの成分が打ち消し合い、0になる

そのため、共振周波数の時のインピーダンスは抵抗Rの成分のみとなる

$$\begin{aligned} |Z| &= \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{\sqrt{LC}} - \frac{\sqrt{LC}}{C}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + \left(\frac{L}{\sqrt{LC}} \frac{\sqrt{LC}}{\sqrt{LC}} - \frac{\sqrt{LC} L}{C L}\right)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{L\sqrt{LC}}{LC} - \frac{L\sqrt{LC}}{LC}\right)^2} \\ &= \sqrt{R^2 + 0^2} = \sqrt{R^2} = R \end{aligned}$$

また、位相差も

$$\theta = \text{Tan}^{-1} \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \text{Tan}^{-1} \frac{0}{R} = 0 \text{ になる}$$

例題4 共振

RLC直列回路において、 $R = 10[\Omega]$ 、 $L = 5[H]$ 、 $C = 0.1[F]$ の時、次の問いに答えよ。

①消費電力が最大となる時の電源の周波数を答えよ

② ①の時のインピーダンスの大きさ $|Z|$ を答えよ

例題4 解答

RLC直列回路において、 $R = 10[\Omega]$ 、 $L = 5[H]$ 、 $C = 0.1[F]$ の時、次の問いに答えよ。

①消費電力が最大となる時の電源の周波数を答えよ
消費電力が最大となる時の周波数とは共振周波数のことである。したがって、

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8 \times 0.5}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4}} = \frac{1}{2\pi \times 2} = \frac{1}{4\pi} [\text{Hz}]$$

② ①の時のインピーダンスの大きさ $|Z|$ を答えよ

$$|Z| = R = 10 [\Omega]$$

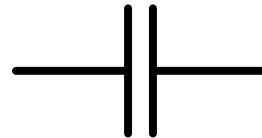
電子回路

受動素子

- 抵抗



- コンデンサ



- コイル

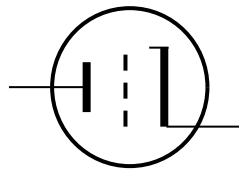


- 与えられた電力の大きさ、周波数に従い、電流を流す。

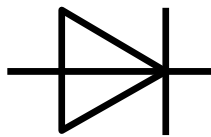
- 増幅、整流 は行わない。

能動素子

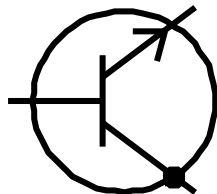
- 真空管 半導体



- ダイオード



- トランジスタ



- 小さな電力 を大きく増幅したり、電流の流れを整えたりする働きを持つ素子。

- 増幅、整流 を行う。

電子回路では主に **能動素子** を扱う

真空管

電球のフィラメントから電子が放出される現象(エジソン効果)を利用して電流の流れを制御する能動素子。

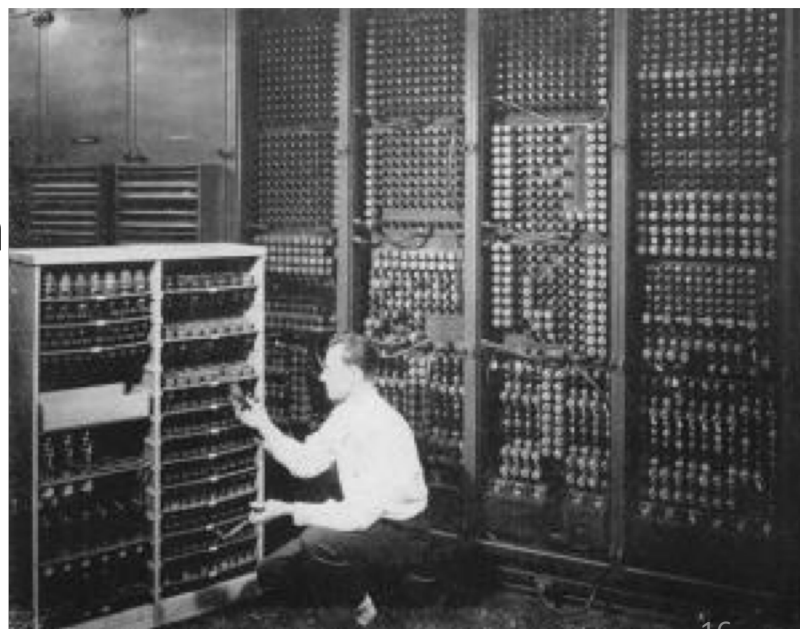


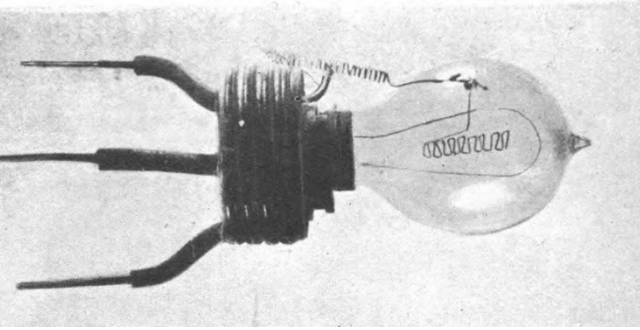
ENIAC(ニアック)

- ・最初のコンピュータ
- ・真空管17,468本。
- ・ダイオード7,200個。
- ・幅24m、高さ2.5m、奥行き0.9m
- ・総重量30トン

性能は現在の電卓以下。

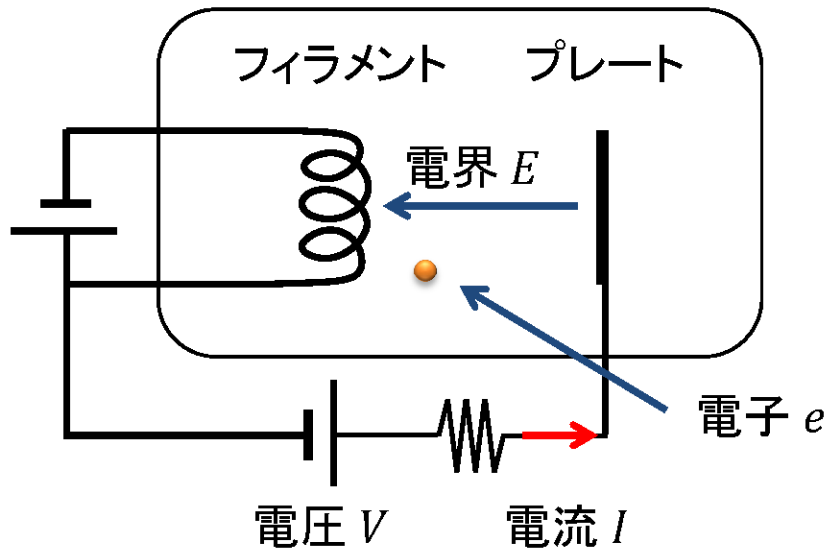
真空管が壊れるたびに手作業で交換 →





二極真空管

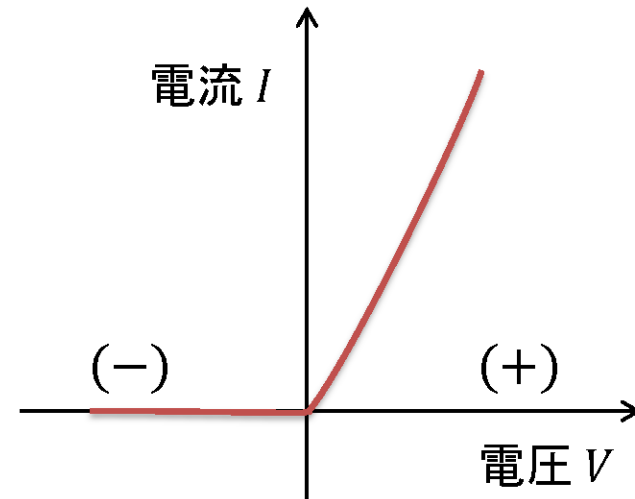
管内は真空に近い状態

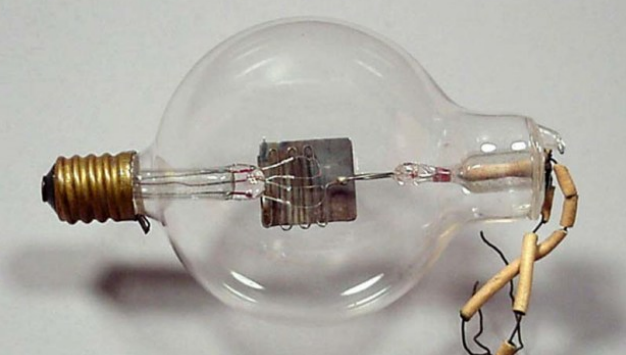


- 電流は電荷の流れ
- 電子は負の電荷

整流 作用を持つ

1. フィラメントに通電し、加熱
2. フィラメントから電子が放出 (エジソン効果)
3. 電界と逆方向に電子が移動

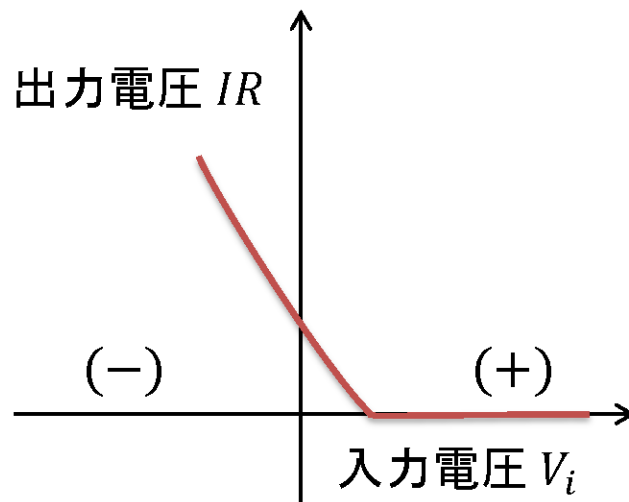
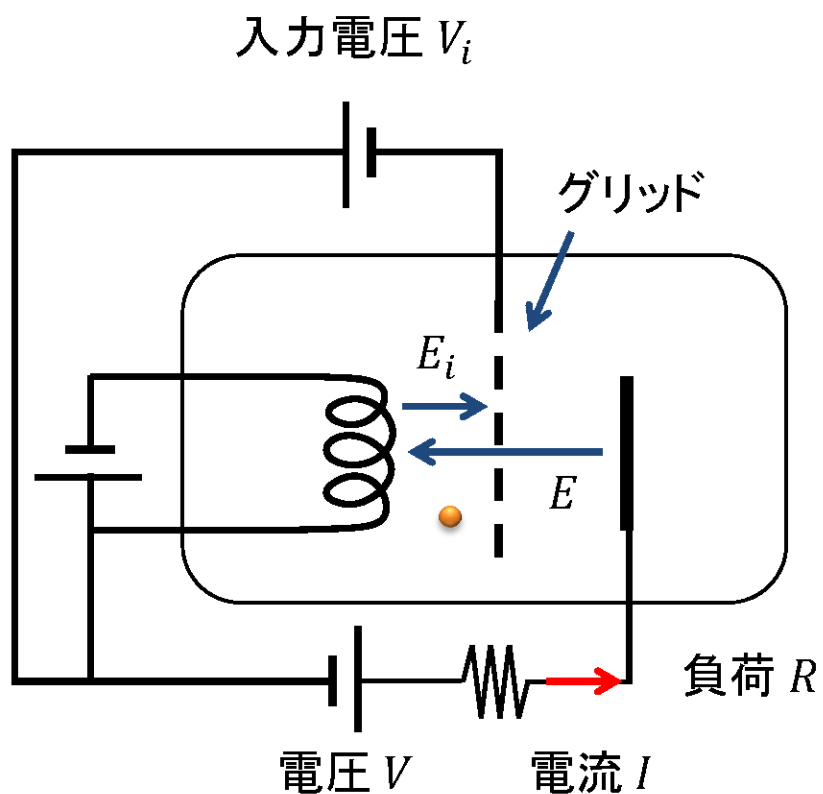




三極真空管

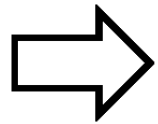
増幅 作用を持つ

1. グリッド、フィラメント間に電界 E_i を発生
2. プレート、フィラメント間に電界 E を発生
3. E_i のわずかな変化でプレート、フィラメント間の電流を調整できる。



真空管の特徴

真空中を電子が移動するので、電子の運動を妨げるものがなく、電子の移動度が高い。



高い周波数 に対する応答が良い。

例) ブラウン管として、表示器に使われる。

ガラス管などで構成されるため、**機械的振動** に弱い。

フィラメントの **加熱** に電力と時間を要する。

大型。

半導体素子

・ダイオード・トランジスタ

半導体の性質を利用して電子の流れを制御する素子。原子レベルで電子の制御を行うため、真空管に比べて **小型化** が可能。

・世界最小のコンピュータ

IBMが開発した米粒よりも小さいコンピュータ。

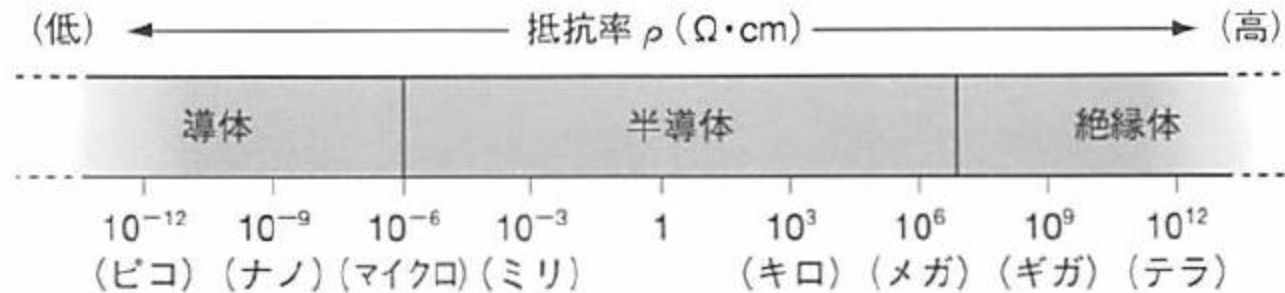
数万個のトランジスタが入っている。



導体・半導体・不導体(絶縁体)

銅などの金属

ガラス・ゴムなど



主な半導体

炭素(カーボン) C

ケイ素(シリコン) Si

ゲルマニウム Ge

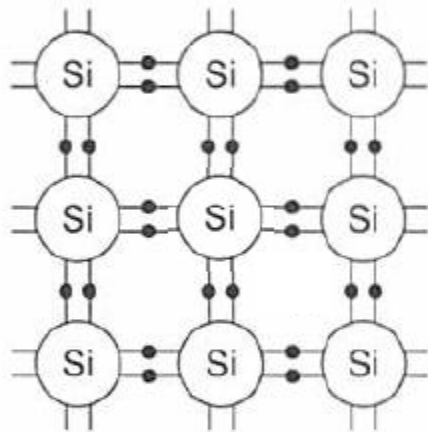
ガリウムヒ素 GaAs

						2 He
	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr

半導体の結晶

不純物半導体

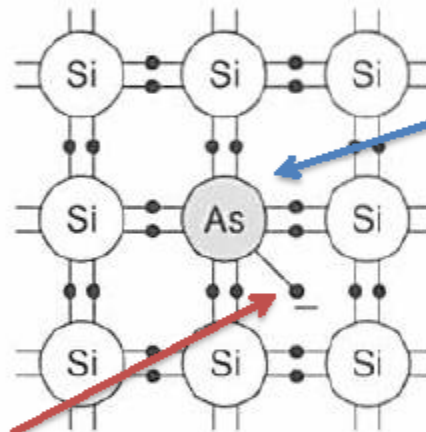
真性半導体



すべての電子が共有結合に使われているため、抵抗率が高い（絶縁体に近い）

N型半導体

(Negative)

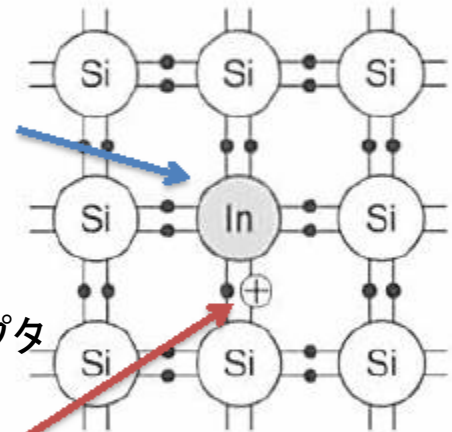


電子

5価の原子が含まれているため、共有結合されていない電子がある

P型半導体

(Positive)

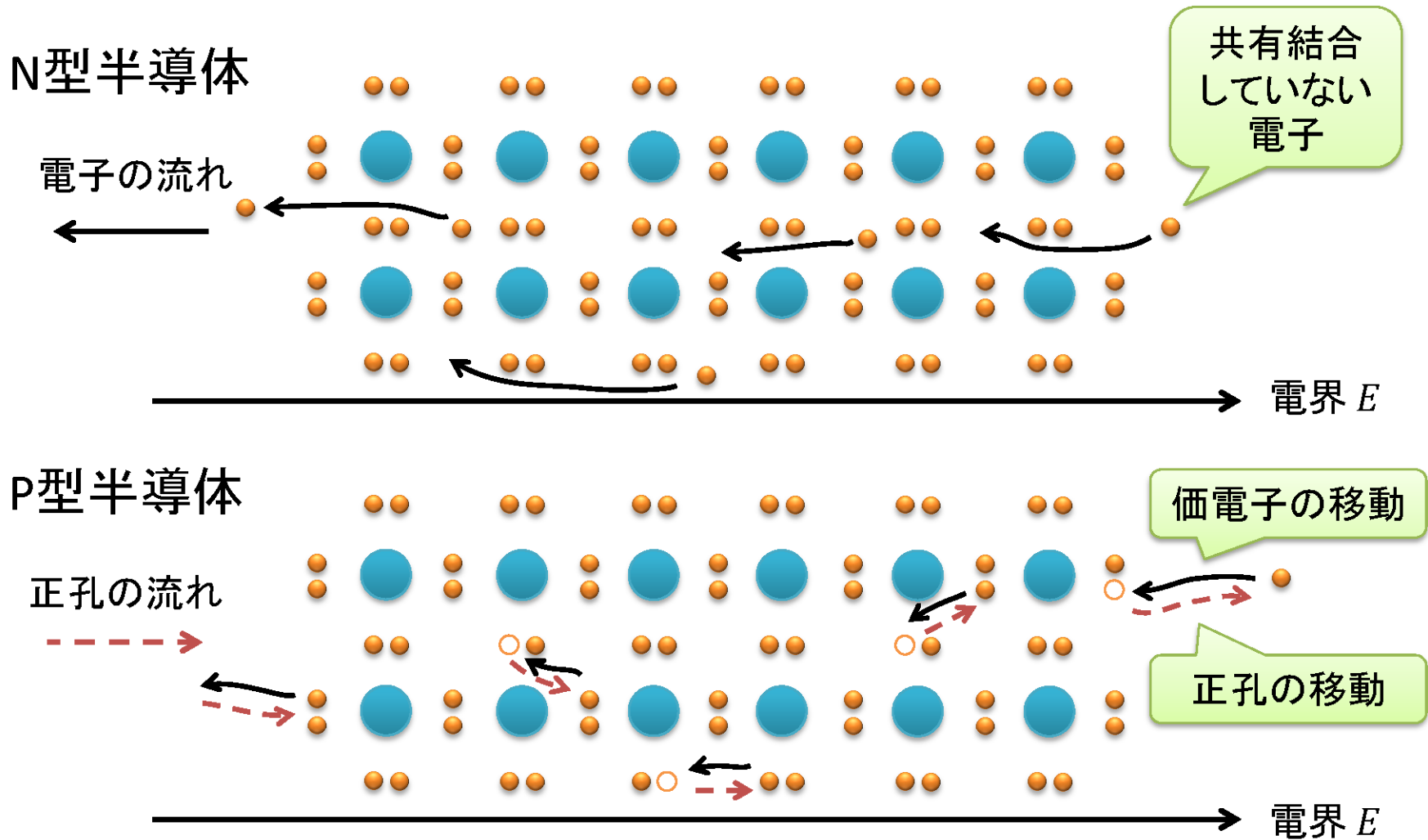


正孔（ホール）

3価の原子が含まれているため、共有結合に電子が欠乏している

不純物
・N型
ドナー
・P型
アクセプタ

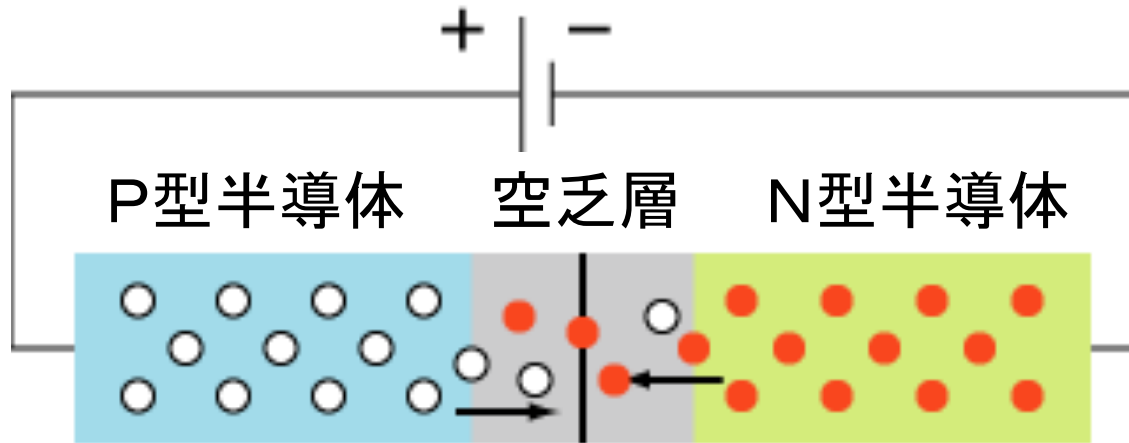
結晶中の電子の流れ



P型半導体での電流は、**正孔の動き** として考えることができる。自由電子、正孔は運び屋の役割をするので **キャリア** と呼ばれる。

PN接合

正孔 電子



空乏層にはキャリアが存在しないので、電流が流れにくい。



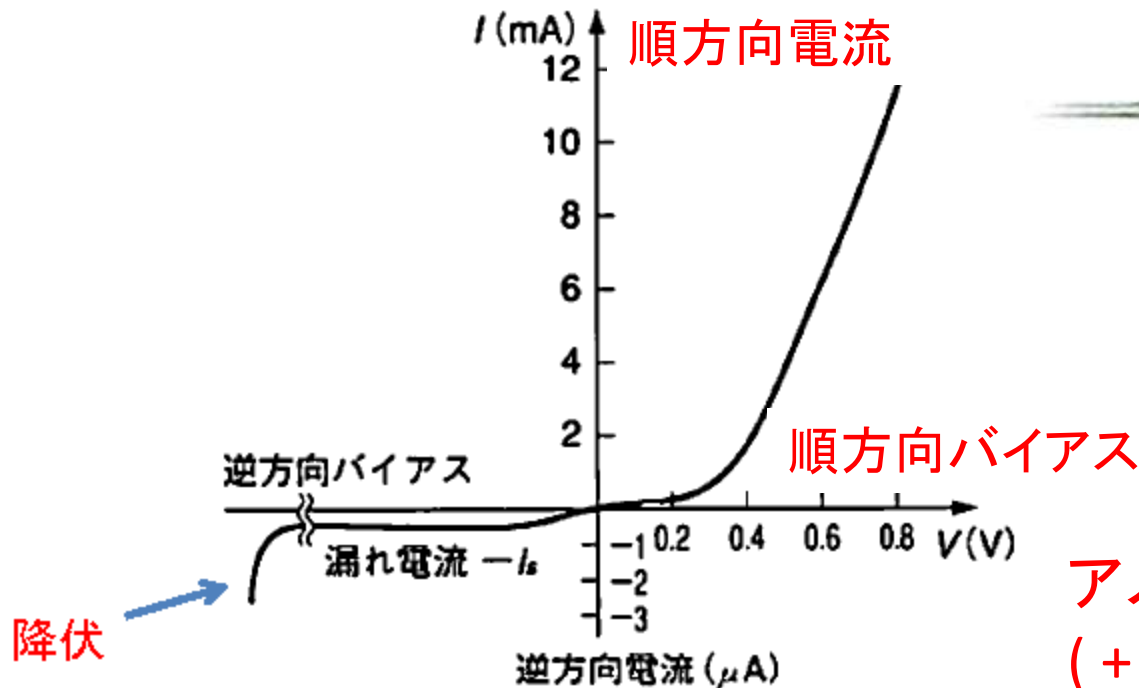
P型とN型を接合すると、接合面で正孔と電子が打ち消し合って空乏層が生まれる。

P側から電圧をかけると空乏層が狭まり電流が流れる。

N側から電圧をかけると空乏層が広がり電流が流れない。

ダイオード

P形半導体とN形半導体を接合したもの。電流をアノード側からカソード側にしか流さない。(整流作用)



アノード
(+側)

カソード
(-側)

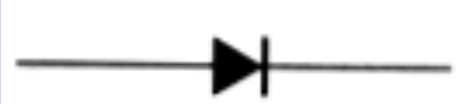


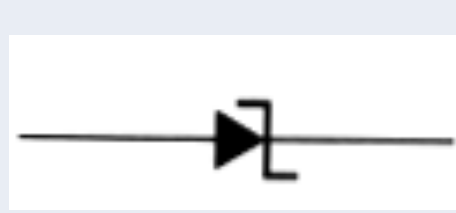



一定以上の逆電圧をかけると大電流が流れる。

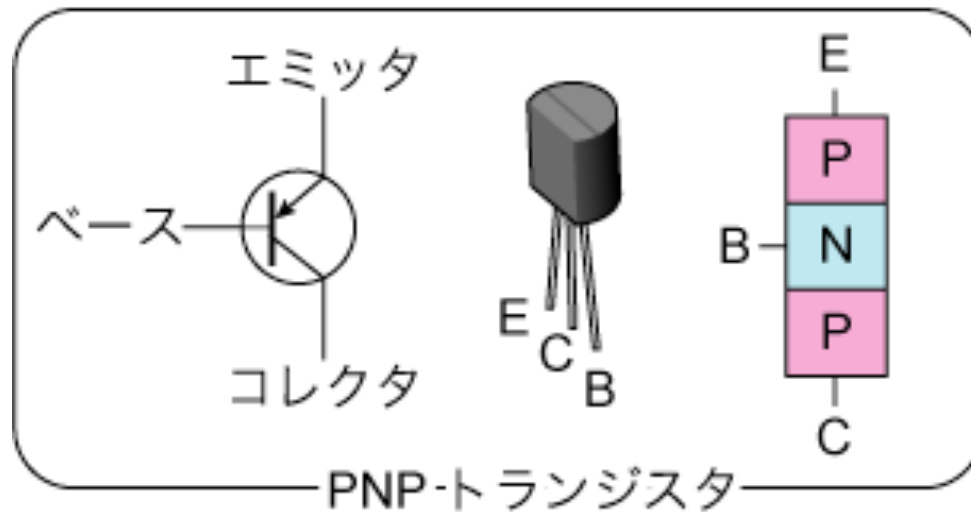
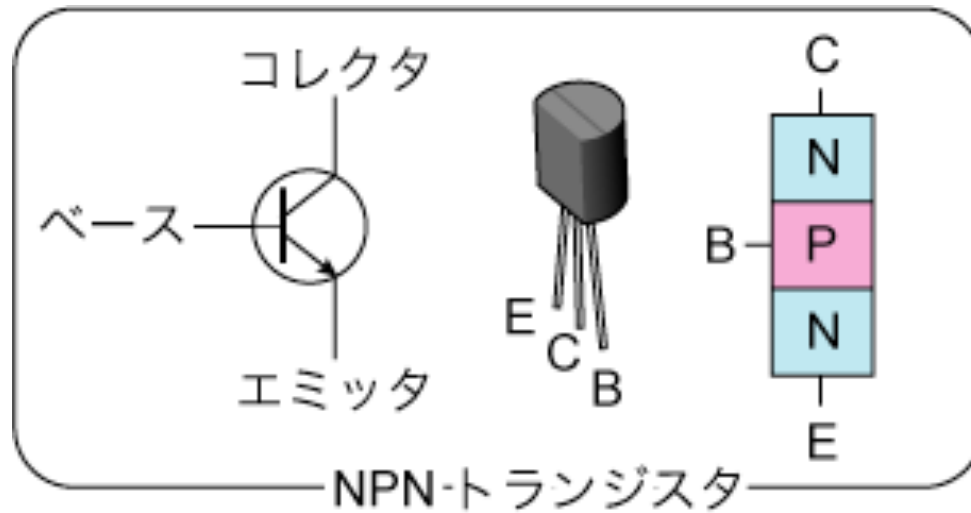
第2章 p.56 図2-50

第2章 p.57 図2-53

ダイオードの種類

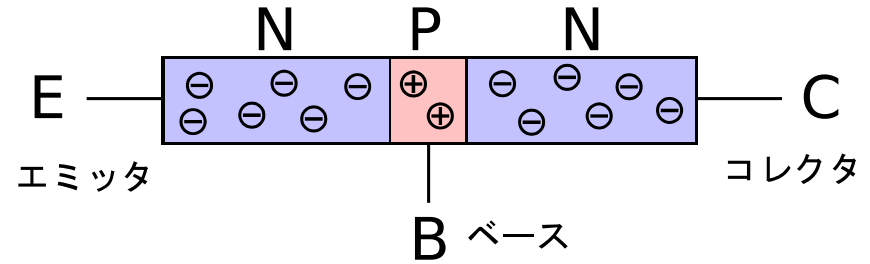
名称	記号	性質
(普通の)ダイオード		整流作用
発光ダイオード (LED)		順電流を流すと 発光する
フォトダイオード		受光すると電流を 流す
ツェナーダイオード (定電圧ダイオード)		一定以上の逆電圧 を加えると逆電流を 流す
トンネルダイオード (エサキダイオード)		負性抵抗、 増幅作用を持つ

バイポーラトランジスタ

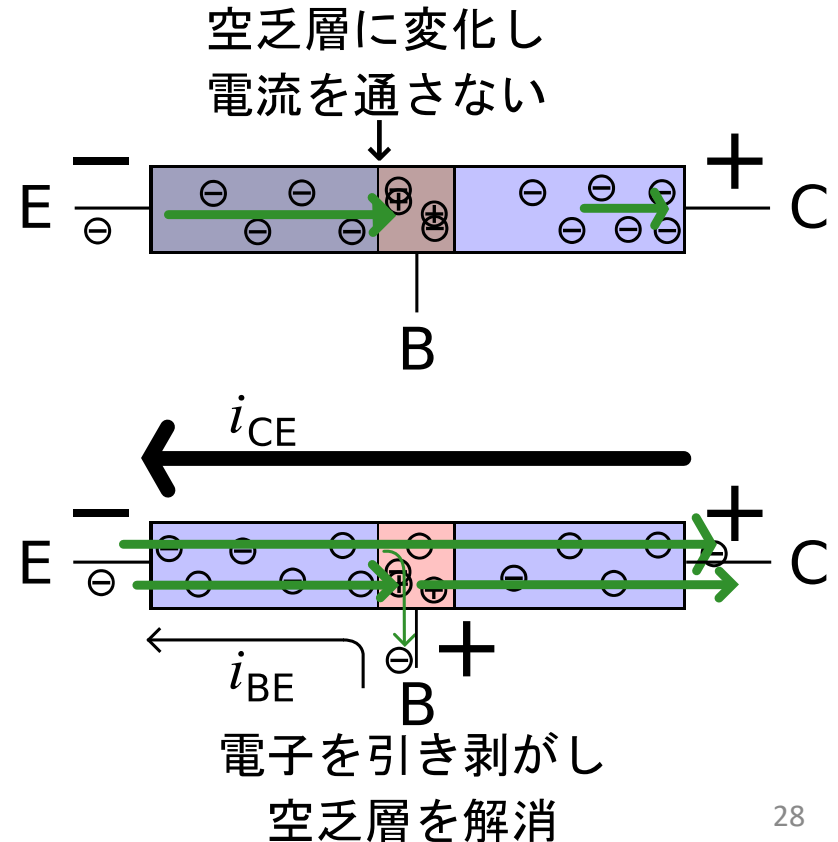


(NPN型)バイポーラトランジスタ

E-C間に電圧をかけても
電流は流れない。

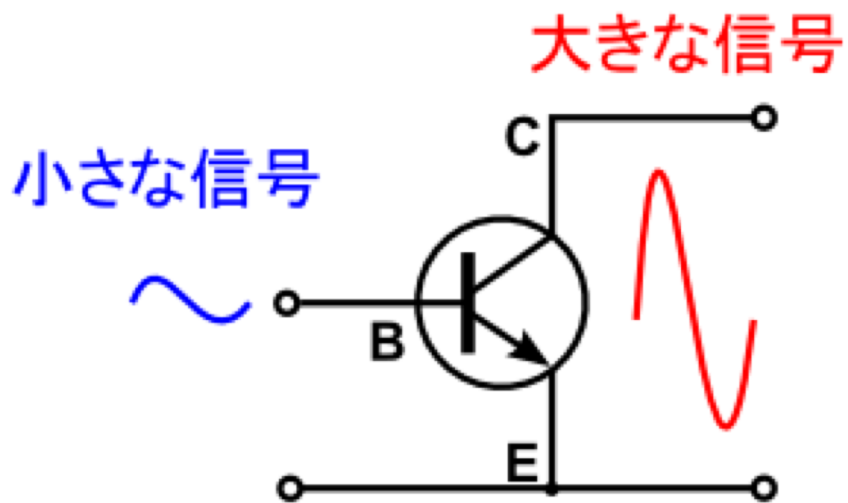


E-B間にすこし電流を
流すと、
E-C間に大電流を
流せるようになる。

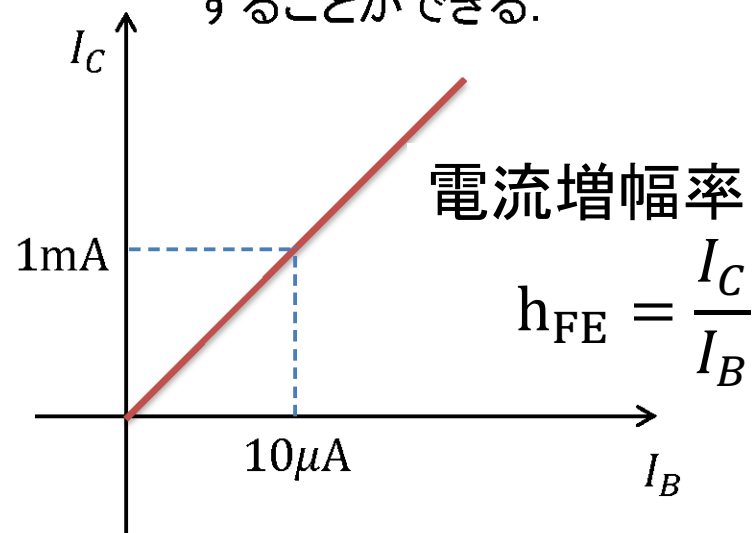


バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタは、 **増幅作用** を持つ



小さい電流 (I_B) 変化で
大きい電流 (I_C) を制御
することができる。



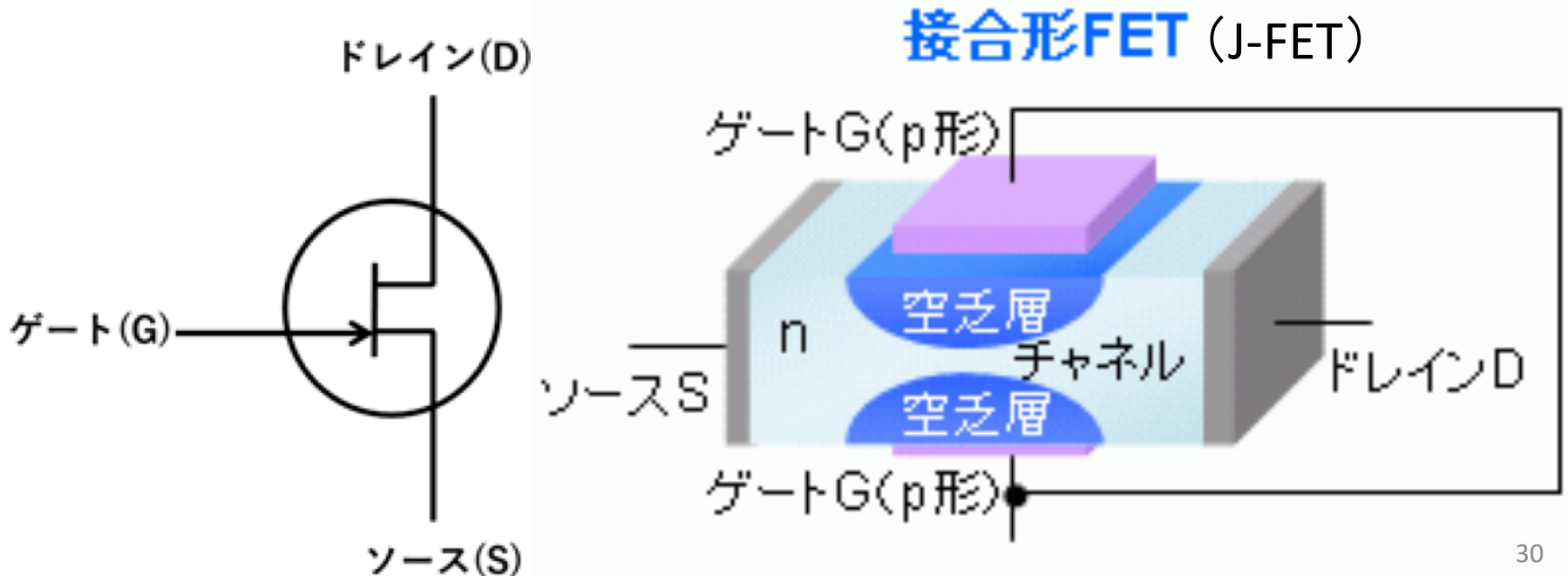
• 増幅作用とは
小さな電力 によって、大きな電力 を制御すること

• トランジスタの用途
信号増幅 、 電力増幅 、 スイッチングに利用される

FET (電界効果トランジスタ)

Field Effect Transistor

ゲートに逆電圧(電界)をかけ空乏層の厚さを変えると、
キャリアの通り道(チャネル)の幅が変わるので、
ソース・ドレイン間を流れる電流を制御できる。



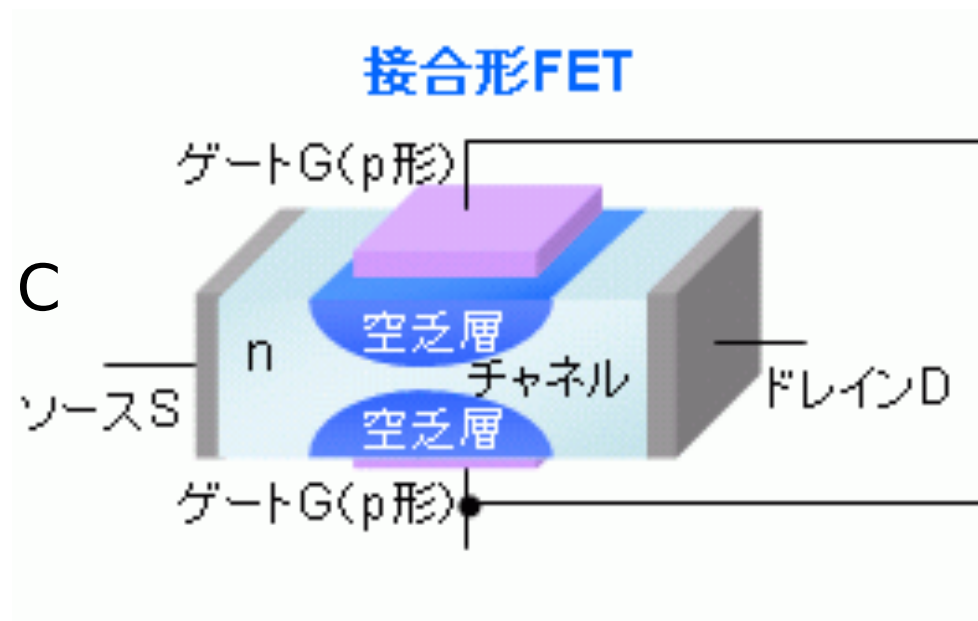
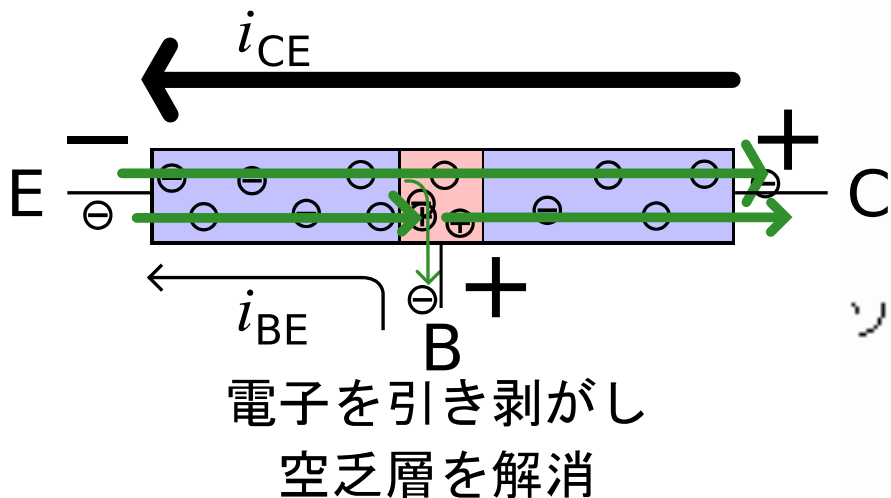
バイポーラ型 vs 電界効果型

電流 で電流を制御

電圧 で電流を制御

低い 入力インピーダンス

高い 入力インピーダンス



まとめ

能動素子

- **整流** 作用: 片方向にしか電流を流さない
- **増幅** 作用: 小さな電力で大きな電力を制御する

ダイオード

- n型半導体とp型半導体を接合 (np接合)
- **整流** 作用を持つ (ダイオードの種類は表を参照)

トランジスタ

- **増幅** 作用を持つ
- バイポーラトランジスタ (トランジスタ)
 - **電流** で電流を制御。 **低い** 入力インピーダンス
 - **NPN** 型と **PNP** 型
- 電界効果トランジスタ (FET)
 - **電圧** で電流を制御。 **高い** 入力インピーダンス
 - **Nチャネル** 型と **Pチャネル** 型

練習問題

練習問題1

(1) FETについて誤っているのはどれか？

1. P型とN型半導体からできている
2. 電源の極性が反対で特性は同じ素子がある
3. 周囲温度の影響を受ける
4. 電流制御形である
5. 真空管と同様、高入力抵抗である

(2) 増幅作用を持つのはどれか

1. コンデンサ
2. 変圧器
3. トランジスタ
4. インダクタ
5. ツェナーダイオード

練習問題2

(3) ダイオードについて次の説明の中から正しいものを全て選べ

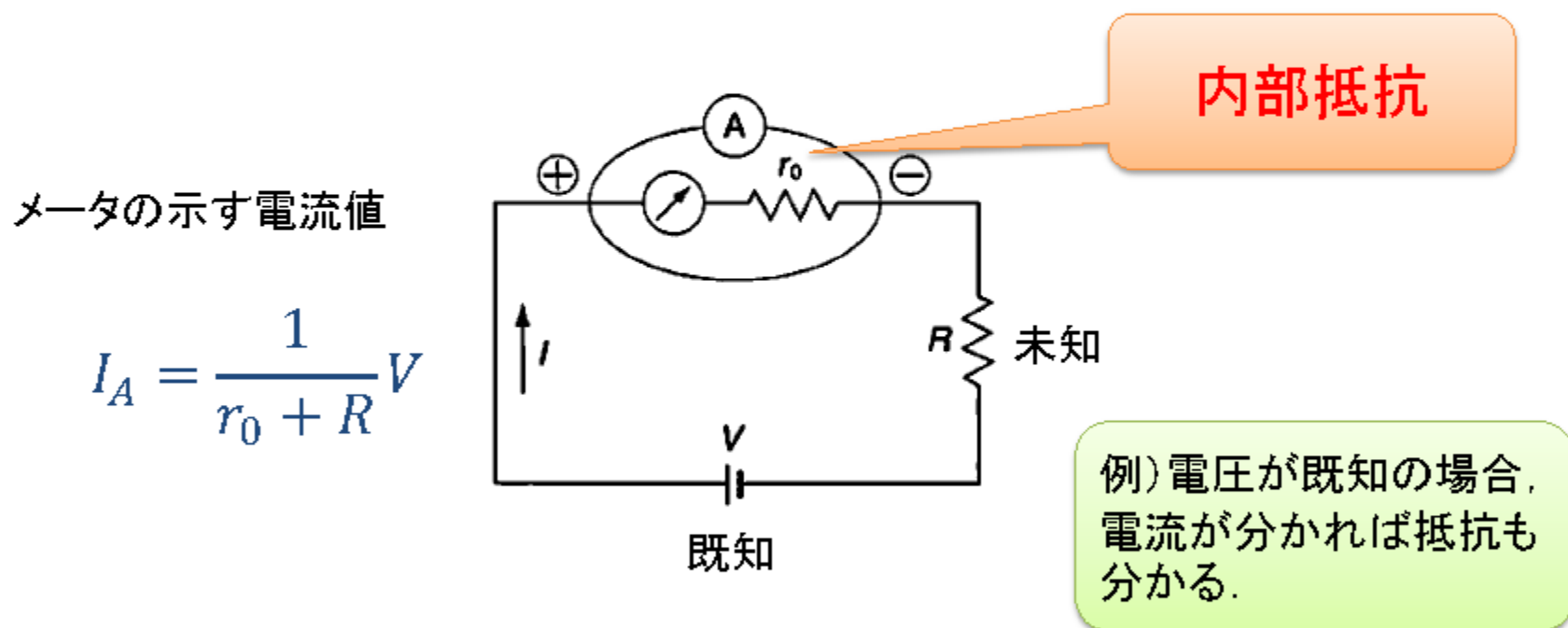
1. ダイオードは一般に整流器、検流器に利用される
2. トンネルダイオードには増幅作用がある
3. シリコンやガラスは半導体である
4. 発光ダイオードは光を当てる明るさに応じて流れる電流が変化する
5. 定電圧ダイオードは安定化直流電源の基準電圧をつくる時に利用される

電気回路 補足

(電圧計と電流計の使い方)

電流計

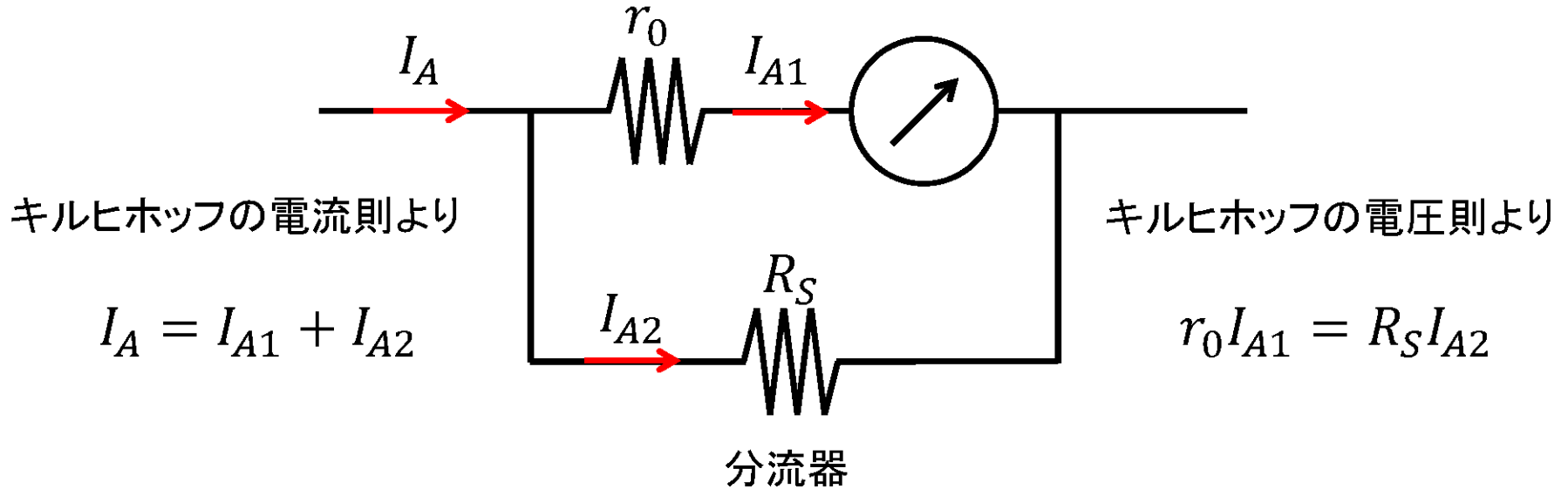
測りたい電流が流れる区間に **直列** に接続する.



電流を正しく測るためには、 $r_0 \ll R$ であることが必要。
(=動作を邪魔しない)

分流器

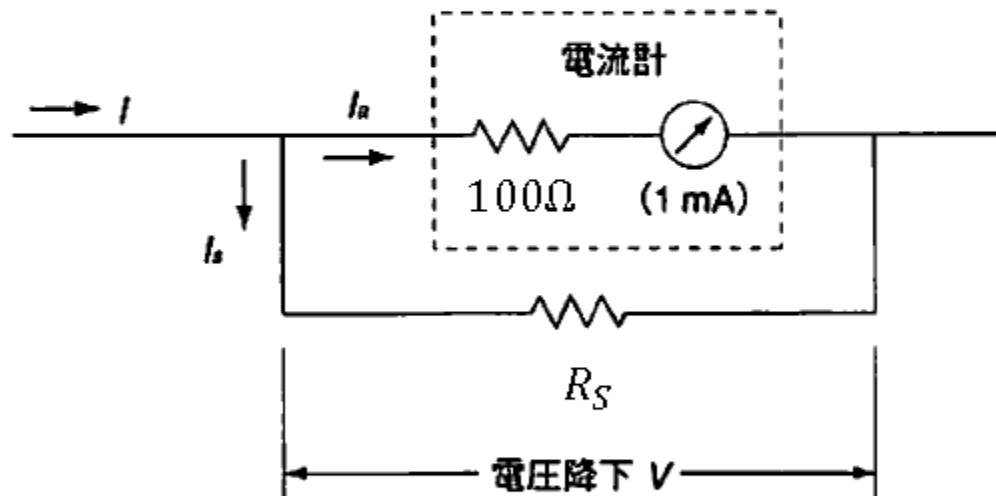
電流計 の測定範囲を広げるために用いる抵抗器



$$(\text{倍率}) = \frac{I_A}{I_{A1}} = \frac{I_{A1} + I_{A2}}{I_{A1}} = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

(計算例)

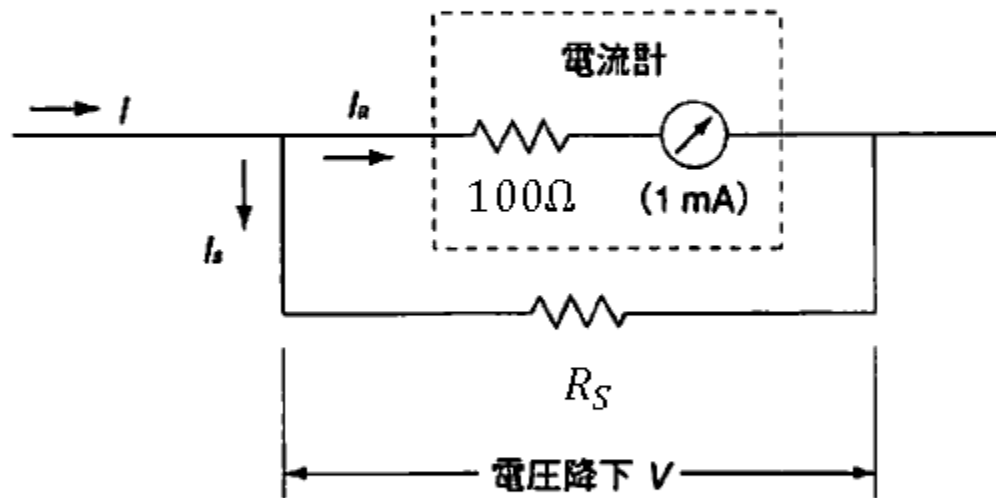
100mAの電流まで測れるようにする分流器は何Ωか.



$$\text{倍率} = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

(計算例)

100mAの電流まで測れるようにする分流器は何Ωか.



$$\text{倍率} = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

$$100[\text{mA}]/1[\text{mA}] = 100 = 1 + \frac{r_0}{R_S}$$

$$100 - 1 = \frac{r_0}{R_S}$$

$$(100 - 1)R_S = r_0$$

$$R_S = \frac{r_0}{100 - 1} = \frac{100}{99}$$

$$\text{答え } R_S = \frac{100}{99} \Omega$$

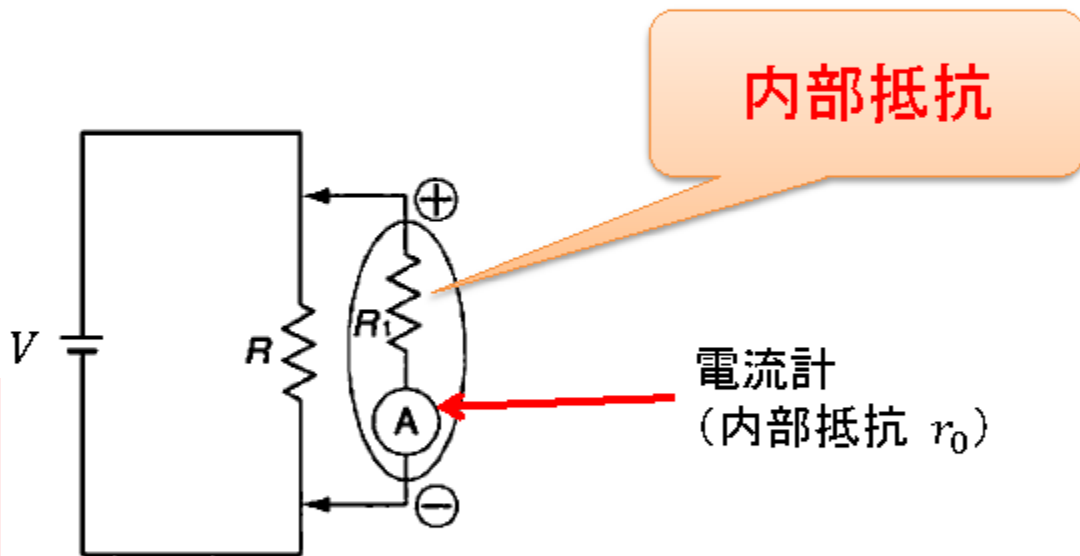
電圧計

測りたい電圧が加わる区間に **並列** に接続する.

メータの示す電圧値

$$V_A = (R_1 + r_0)I_A$$

メーターに流れる電流は
できる限り **小さい**
方がよい。

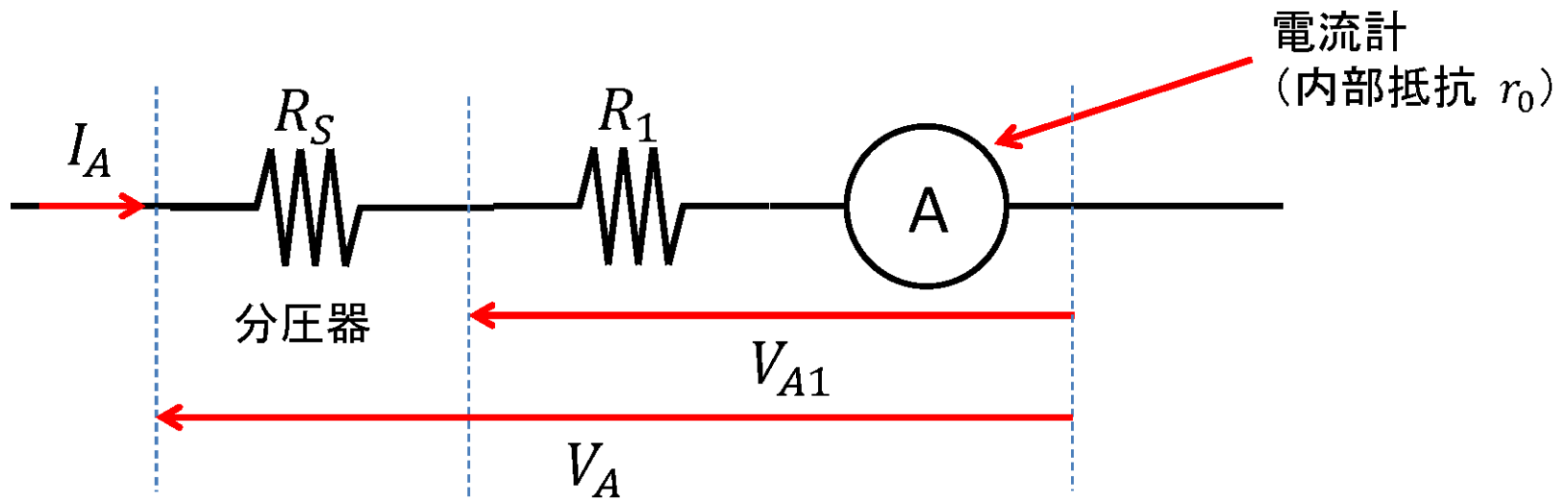


電圧を正しく測るためには, $R_1 \gg r_0$ であることが必要.

動作を邪魔しないためには, $R_1 \gg R$ であることが必要.

分圧器

電圧計 の測定範囲を広げるために用いる抵抗器



$$\text{(倍率)} = \frac{V_A}{V_{A1}} = 1 + \frac{R_S}{R_1 + r_0}$$

(計算例)

10Vまで計測可能な電圧計を用いて50Vまで電圧を計測するためには、何Ωの抵抗を分圧器として使用すれば良いか。ただし、電圧計の内部抵抗を100kΩ、電圧計を構成する電流計の内部抵抗を10Ωとする。

$$\text{倍率} = 1 + \frac{R_S}{R_1 + r_0}$$

(計算例)

10Vまで計測可能な電圧計を用いて50Vまで電圧を計測するためには、何Ωの抵抗を分圧器として使用すれば良いか。ただし、電圧計の内部抵抗を100kΩ、電圧計を構成する電流計の内部抵抗を10Ωとする。

$$\text{倍率} = 1 + \frac{R_S}{R_1 + r_0}$$

$$\frac{50[\text{V}]}{10[\text{V}]} = 5 = 1 + \frac{R_S}{100000 + 10}$$

$$5 - 1 = \frac{R_S}{100010}$$

$$4 \times 100010 = R_S$$

$$R_S = 400,040[\Omega]$$



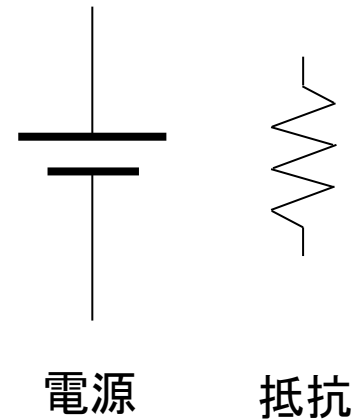
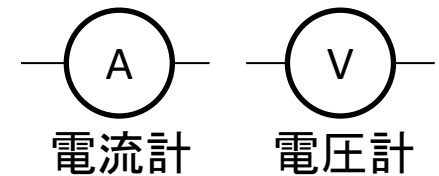
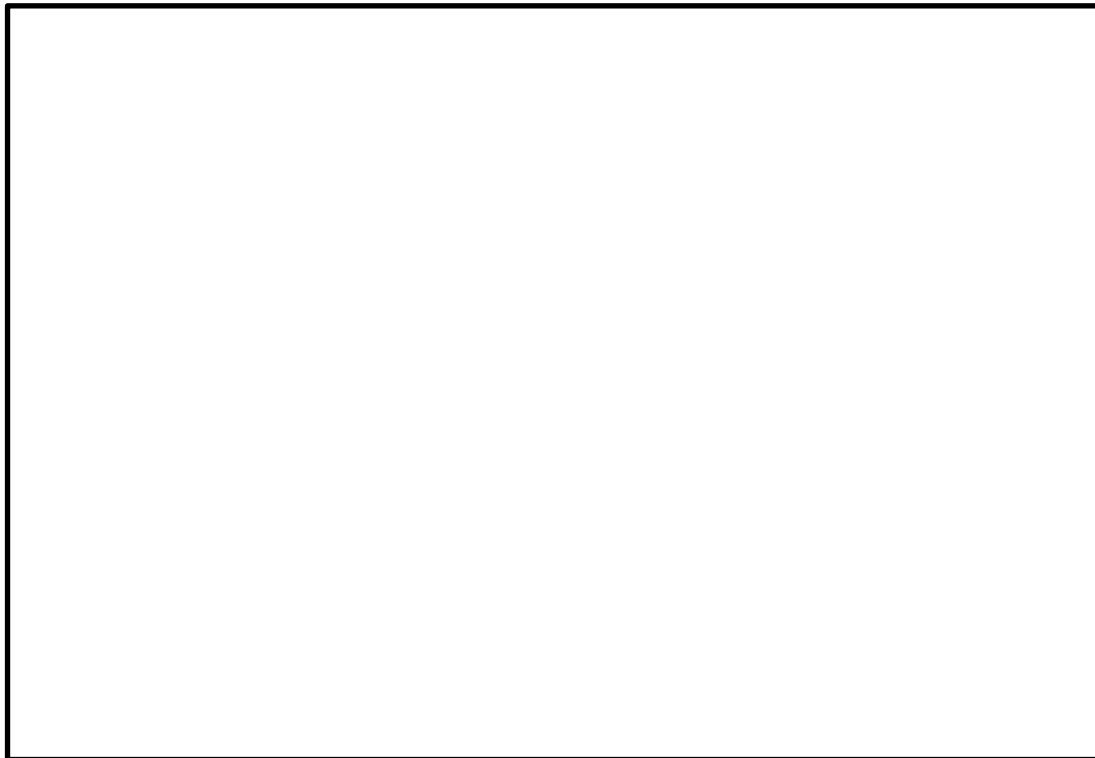
100kΩの抵抗 × 4個



10Ωの抵抗 × 4個

練習問題2

1つの抵抗にかかる電圧、流れる電流を測る時、電圧計、電流計をそれぞれどのように接続すれば良いか。



練習問題2 解答

1つの抵抗にかかる電圧、流れる電流を測る時、電圧計、電流計をそれぞれどのように接続すれば良いか。

