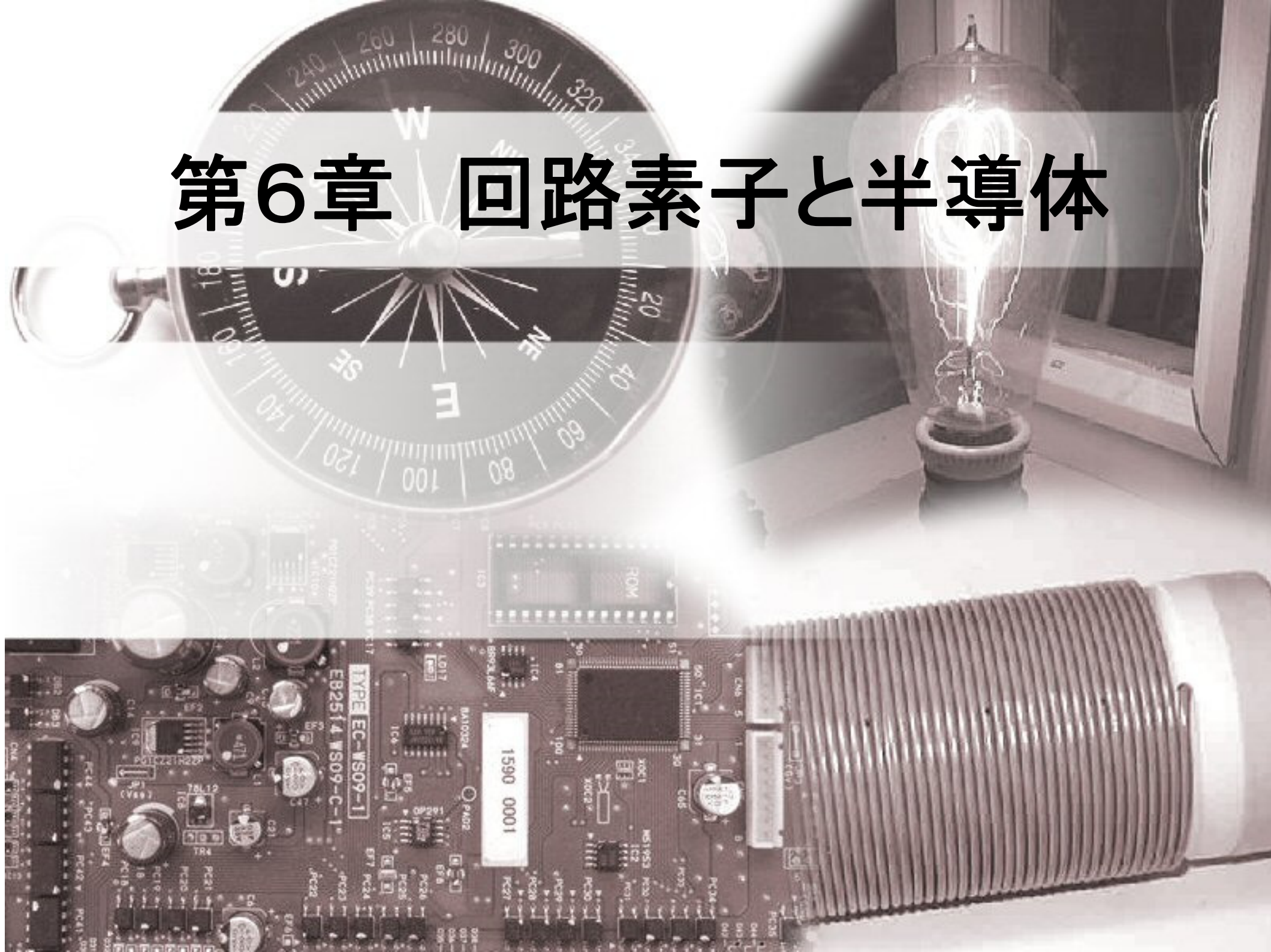


第6章 回路素子と半導体



回路素子

電磁気や電気回路で学んだレジスタ、キャパシタ、インダクタなどの回路素子は、外部から電流もしくは電圧を受けてその機能を発揮することより**受動素子**、もしくは**線形素子**と呼ばれる。これに対し、**能動素子**は**非線形素子**とも呼ばれ、自ら増幅・変形・発電をすることのできる素子である。能動素子の代表例が半導体である。

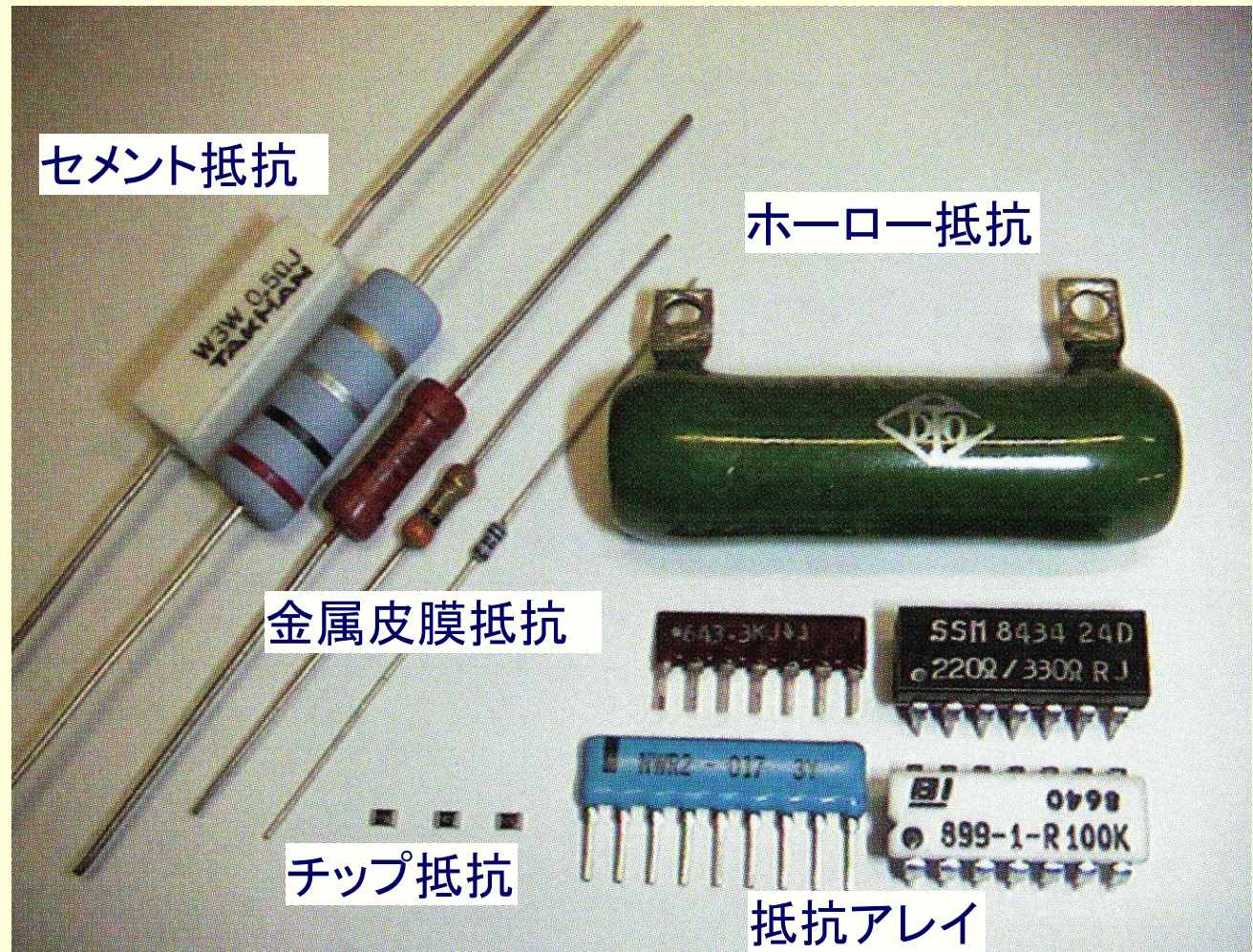


真空管：20世紀前半の能動素子の代表例

受動素子:レジスタ

写真に示す抵抗は、電源や電池の内部抵抗とは別で、単独回路素子としての抵抗である。

従って、純粹にオームの法則が成立する素子として扱う。



$$\text{電圧 (V)} = \text{電流 (I)} \times \text{抵抗 (R)}$$

受動素子:レジスタ

抵抗のカラーコード

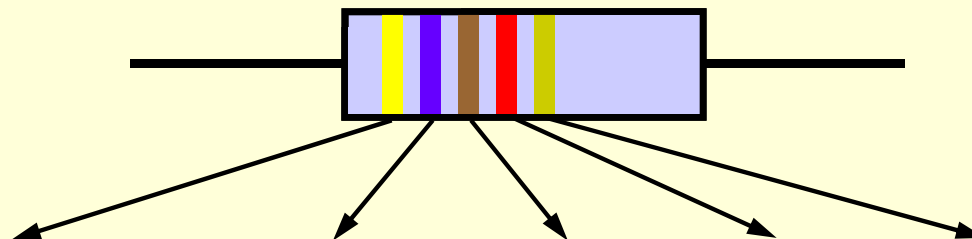
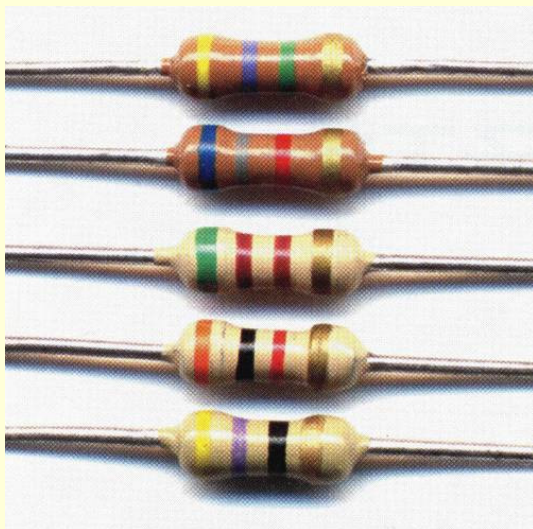
5色帯表示の抵抗値は、

$$R = ABC \times 10^D [\Omega]$$

4色帯表示では、

$$R = AB \times 10^C [\Omega]$$

なお、**最終帯は公称
の値許容値**(誤差)
を表している。



号名	第1色帯 第1数字	第2色帯 第2数字	第3色帯 第3数字	第4色帯 乗数	第5色帯 公称値許容値
黒	0	0	0	10^0	—
茶	1	1	1	10^1	$\pm 1\%$
赤	2	2	2	10^2	$\pm 2\%$
橙	3	3	3	10^3	—
黄	4	4	4	10^4	—
緑	5	5	5	10^5	$\pm 0.5\%$
青	6	6	6	10^6	$\pm 0.25\%$
紫	7	7	7	10^7	$\pm 0.1\%$
灰	8	8	8	10^8	—
白	9	9	9	10^9	—
金	—	—	—	10^{-1}	$\pm 5\%$
銀	—	—	—	10^{-2}	—
	A	B	C	D	E

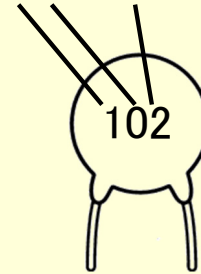
受動素子：キャパシタ(コンデンサ)



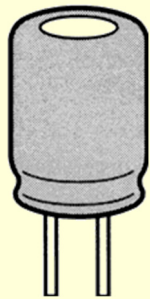
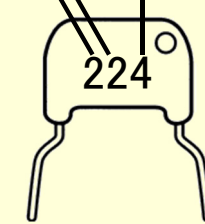
ここに示すコンデンサの他にバリアブル・コンデンサ(バリコン)や特殊コンデンサもある。

(3桁目は乗数を示す)

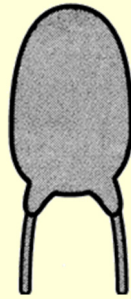
$$10 \times 10^2 = 1000 [\text{pF}]$$



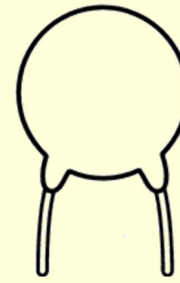
$$22 \times 10^4 = 220000 [\text{pF}] = 0.22 [\mu\text{F}]$$



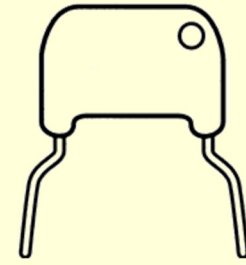
アルミ電解



タンタル
(タンタル電解)

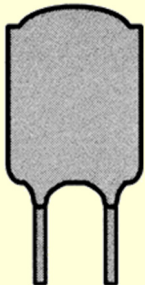


セラミック

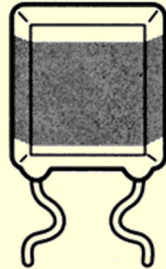


積層
(積層セラミック)

————— 電解コンデンサは一般に有極、また他のコンデンサは無極 —————



マイラーコーン
(マイラーフィルム)



ポリコン
(ポリエステルフィルム)



ポリスチレン
(ポリスチレンフィルム)



スチロン
(ポリスチレンフィルム)

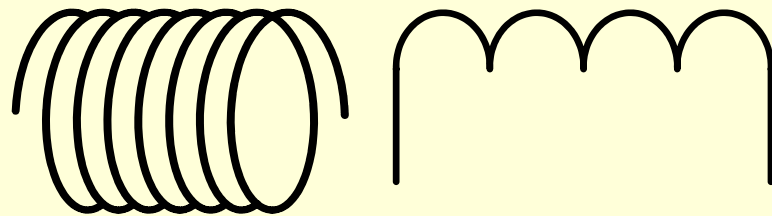
受動素子：インダクタ



実際の回路に使用した小型コイル

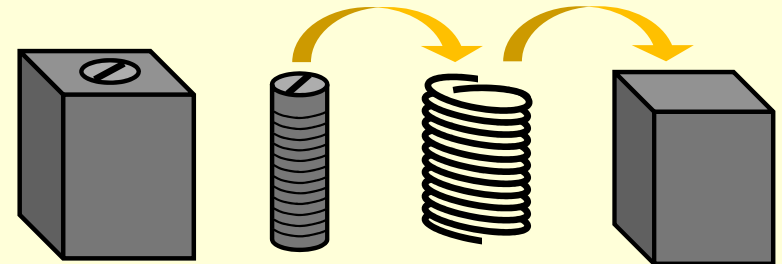


フェライトやパーマロイ等による有芯コイル



図や回路設計等で用いるコイルのモデル図

可変コイル



受動素子のリアクタンス

キャパシタのリアクタンス

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}$$

複素表現

$$X_c = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j2\pi fC}$$

キャパシタは、周波数が高くなると ω が大きくなり、リアクタンスが小さくなる。直流では、 $\omega = 0$ となるので、 $X_C = \text{無限大}$ 、すなわち電流は流れなくなる。

インダクタのリアクタンス

$$X_L = \omega L = 2\pi fL$$

複素表現

$$X_L = j\omega L = j2\pi fL$$

インダクタは、周波数が低くなると ω が小さくなり、リアクタンスが小さくなる。直流では、 $\omega = 0$ となるので、 $X_L = 0$ となる。

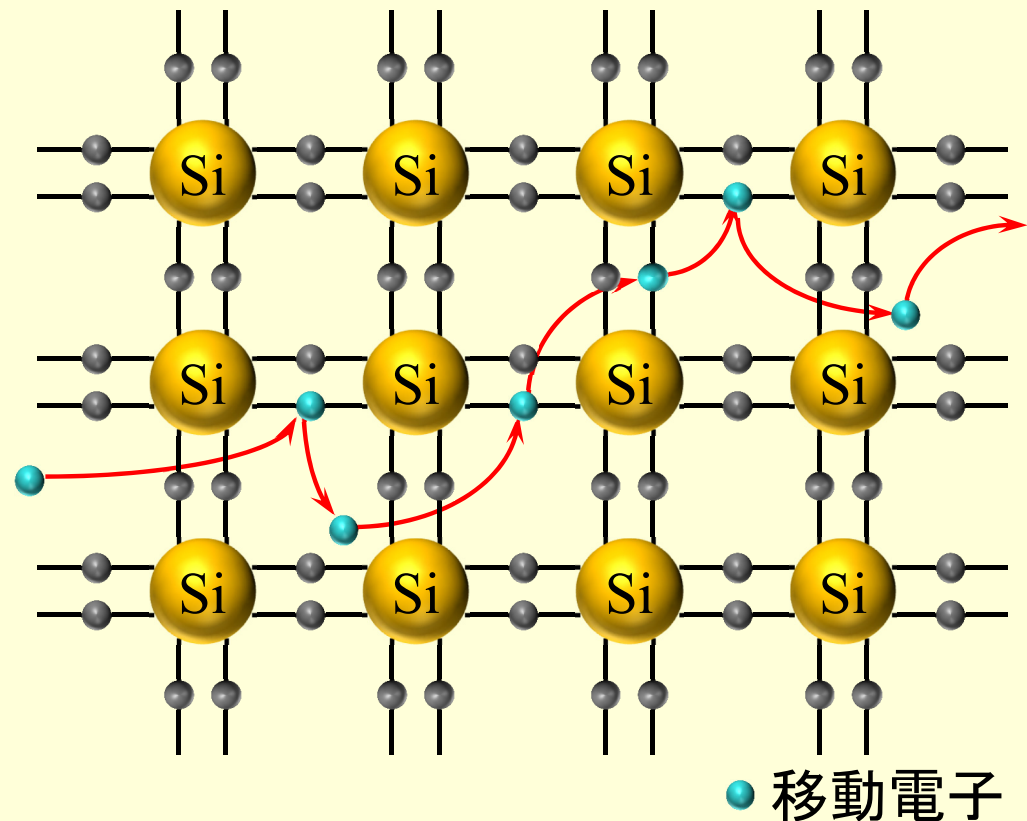
電気回路や電子回路に用いられているコイルは、自己インダクタンスを利用した単体のものもあれば、装置や機器に応用したトランスやリレーなどもある。

能動素子：半導体とその構造

ゲルマニウム (Ge) やケイ素 (シリコン; Si) などは4価の原子で、原子構造の最外電子殻に4個の電子 (価電子) を持っている。この4価の原子だけで結晶を作ると、価電子同士が互いに共有するので、強い結合力を持つ共有結合の結晶ができる。このような物質を**真性半導体**という。



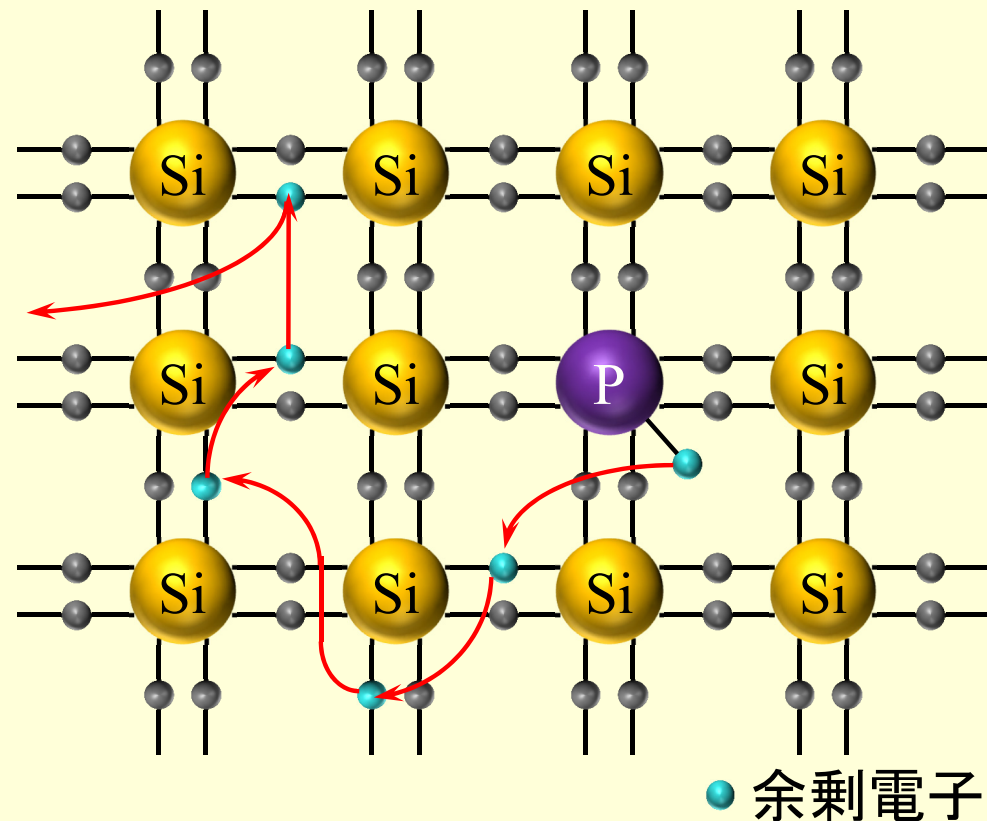
シリコンの単結晶



能動素子：N型半導体

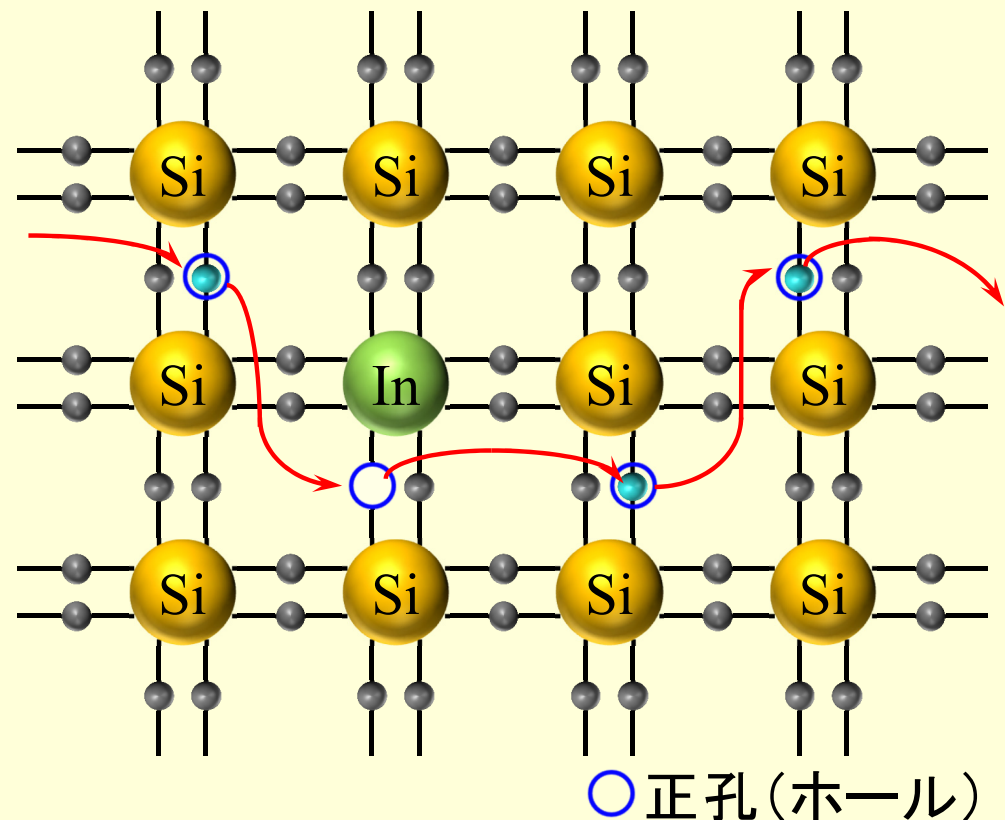
4価のSiに5価のリン(P)やヒ素(As)を少量結合(ドーピング)させると、1個の電子が余ることになる。このドーピングした5価の原子を**ドナー**という。**余った電子は、少しのエネルギーが加えられただけで、すぐ不純物から離れて結晶内を動き回る**。電子が移動した結果、その流れと逆方向に電流が流れる。

負(Negative)の電荷をもつ電子が電流のキャリア(担い手)となるので、このような半導体を**N型半導体**という。



能動素子:P型半導体

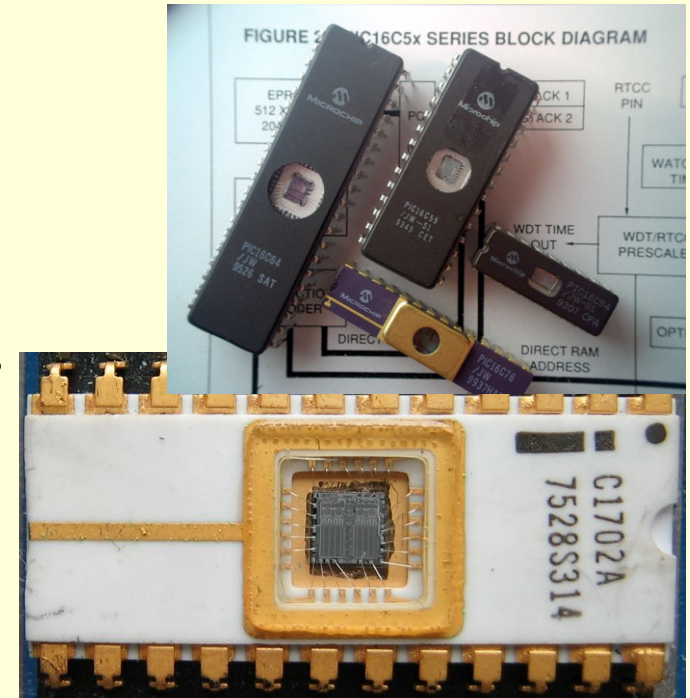
インジウム(In)またはガリウム(Ga)など、3価の原子を4価の原子に少量結合させると、**電子が1個不足し、そこにホール(正孔:プラスの性質を持った孔)ができる**。このドーパした3価の原子を**アクセプタ**という。少しのエネルギーが加えられるだけで、隣の電子はホールに入り込み、電子が移動する。逆方向に次々とホールができ、それに伴って電流が流れる。正(Positive)の電荷をもつホールが電流のキャリアとなるので、このような半導体を**P型半導体**という。



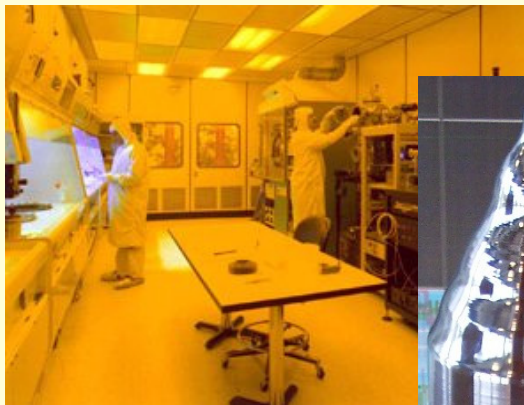
半導体

半導体 (semiconductor) は20世紀最大の発明といわれ、電子産業のみならず、現代のすべての産業の中核となるものである。

チップ



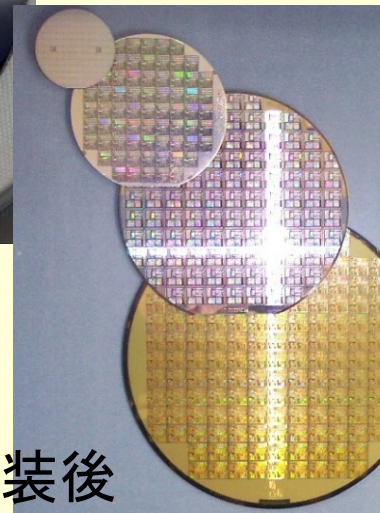
シリコンウェハ



クリーンルーム

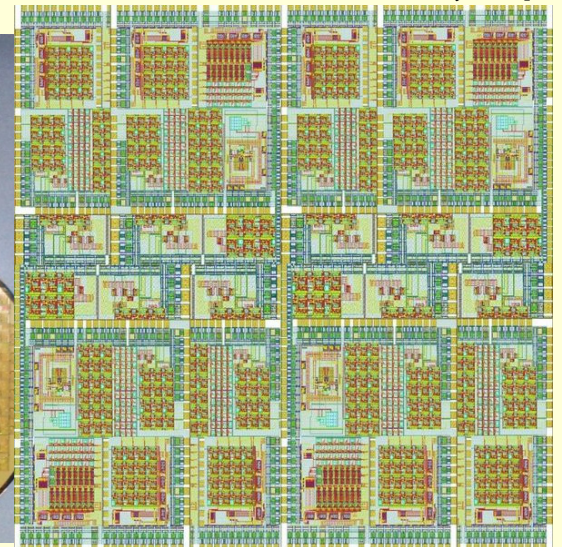


シリコンインゴット

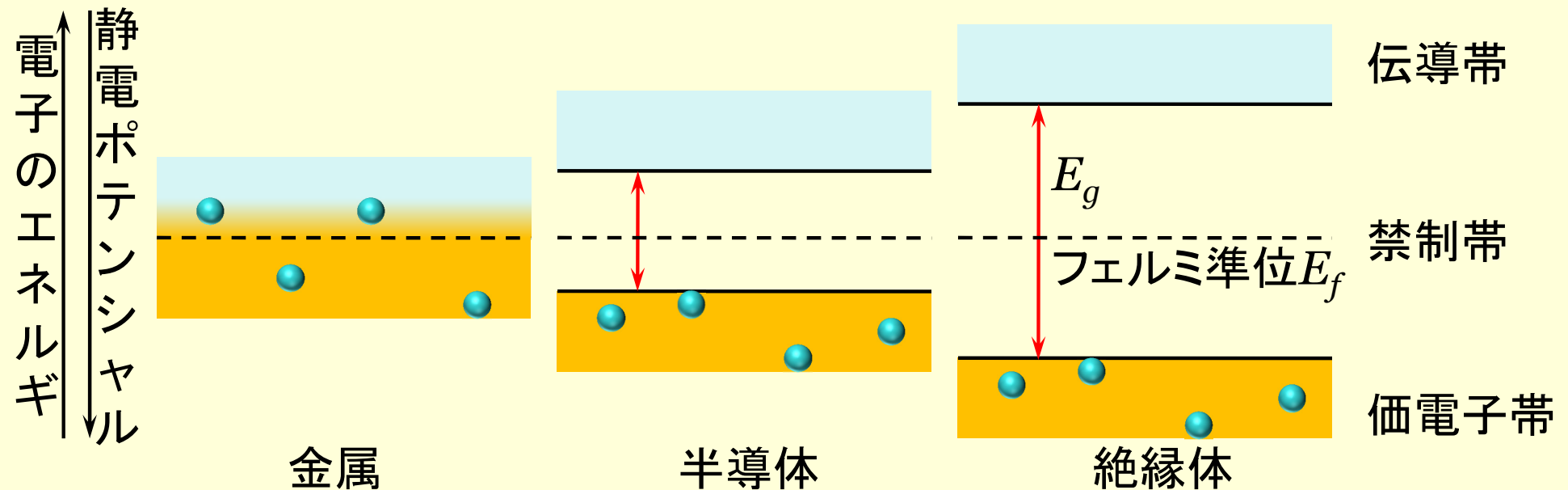


回路の実装後

ダイ



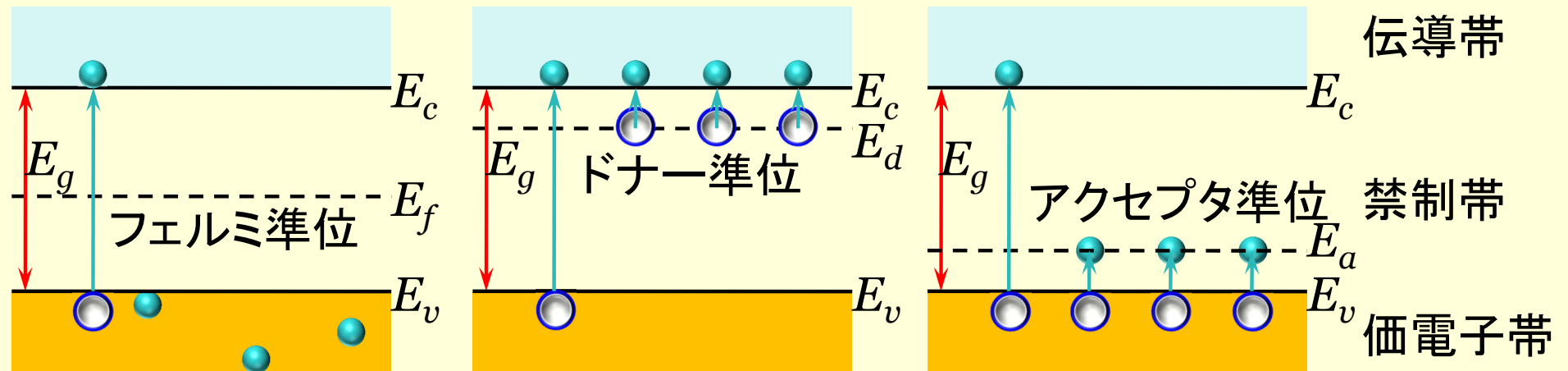
導体・半導体・絶縁体のエネルギー準位



エネルギーバンド構造は、価電子の3つのエネルギー状態の分散関係を示したものである。**価電子帯**は**価電子**によって満たされたエネルギーバンドであり、価電子が高エネルギー状態になり**伝導帯**のエネルギー準位をもつと移動可能な自由電子となる。価電子帯と伝導帯の間にはバンドギャップ E_g があり、ここを**禁制帯**という。禁制帯のエネルギー準位を**価電子**はとることはできない。半導体では空いている伝導帯の電子(伝導電子)を外部からの刺激で増やすことができる。金属ではエネルギーバンド内に空き準位があり、価電子がすぐ上の空き準位に移って伝導電子となるため、常に電気伝導性を示す。

フェルミ準位 E_f とは、系の電子を価電子帯に詰め込んだとき、系の全電子数が含まれるエネルギー準位である。

半導体のエネルギー準位



真性半導体

真性半導体のエネルギー準位は、伝導帯の準位 E_c と価電子帯による準位 E_v 、さらに中間にフェルミ準位 E_f を持つ禁制帯からなる。

N型半導体

ドナー準位の電子は周囲から $\Delta E = E_c - E_d$ をエネルギーとして得ることにより、伝導帯に励起され、自由電子となる。

P型半導体

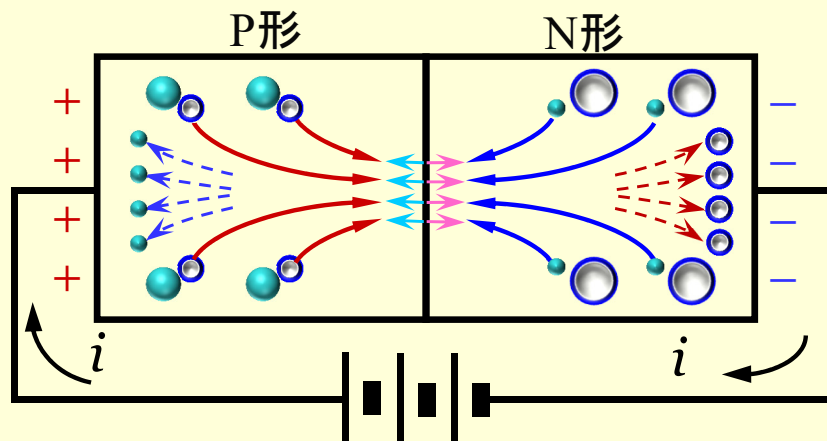
価電子帯の電子は周囲から $\Delta E = E_a - E_v$ をエネルギーとして得ることにより、電子がアクセプタに捕まり、価電子帯に正孔がでる。

ダイオード (Diode)

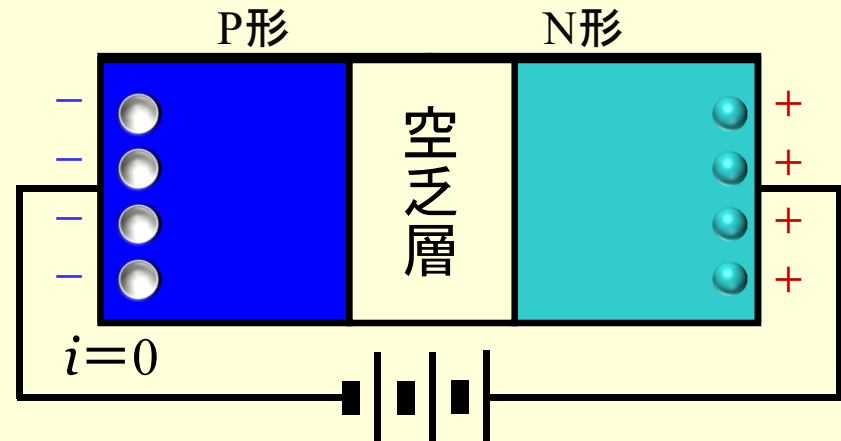
P形半導体とN形半導体を接合したものを**ダイオード** (Diode) という。

N形半導体に(-)、P形半導体に(+)の電位を与えると接合面の電位が中和し、N形半導体内の電子は(-)に反発して接合面を越え、P形半導体の方へ移動する。またP形半導体内の正孔(ホール)は(+)に反発して接合面を越え、N形半導体の方へ移動する。両者の電位差を大きくすることにより、これらのキャリアは接合面を通り抜けることができる。[順方向: 図a]

一方、これとは逆にN形半導体に(+)、P形半導体に(-)の電位を与えると、(+)極にN形半導体の中の自由電子が移動し、(-)極にはP形半導体の中の正孔が移動して空乏層ができ、接合面を通るキャリアが生じない。[逆方向: 図b]

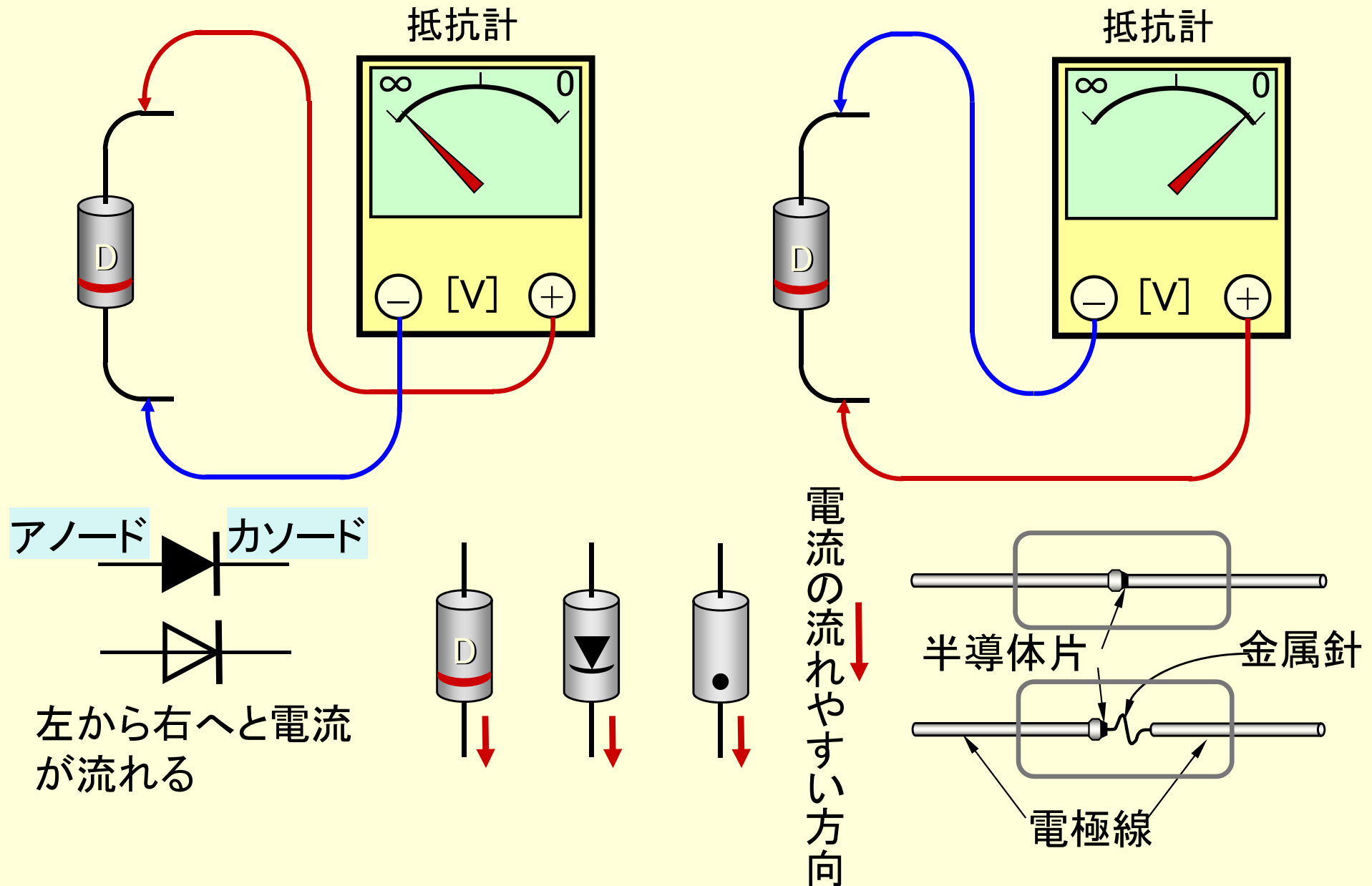


図a 順方向



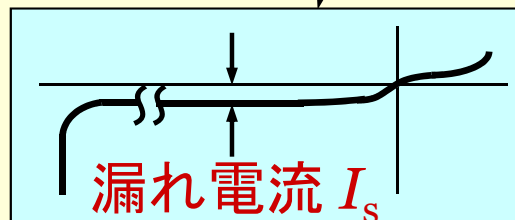
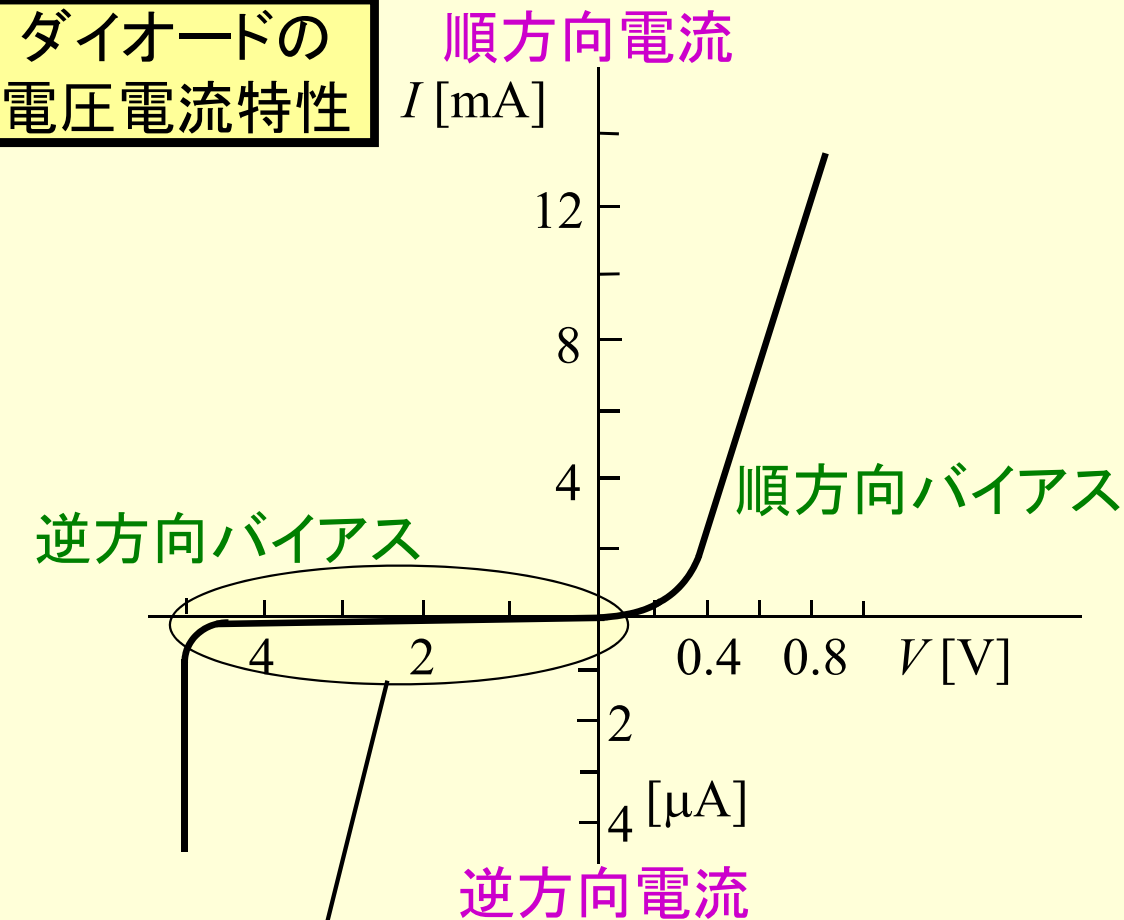
図b 逆方向

ダイオードの接続と構造



ダイオードの特性

ダイオードの 電圧電流特性



正方向は若干の電圧でも大きな電流が流れるが、負方向は大きな電圧をかけるまで電流が流れない。

ダイオードの整流作用

左図の特性を利用して、一定方向の電流だけを流す作用。逆方向に加える電圧が限界を超えるとアバラッシュブレークダウンを起こし、電流が流れてしまう。

ツェナーダイオード

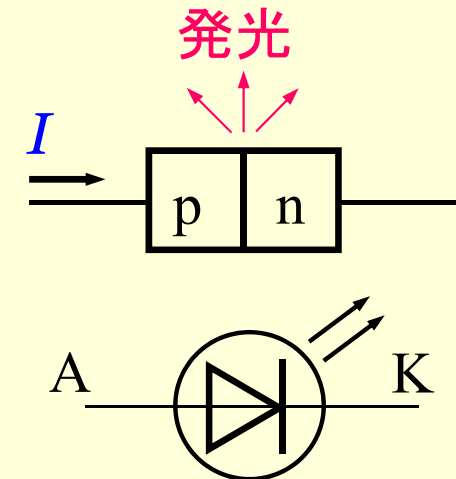
(定電圧ダイオード)

逆方向電流が変化しても逆方向電圧降下が一定に保たれると云うツェナー効果を利用したダイオード。定電圧を発生するので定電圧ダイオードとも云う。

その他のダイオード

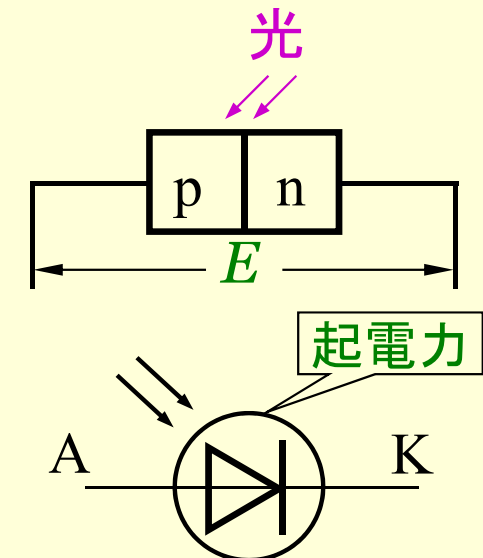
発光ダイオード (Light Emitting Diode: LED)

GaAs(ガリウム-ヒ素)やGaP(ガリウム-りん)のpn接合ダイオードに順方向電流を流すと、ある電流以上で接合部付近が発光する。この発光現象を利用したものがLED(発光ダイオード)である。近年、青色発光のダイオードが開発され、特許をめぐって話題になった。



フォトダイオード (Photo Diode)

pn接合の半導体に光を当てると、p側に正、n側に負の電圧が発生する。この現象をpn接合の光電効果という。この現象を利用したものがフォトダイオードで、赤外線・可視光線・紫外線などの検出に利用されている。SiやGaAsおよびGaAsPが材料となっている。



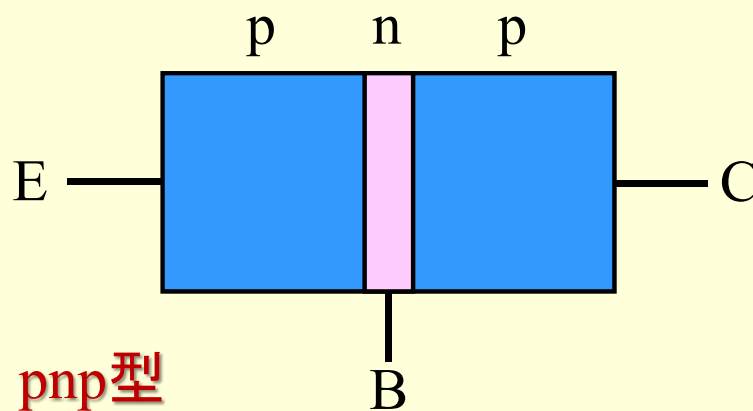
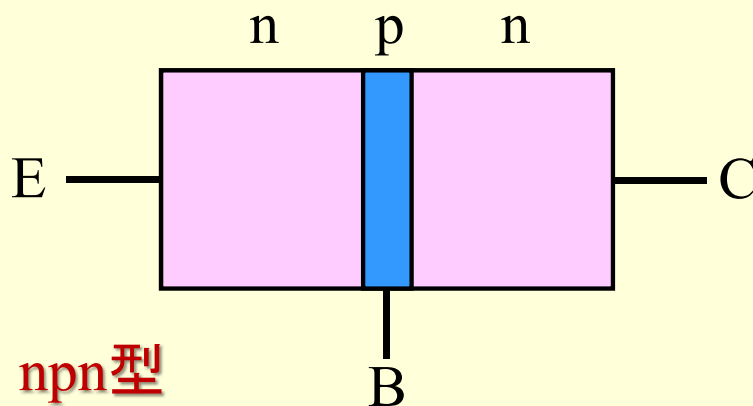
エサキダイオード (トンネルダイオード)

順方向に電流を流すと、トンネル効果により、ある電圧領域では電圧をかけるほどに流れる電流量が少なくなるという「負性抵抗」が現れる。この効果はフラッシュメモリなどに応用されている。

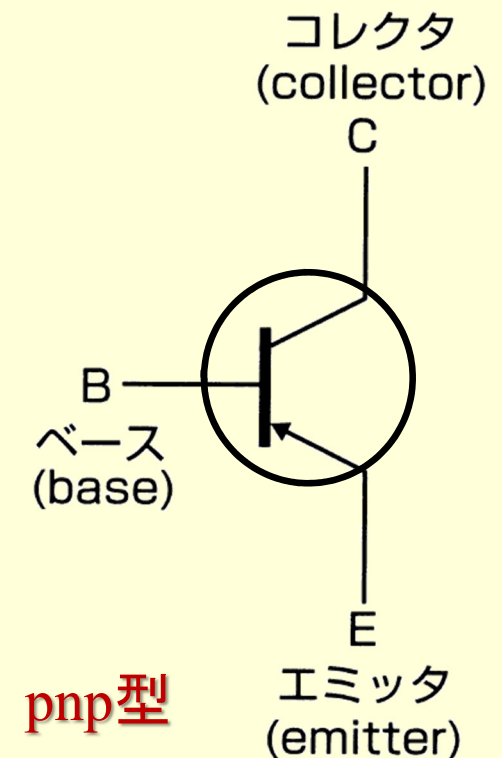
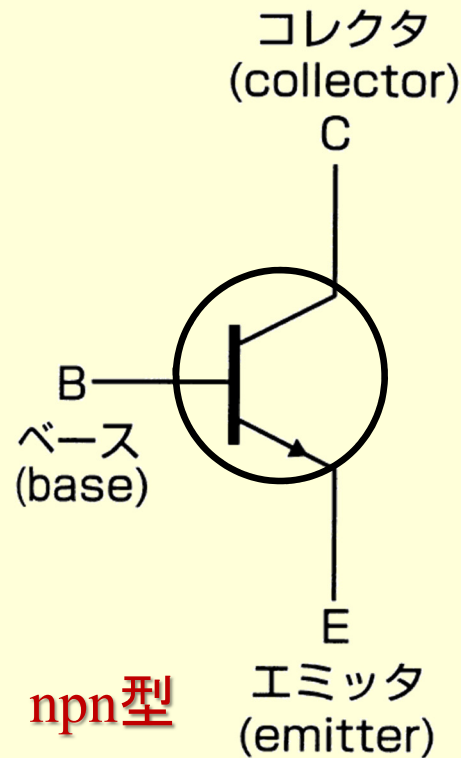
トランジスタ

P形半導体とN形半導体を複数組み合わせ増幅またはスイッチ動作する回路素子を**トランジスタ** (Transistor: transfer of a signal through a varister または transit resistorからの造語) とよぶ。さまざまなトランジスタがあるが、一般にはバイポーラトランジスタを指す。

構成

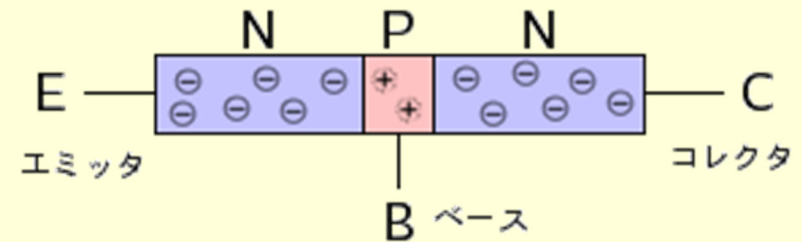


表示記号



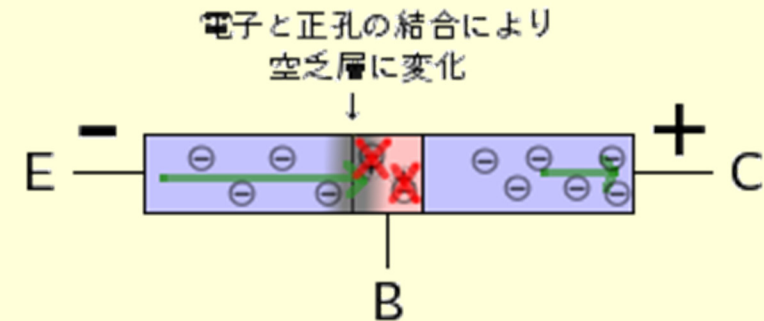
トランジスタの動作原理

1. **E**と**C**はN型半導体であるため電子が過剰にあり、**B**はP型半導体であるため正孔を持っている。また、**B**は幅を非常に薄くしてある。



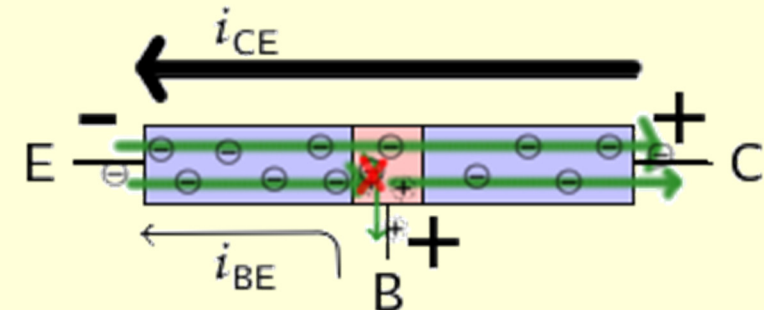
2. **E**–**C**間に、E側を(–)として電圧をかける。このとき電流は流れない。

1) **E**の電子が**C**側(+)に引き寄せられて**B**の正孔と結合するが、数に限りがあるので**B**内にキャリアが存在しなくなる。その結果、電子の移動が停止する(**E**–**C**間には空乏層が形成される)。



2) **C**内の電子も(+)極に移動するが、新たな電子の流入がないため、電子が全て(+)極の正孔と結合した時点で電子の移動が停止する。

3. さらに**E**–**B**間に、**E**側を(–)として電圧をかけるとトランジスタ全体に電流が流れる。

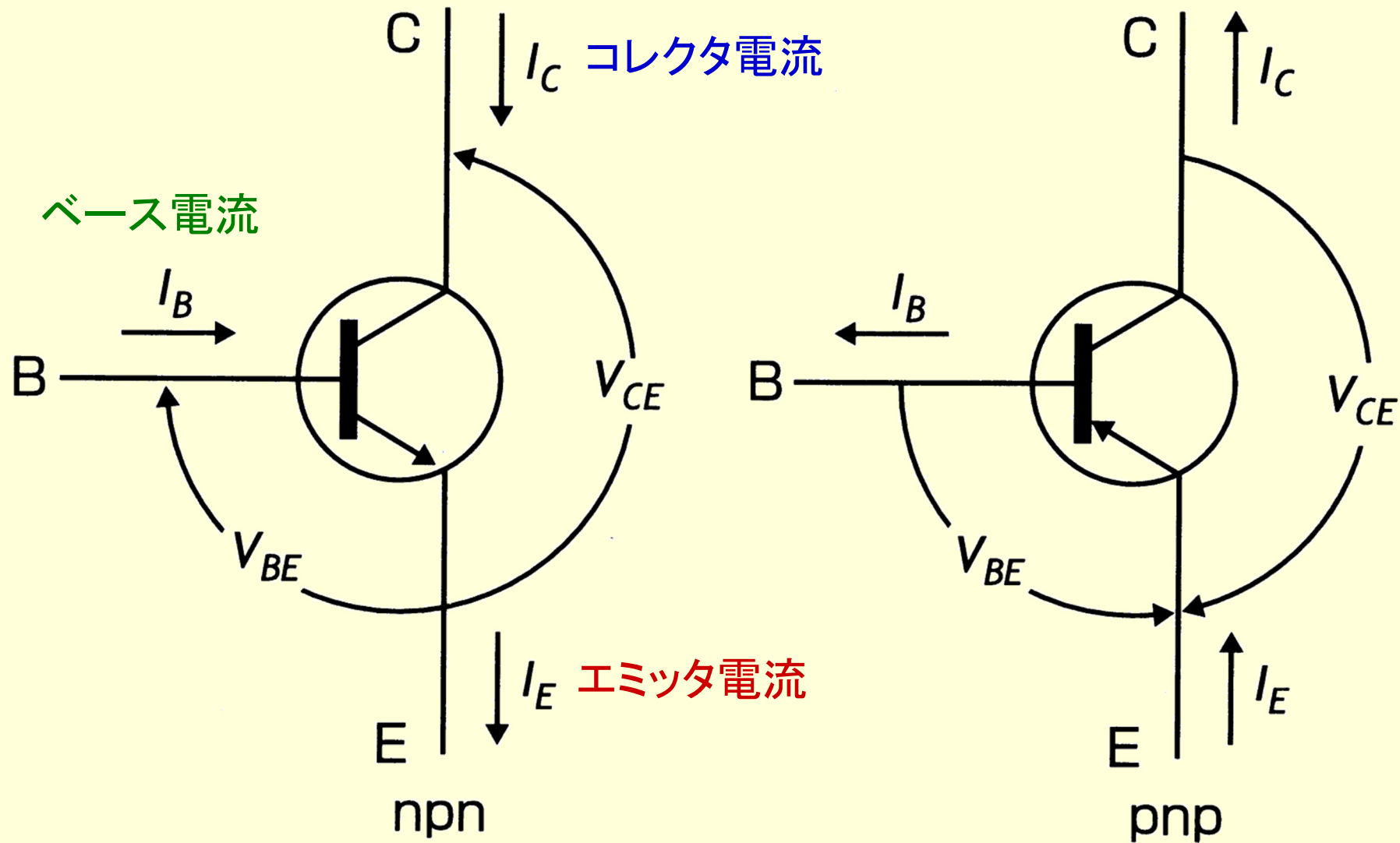


1) **B**に正孔が流入するため、**E**に存在する電子が**B**に移動する。

2) 移動した電子のうち一部は**B**内の正孔と結合するが、**B**は非常に薄い層なので、大部分の電子は**C**に引き寄せられて**B**を通過してしまう。

3) 結果、電流がトランジスタ全体に流れ、**E**–**C**間の電流は**E**–**B**間の電流に従って変化することになる(増幅)。各部はそれぞれ「**ベース**電流を土台とし」「**エミッタ**が放出した電子を」「**コレクタ**が受け取る」という名前通りの働きをする。

トランジスタの電圧と電流方向

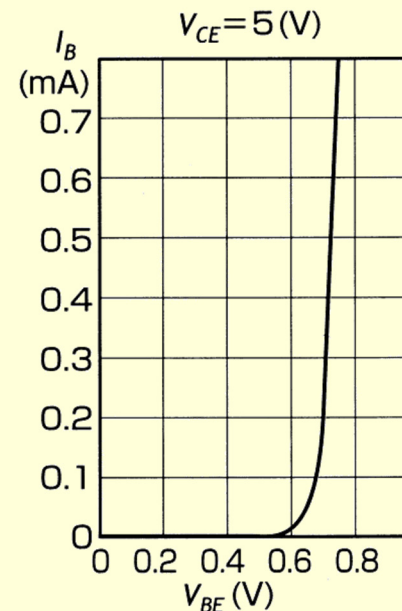


トランジスタの静特性

トランジスタの静特性は右のような入力特性・電流伝達特性・出力特性で示す。

① 入力特性 ($V_{BE}-I_B$)

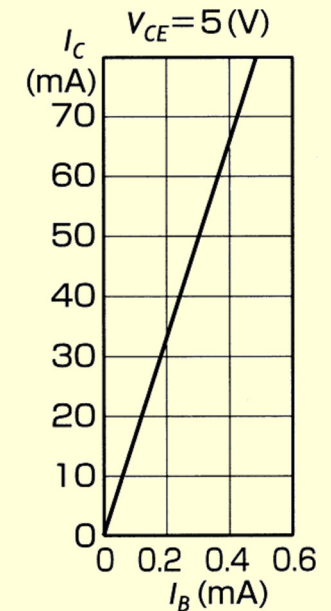
V_{CE} を一定にした時の I_B と V_{BE} の関係



a 入力特性

② 電流伝達特性 (I_C-I_B)

V_{CE} を固定した時の I_B と I_C の関係

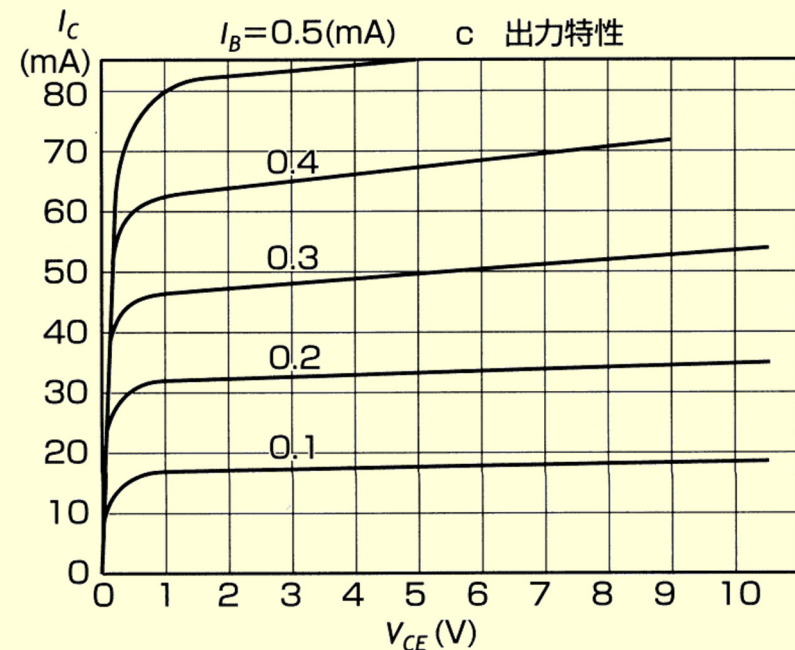


b 電流伝達特性

③ 出力特性 ($V_{CE}-I_C$)

I_B を固定した時の $V_{CE}-I_C$ の関係

I_C は I_B によって大きく変わり、 V_{CE} にはあまり影響を受けない。



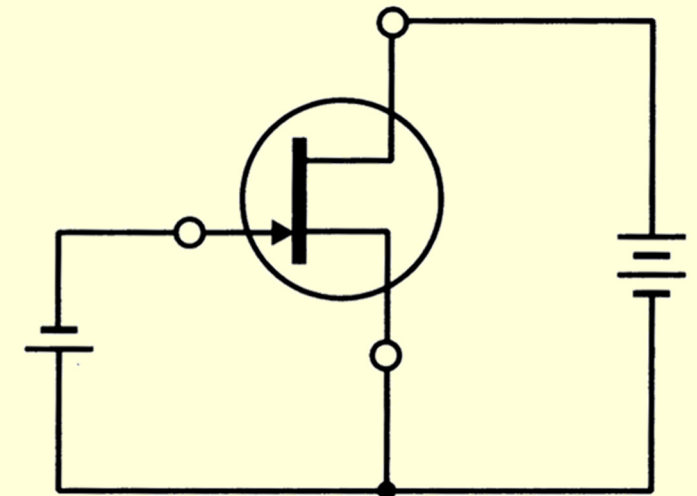
c 出力特性

電圧関係を表す $V_{CE}-V_{BE}$ 特性は他の3特性から求まり、利用頻度も少ない。なお、静特性の詳細は「回路」のところで説明する。

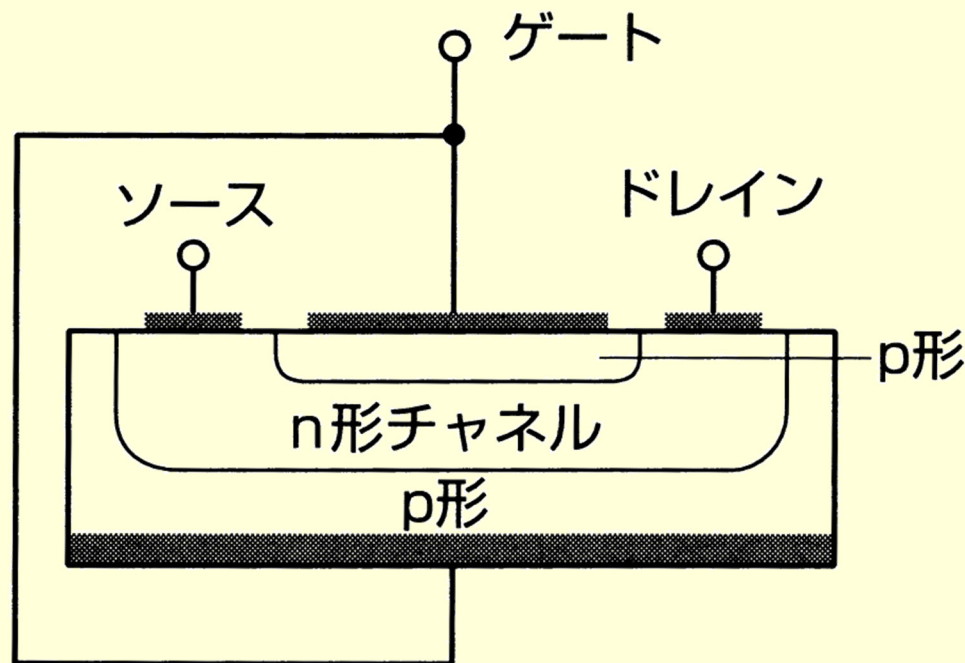
電界効果トランジスタ

ゲート電極に電圧をかけ、チャネルの電界により電子または正孔の流れにゲートを設ける原理で電流を制御するトランジスタを**電界効果トランジスタ**という。

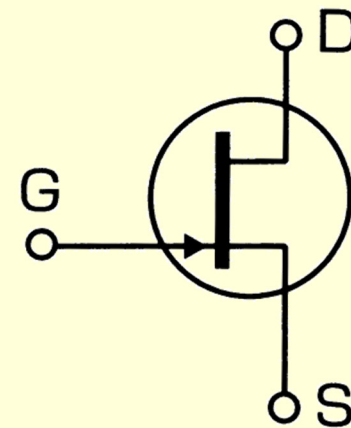
ゲートがpn接合になっているものをJunction FETといい、接合面にできる空乏層によって電流を制御する。



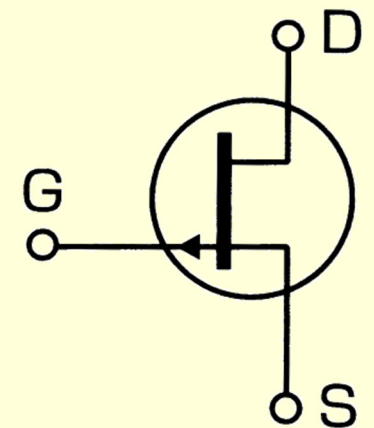
J-FETの接続例



J-FETの内部構造



nチャネル



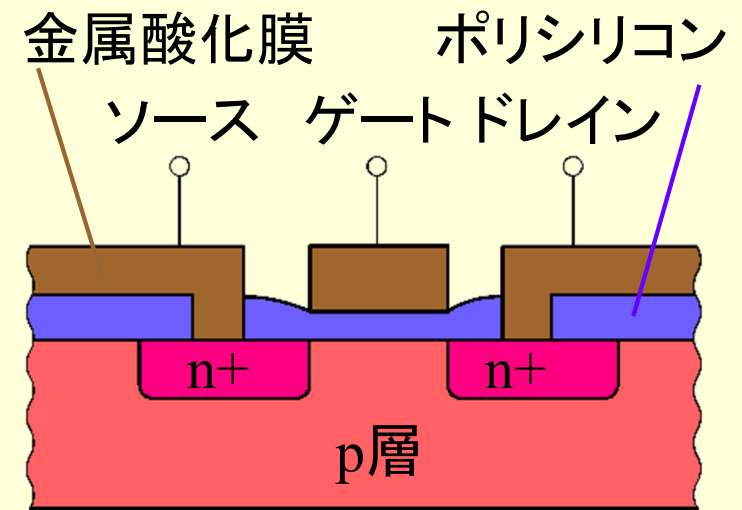
pチャネル

J-FETの回路記号

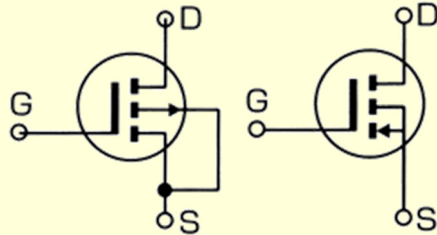
金属酸化膜半導体形FET

ゲート部分が半導体の酸化皮膜上の金属電極になっているものを**金属酸化膜形 (Metal Oxide Semiconductor) FET**とよぶ。現在の集積回路の主流となっている素子であり、p/n両型を同じ回路に持つ場合、CMOS型 (Complementary MOS: 相補型MOS) と呼ぶ。

ゲート電圧がある一定の値以上になると電流が流れ出すタイプをエンハンスメント型と呼び、ゲート電圧0Vでも電流が流れるタイプをディプレッション型と呼びます

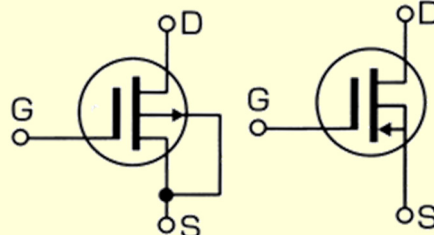


エンハンスメント型

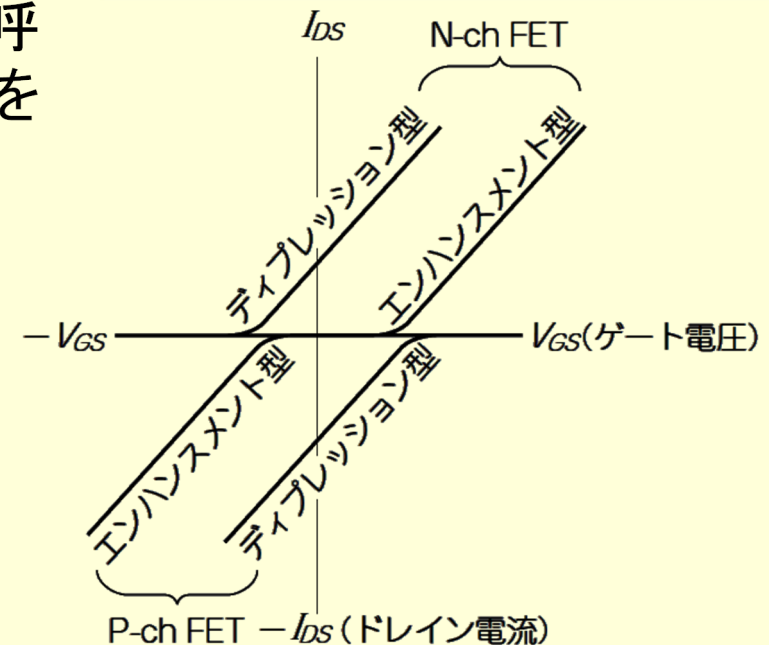


pチャンネル

ディプレッション型



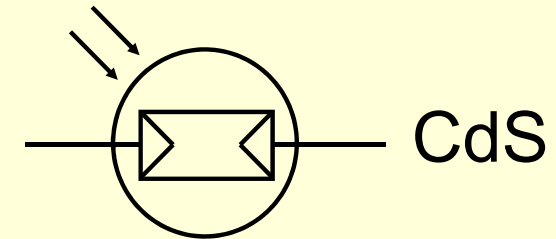
pチャンネル



その他の半導体素子

光導電素子: 硫化カドミニウム (CdS cell)

光が当たると抵抗が小さくなる物質で、電圧降下法などを用いて光計測を行う。光量測定器や街灯の自動点滅器などに利用されている。



サーミスタ (Thermistor)

温度変化によって抵抗が変わる半導体素子。マンガン(Mn)や銅(Cu)の酸化物の混合体で作られ、負荷温度上昇により初めは抵抗も上昇するが、すぐに抵抗が下がってくる傾向を示す。この負性温度特性(導電体の温度特性とは逆)を利用し、 $-100 \sim +300^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度測定を行う。

