

メカトロニクス (半導体素子)

下条 誠*

*電気通信大学

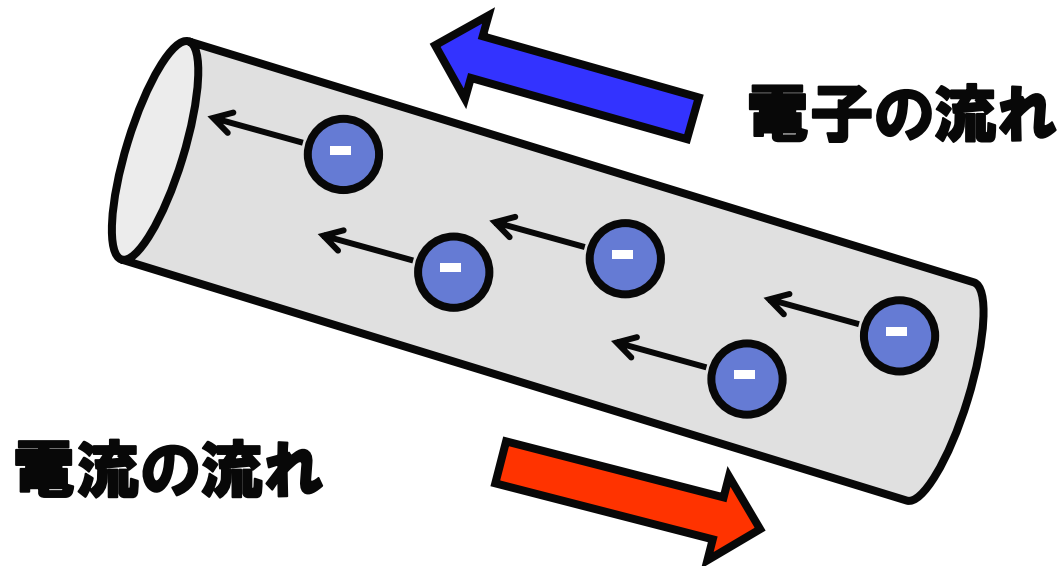
達成目標

1. 抵抗, コンデンサの役割, 使い方を理解し, 利用できるようにする
2. ダイオード, LED, トランジスタなど半導体の原理を理解し, 利用できるようにする

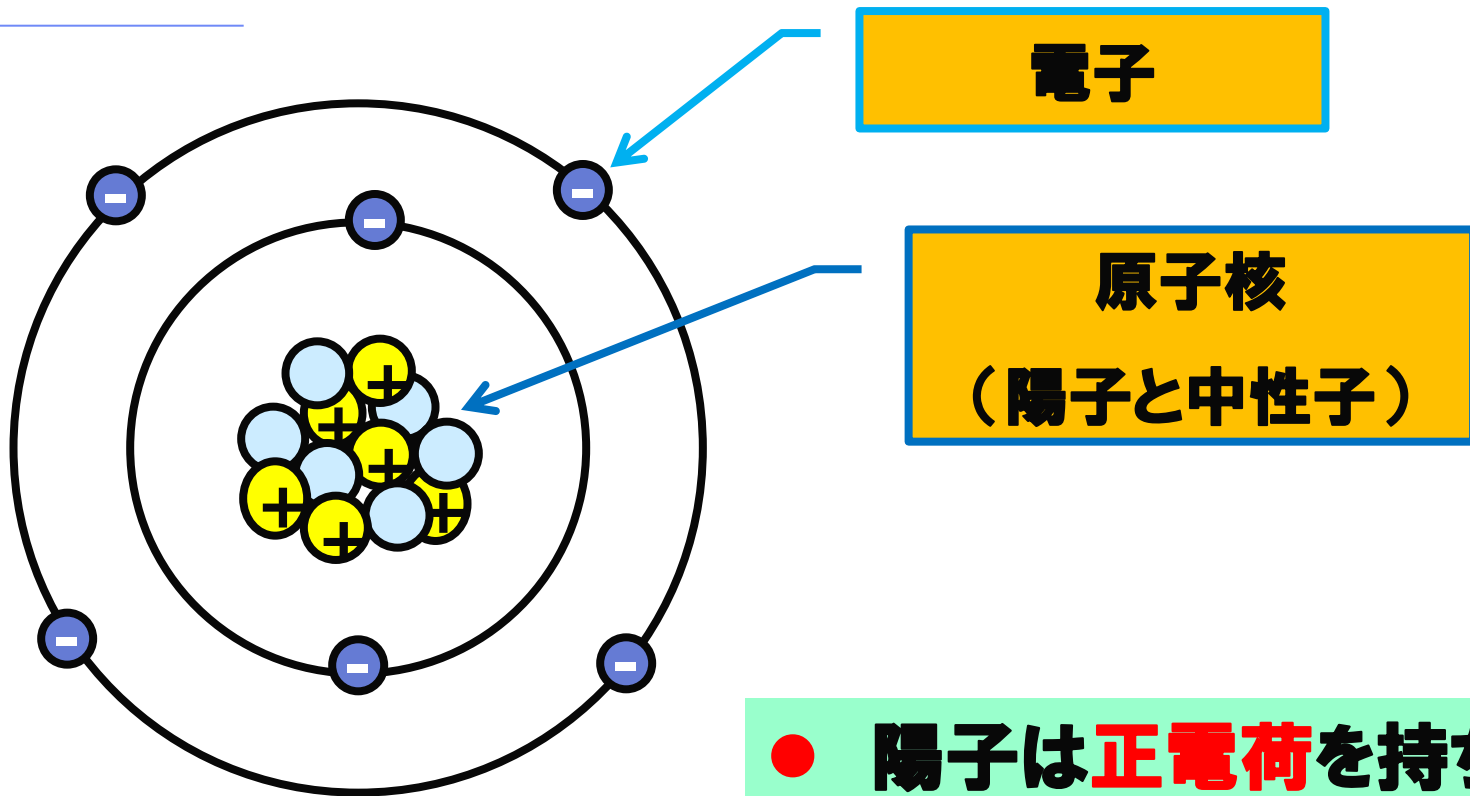
電気を運ぶもの

電流とは，“電子の移動”のこと

電気抵抗が低いとは，
“電子が動くことが容易である”こと



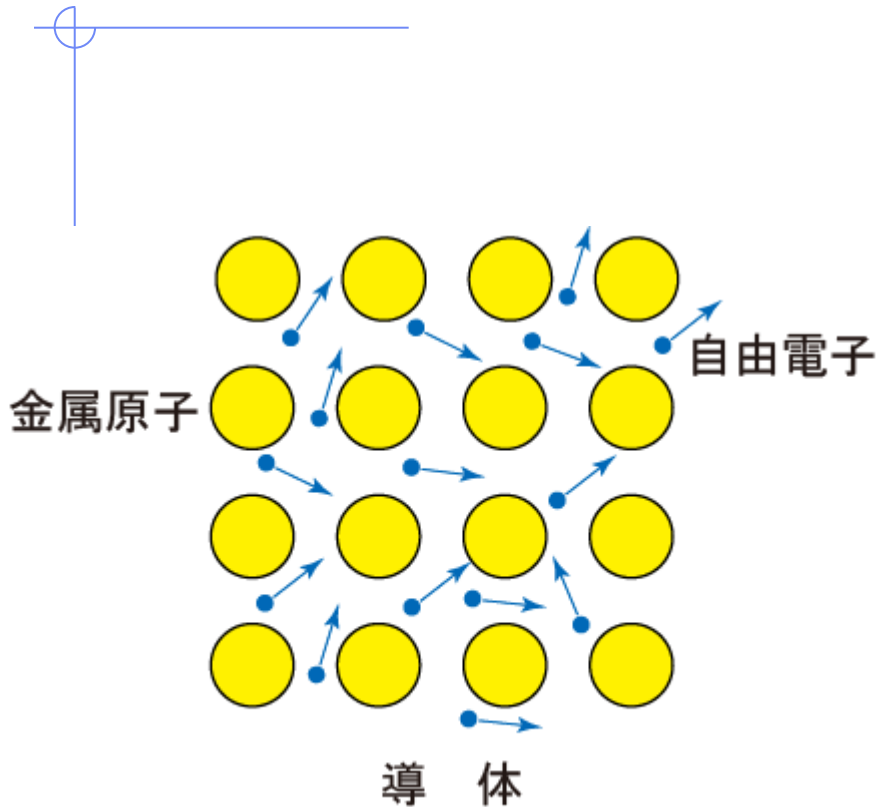
電子とは



原子構造例

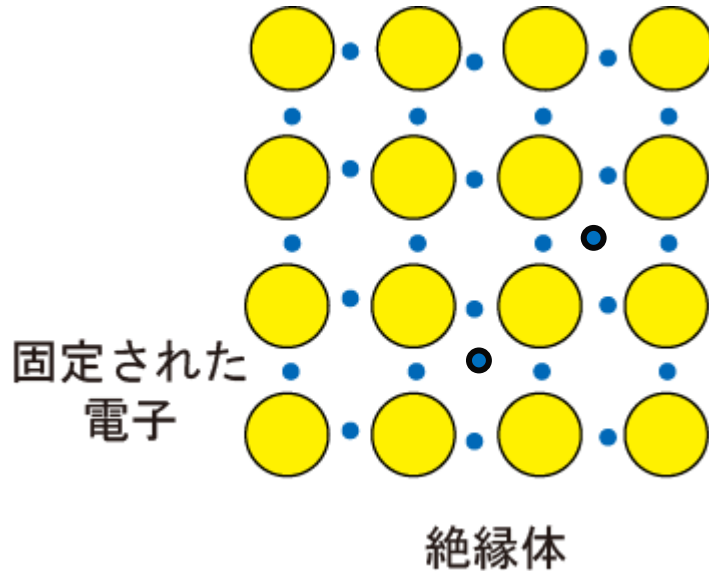
- 陽子は**正電荷**を持ち
- 電子は**負電荷**を持つ

金属は導体である



1. 銅などの金属は電気を通す。
2. それは電気を運ぶものが金属の中にあるからです。
3. 即ち自由に動ける電子がある。
4. これを自由電子という。
5. この自由電子があるために金属は電気を通すのです。
6. 導体とはこの自由電子の数が多いいものです。

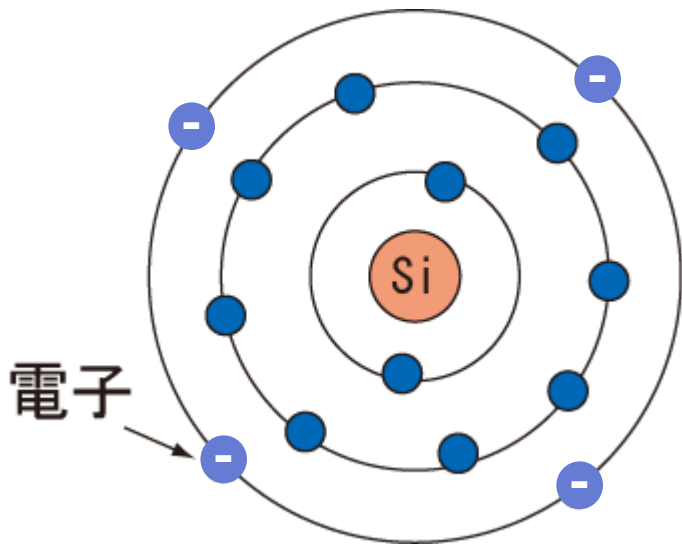
絶縁体, 半導体



1. しかし, ガラス, 陶器などの絶縁体ではこの自由電子がありません。
2. だから電流が流れないのです。
3. ただし, 半導体は, この自由電子が少しあります。
4. だから少し電流を流すのです。

半導体とは、導体と絶縁体の中間的な電気抵抗を示す物質である

半導体 シリコン

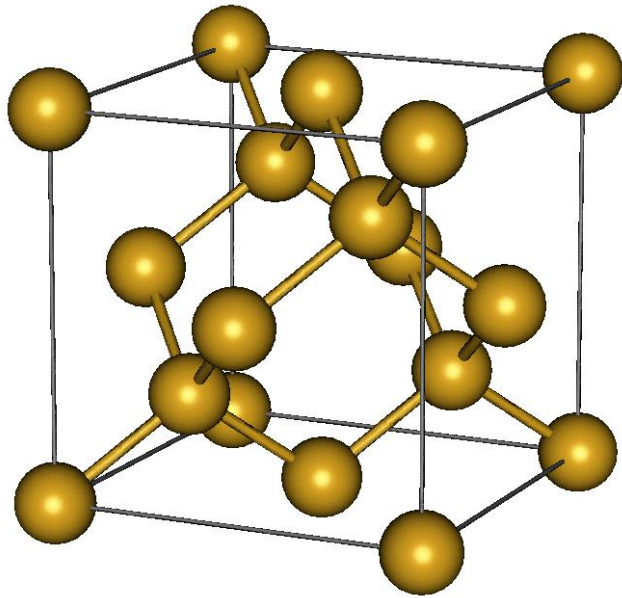


シリコン原子(Si)
原子番号:14

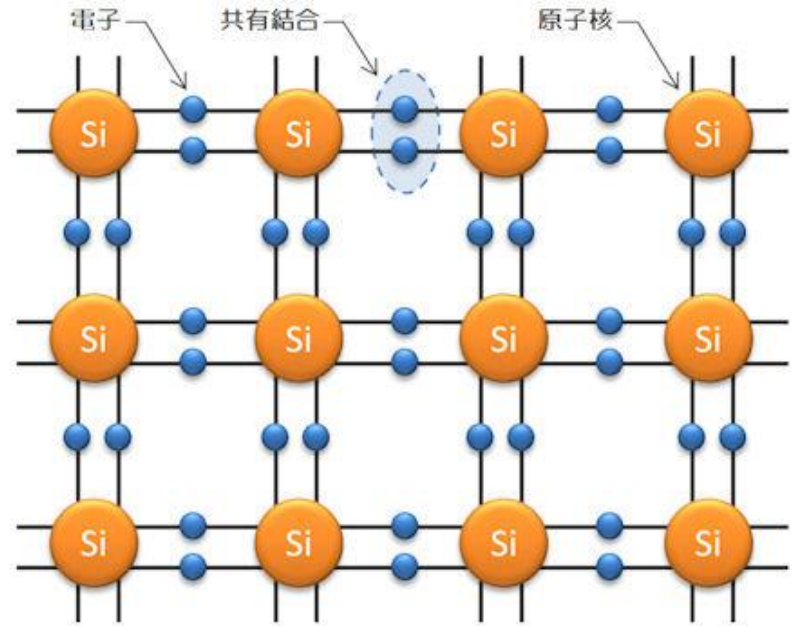
シリコン:
地球に最も多く含まれる
元素のひとつ。
珪素、硅素とも呼ばれる

最外殻の電子は4個

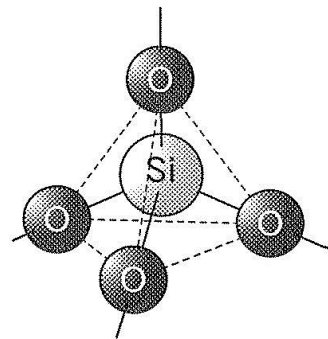
シリコンの結晶構造



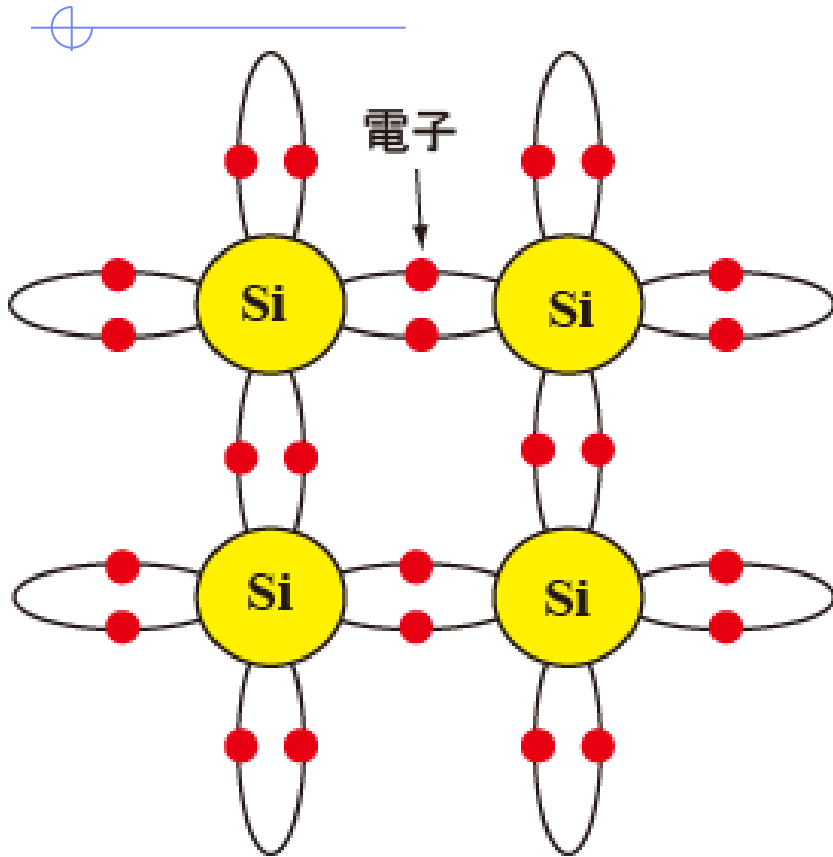
シリコンの結晶構造
正四面体構造



構造モデル



半導体シリコンは電気を通すか



シリコン結晶

結晶の原子同士の結合
に電子が使われる

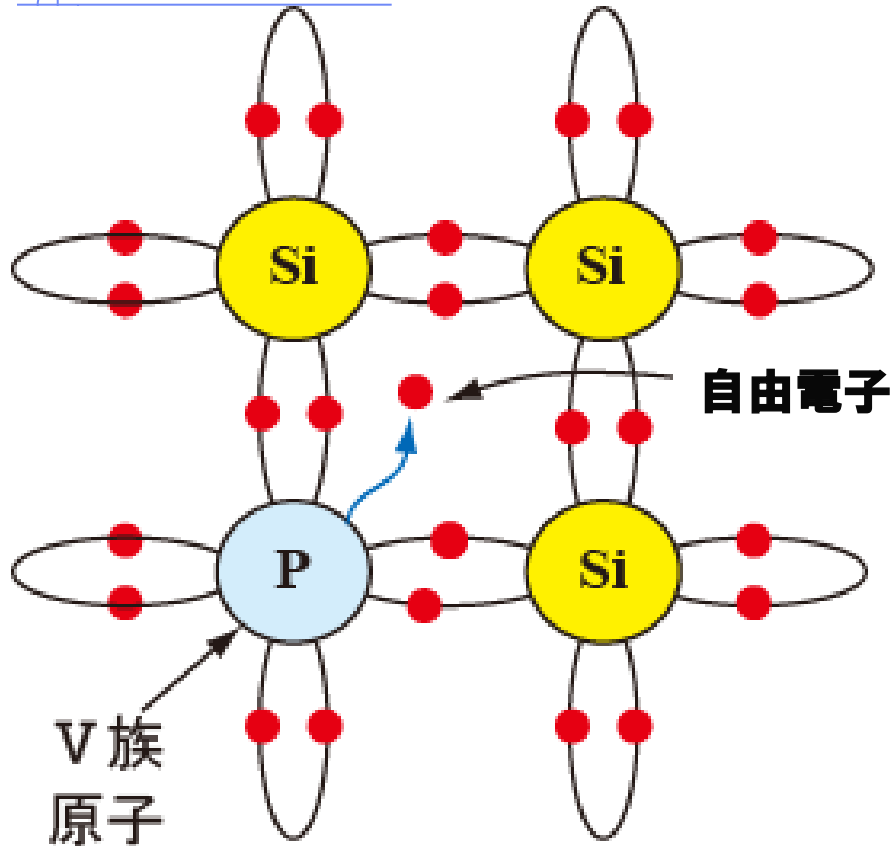


自由に動ける電子が無い



電気を通さない

n型半導体とは



n型半導体

Si(IV族)の中に、リン(P)、アンチモン(Sb)など、V族原子を入れる



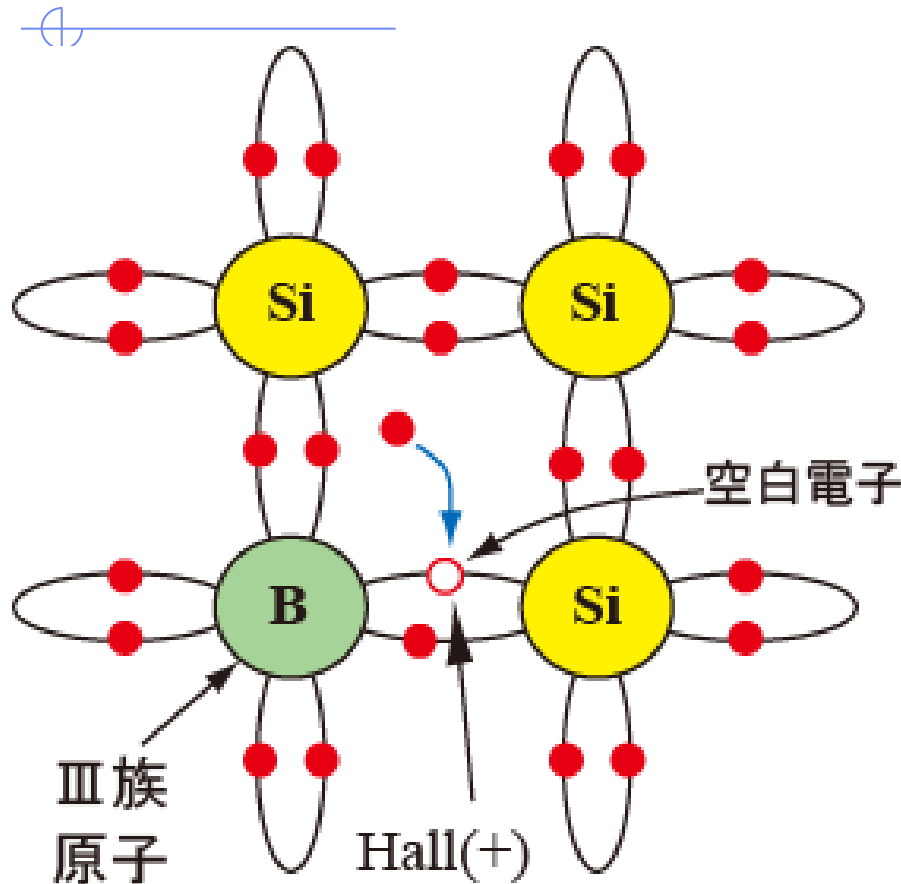
Si結晶の結合に使われず余った電子(自由電子)が生じる



この自由電子が移動することで電流が流れる

キャリア:電子
電荷:マイナス

p型半導体とは



p型半導体

Si(IV族)の中に、ホウ素(B)、インジウム(In)など、III族原子を入れる



Si結晶の結合で不足電子が生じる。これは電子の空席(孔)となる



この電子の空席(ホール, 正孔)が移動することで電流が流れる

キャリア:ホール(正孔)

電荷:プラス



n型, p型半導体のまとめ

n型: シリコン結晶中にある自由電子が移動することで電流が流れる。

p型: シリコン結晶中にある電子が抜けた孔 (ホール) が移動することで電流が流れる。

キャリア: 電流の担い手

n型: 電子。

電荷: マイナス

p型: ホール(正孔)。

電荷: プラス

シリコン単結晶製造



・99.9999999999%(イレブンナイン)の純度

半導体を用いた素子

■ ダイオード(整流)

- ✓ 発光ダイオード(LED)
- ✓ ツェナーダイオード(定電圧ダイオード)
- ✓ フォトダイオード

■ トランジスタ(増幅)

- ✓ フォトトランジスタ
- ✓ フォトカップラ, インタラプタ, リフレクタ

■ 電界効果トランジスタ(FET)

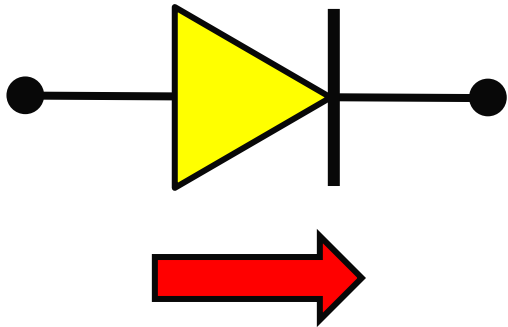
■ MOS型トランジスタ

■ 電力変換素子(サイリスタ等)

これらの半導体を利用した素子について説明する

半導体素子：ダイオード

- 一方向にのみ電流を流す特性がある。



電流の流れる方向



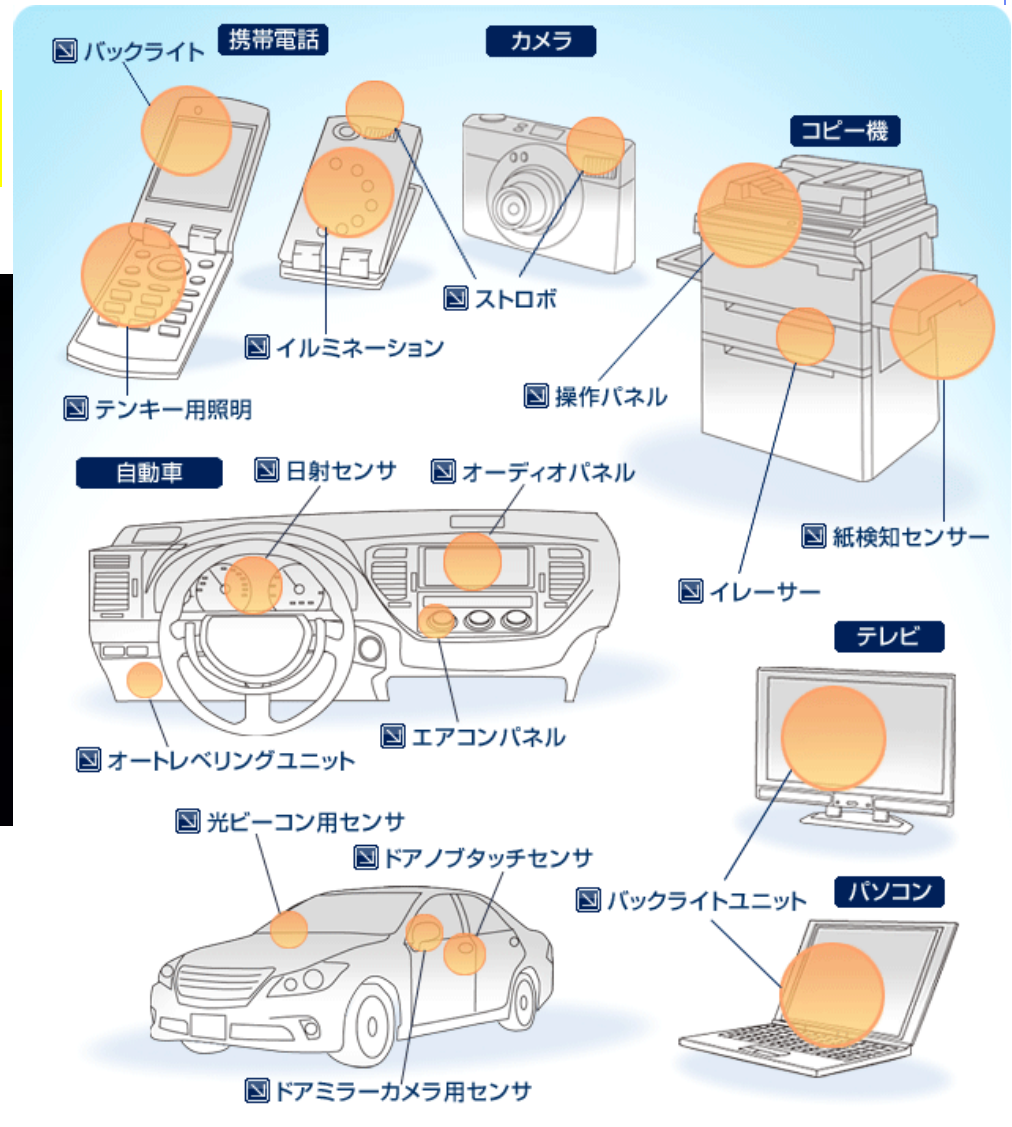
半導体素子：ダイオード

ダイオードは、電子回路の至る所に
利用されている

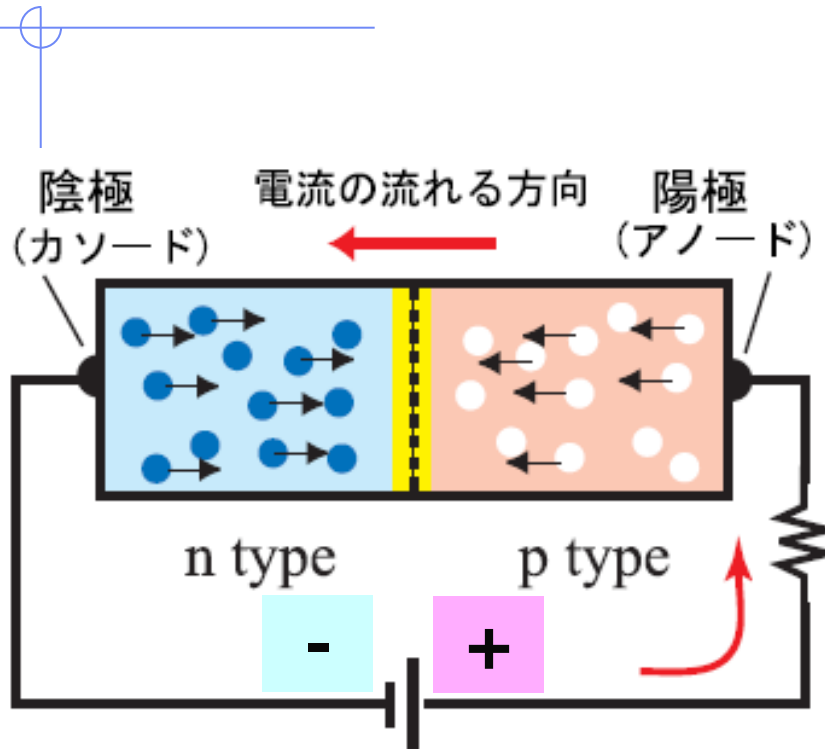


発光ダイオード(LED)

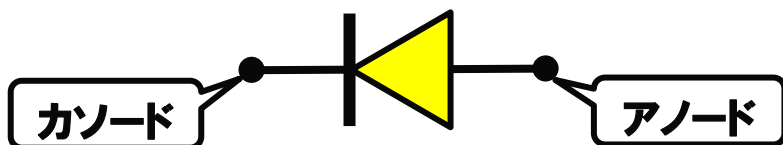
LEDもダイオードの仲間



ダイオードの動作原理1



(a) 順方向電圧



1. 陰極に外部からマイナス電圧を加えると、n 形半導体中の自由電子はマイナス電圧に反発して電極と反対方向の電極側へ移動する。

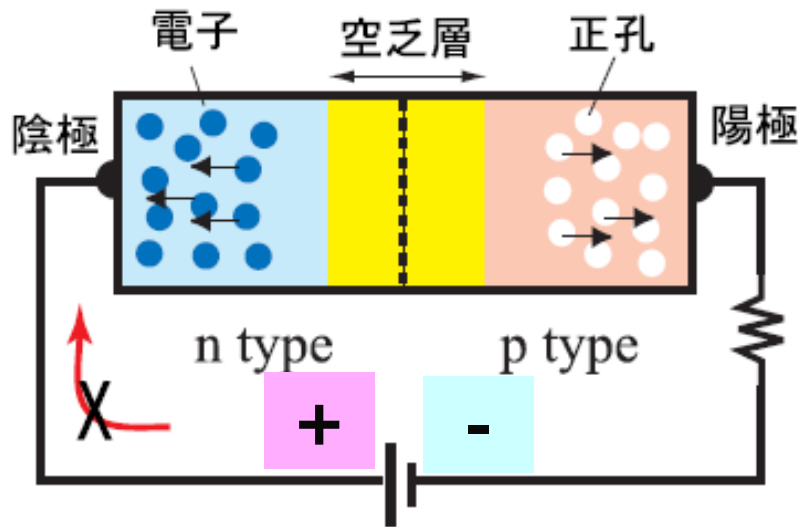
2. 陽極ではプラスの電圧が加わり、正孔は電圧に反発して電極と反対方向の電極側へ移動する。

3. 陰極と陽極から供給された、電子と正孔は、それぞれpn 接合部に向かい進み、接合部において結合し電子と正孔は消滅する。

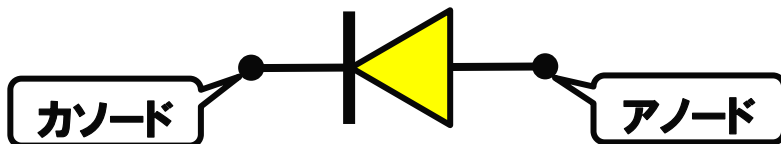
このような仕組みで電流が流れ続ける。

ダイオードの動作原理2

前図と逆電圧をかけると次のようになる。



(b) 逆方向電圧

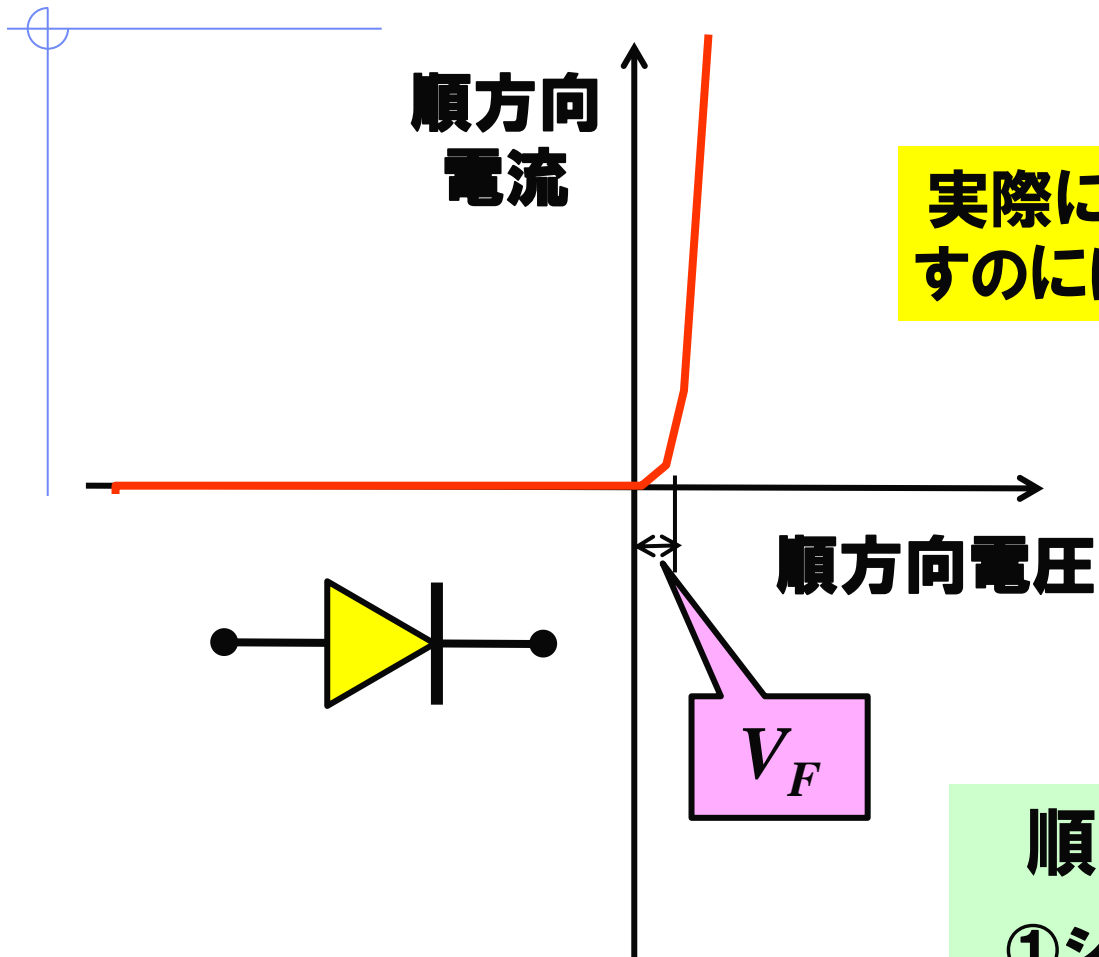


1. n 形半導体中の電子は陰極側へ、p 形半導体中の正孔は陽極側へと移動し、それぞれに分離する

2. すると電子、正孔のキャリアのない空乏層ができ、電流は接合面を通して定常的に流れることばない

このようにダイオードは電圧が逆方向の場合、電流が流れない特性を示す。

ダイオードの特性



実際には、順方向に電流を流すのには、電圧 V_F が必要です。

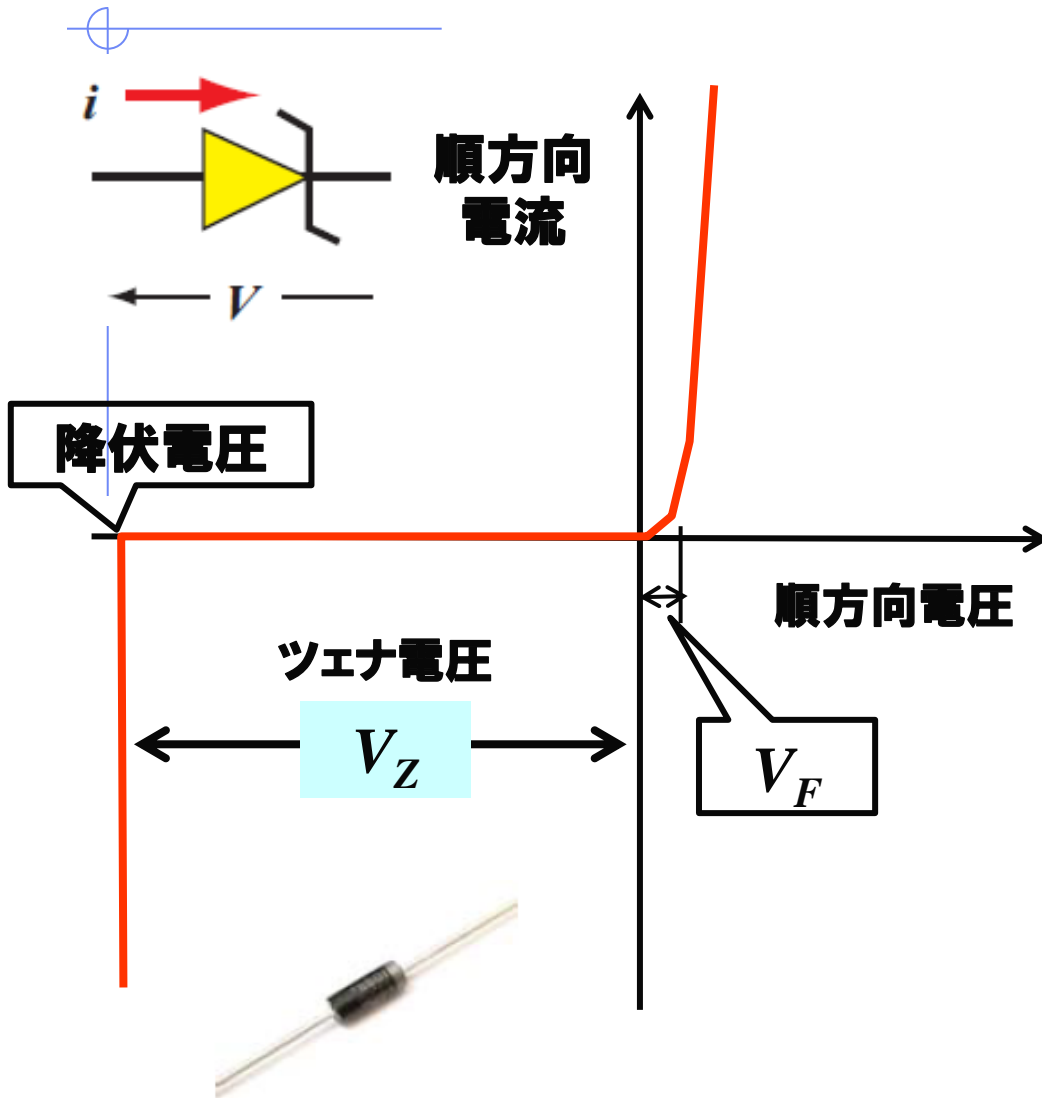
順方向電圧降下 V_F

- ①シリコン:0.6V~0.7V、
- ②ゲルマニウム:0.2V~0.3V

ダイオードの仲間

- ①ダイオード(通常)
- ②ツェナーダイオード
- ③発光ダイオード(LED)
- ④フォトダイオード

②ツェナーダイオード (定電圧ダイオード)



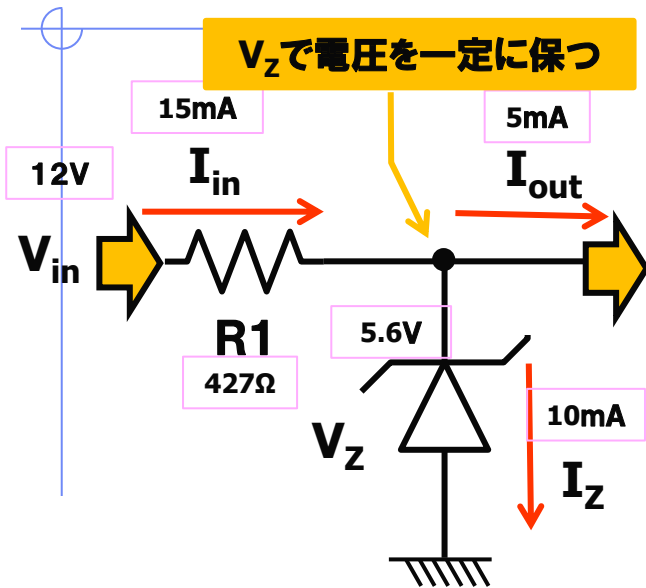
1. 逆方向電圧を増加させると、電圧値 V_Z で急激に電流が流れるようになる(ツェナ効果)

2. ツェナダイオードは、外部の負荷によって電流値が変化しても、そのダイオードに固有のツェナ電圧 V_Z はほぼ一定である

応用:

直流電源電圧の安定化、電圧制限用のリミッタ回路、また過電圧の吸収などに用いられる。

ツェナーダイオードによる定電圧電源回路例



例) 10-16V間で変動する入力電圧から安定した定電圧を得る回路

1. 出力電流 I_{out} とツェナー電流 I_z から抵抗 R_1 決める

$$R_1 = \frac{V_{in} - V_z}{I_{in}}, I_{in} = I_{out} + I_z$$

2. ツェナーダイオードの電力損失

最大損失は、出力電流がゼロとなった場合、全ての電流がツェナーダイオードに流れる

$$P_D = V_z \times I_z$$

$$P_{D(max)} = V_z \times I_{in}$$

設計例: 入力電圧12V, 出力電圧5.6V, 出力電流5mAの場合

$$R_1 = \frac{12 - 5.6}{0.015} = 426.7 \cong 427\Omega$$

$$P_{D(max)} = 5.6 \times 0.015 = 84mW$$

ここで、入力電圧が14Vに変動すると、出力電圧は変わらず、ツェナー電流が増加する

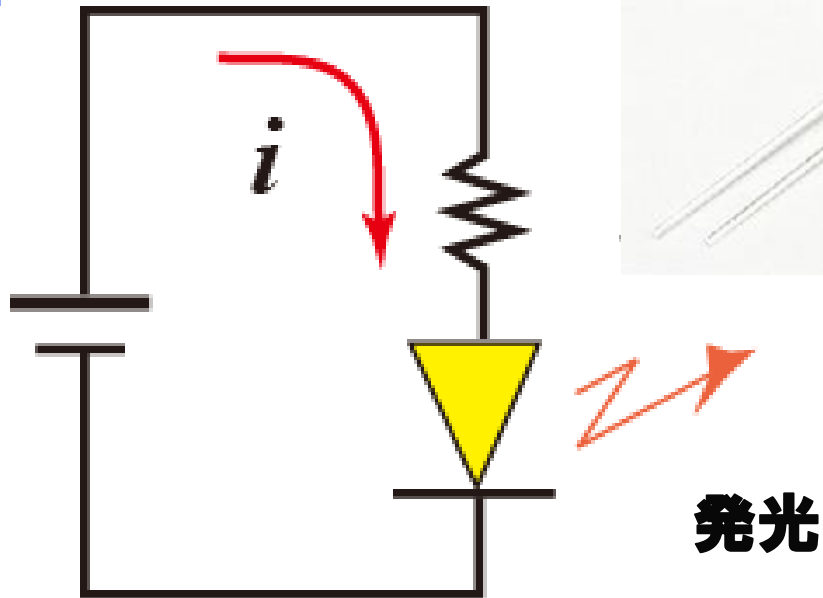
$$I_1 = \frac{16 - 5.6}{427} = 0.02436 \cong 24.4mA$$

$$P_{D(max)} = 5.6 \times 0.0244 = 137mW$$

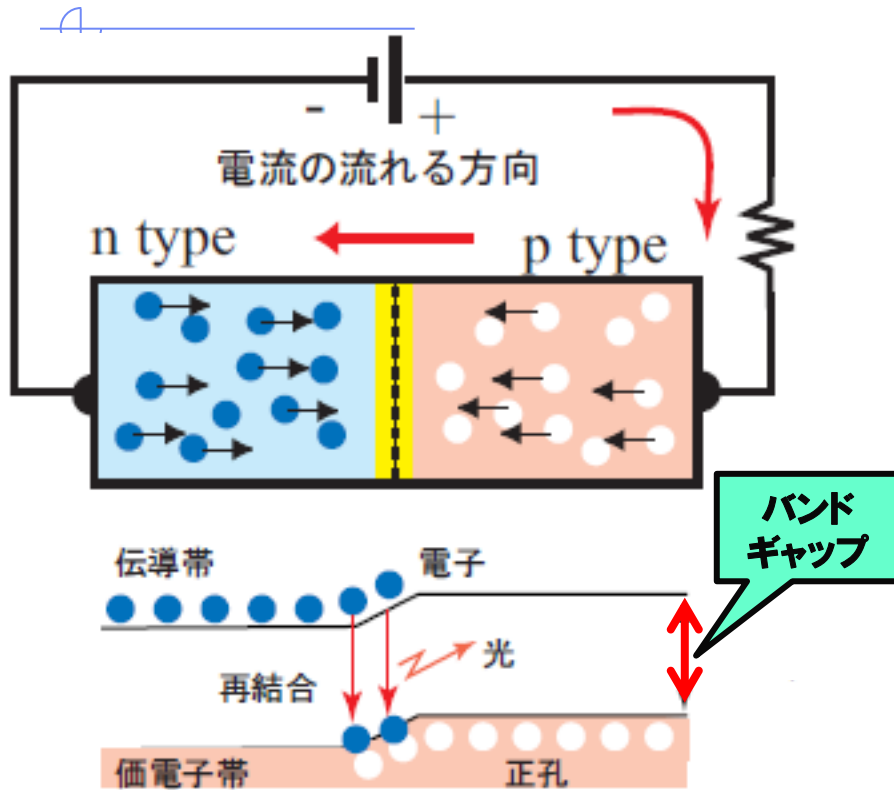
$$I_z = 24.4 - 5 = 19.4mA$$

③発光ダイオード(LED)

- ダイオードの順方向に電圧を加えたときに流れる電流により発光する。
- LED(Light Emitting Diode)と略記する



発光ダイオード(LED)



電子と正孔の再結合のエネルギーが光として放出される。

1. 下図に示すように電子と正孔は、異なったエネルギー帯(伝導帯と価電子帯)を流れ、PN 接合部付近で再結合する。

2. 再結合時に、禁制帯幅(バンドギャップ)にほぼ相当するエネルギーが光として放出される。

3. 放出される光の波長は材料のバンドギャップによって決まる。バンドギャップが大きくなるにつれ、赤外、赤、緑、青と発光色が違ってくる。

バンド
ギャップ

光エネ
ルギ

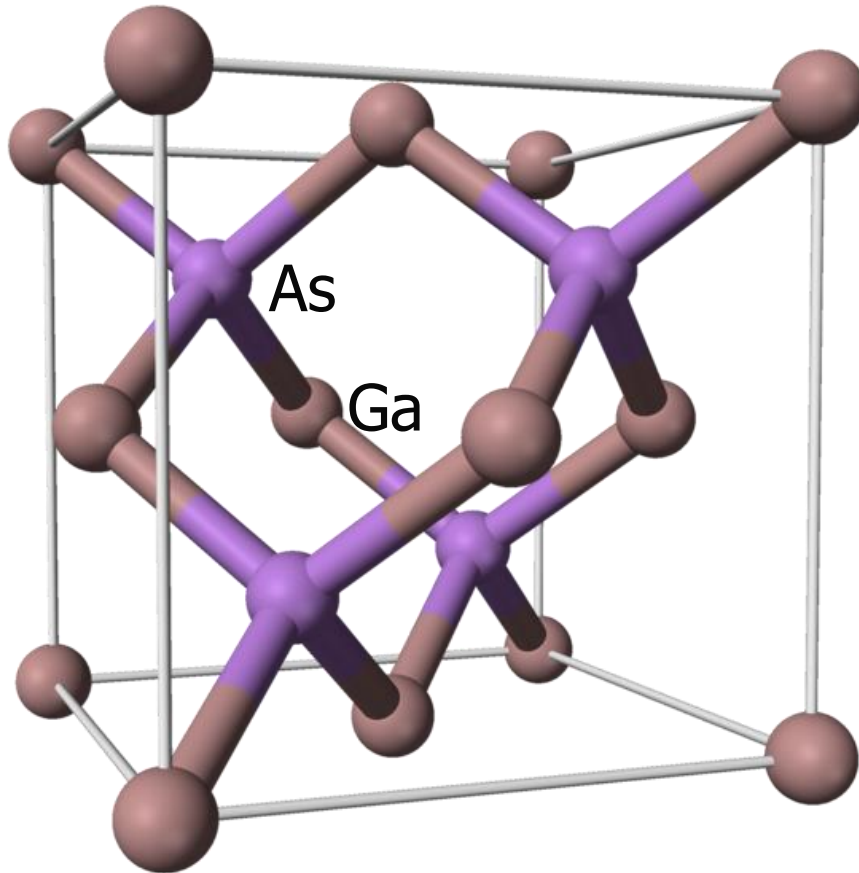
$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

光速

波長

プランク定数

化合物半導体 1



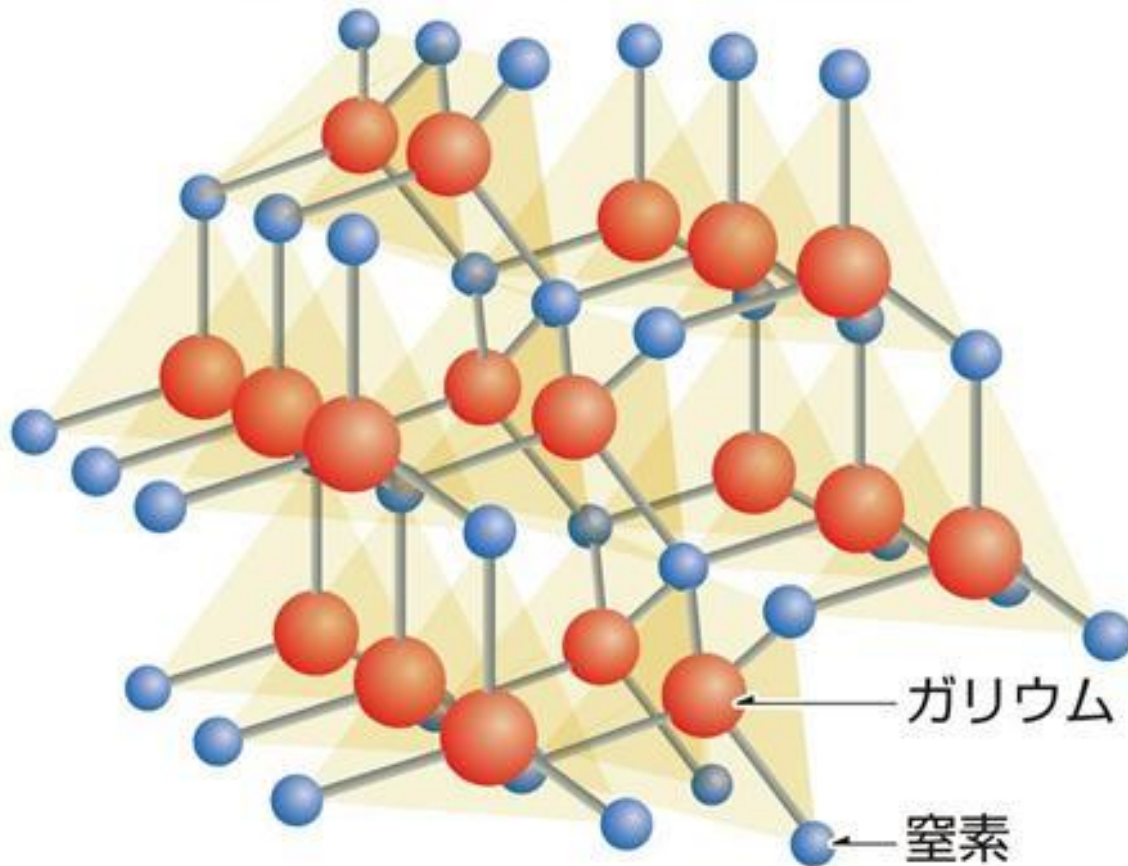
ガリウムヒ素 GaAs

**2, 3種類の元素の
化合物で半導体の
特性を示すもの**

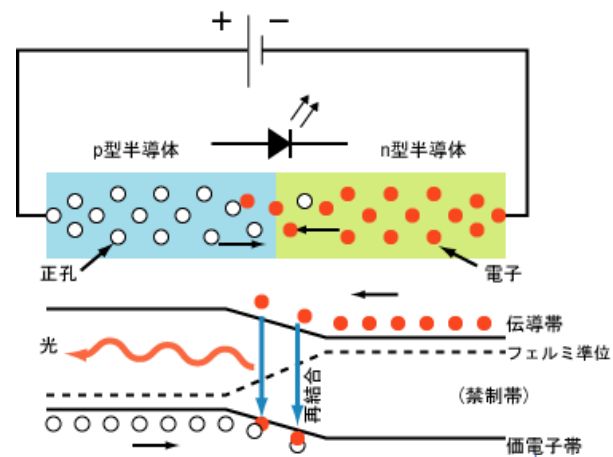
**1.43 eV のバンドギャップ
を持つIII-V族半導体**

化合物半導体2

窒化ガリウムの結晶構造



青色LED



発光ダイオード(LED) 特性

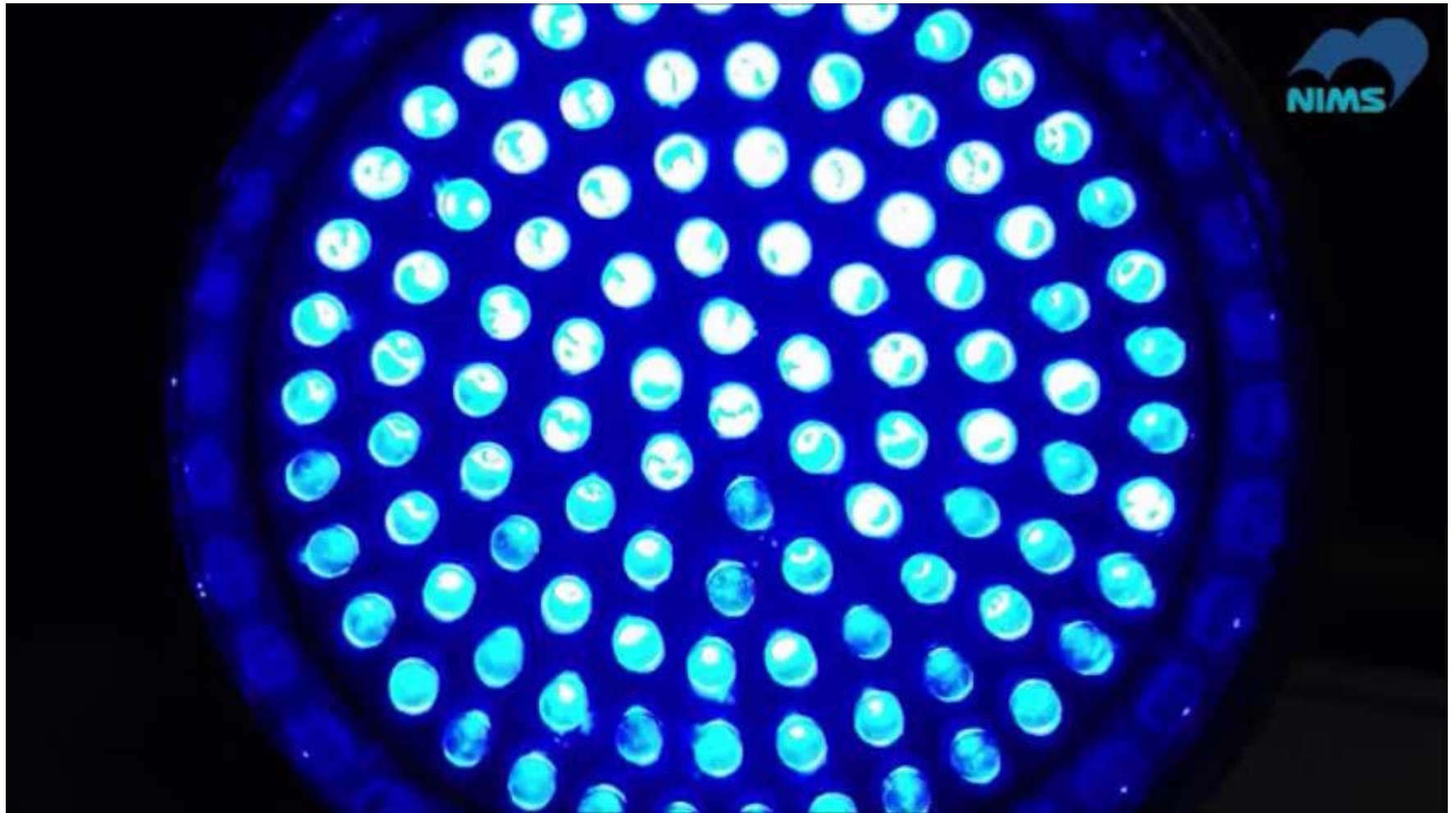
順方向電圧降下(V_F)は、発光色によって違う。

- 赤色・橙色・黄色・緑色: $2.1V$ 程度
- 白色・青色: $3.5V$ 程度

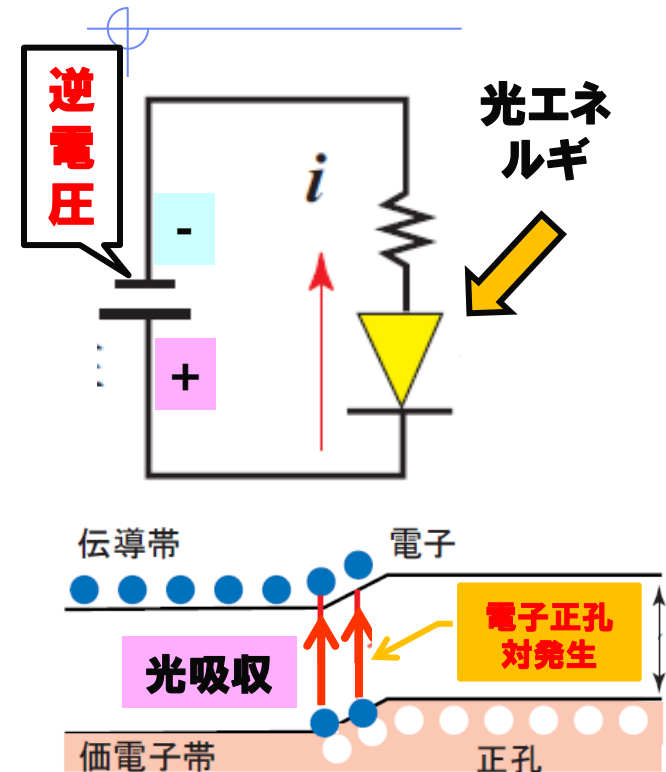
光の特性

1. 不要な紫外線や赤外線を含まない
 - 紫外線に敏感な文化財や芸術作品や、
 - 熱照射を嫌う物の照明に用いられる
2. 光出力の応答が早い
 - 通信などに利用される

蛍光物質と青色LED



④ フォトダイオード (光の検出に用いられる)



フォトダイオードに図に示すように逆バイアス電圧を加え、光を当てると電流が流れる。

逆バイアス電圧を加えると電子、正孔がダイオードの両極に集まり、接合部近傍にはキャリアが存在しない空乏層ができる。このため電気が流れない。

しかしながら光が当たると、結合する電子をはじき自由電子を生成する。

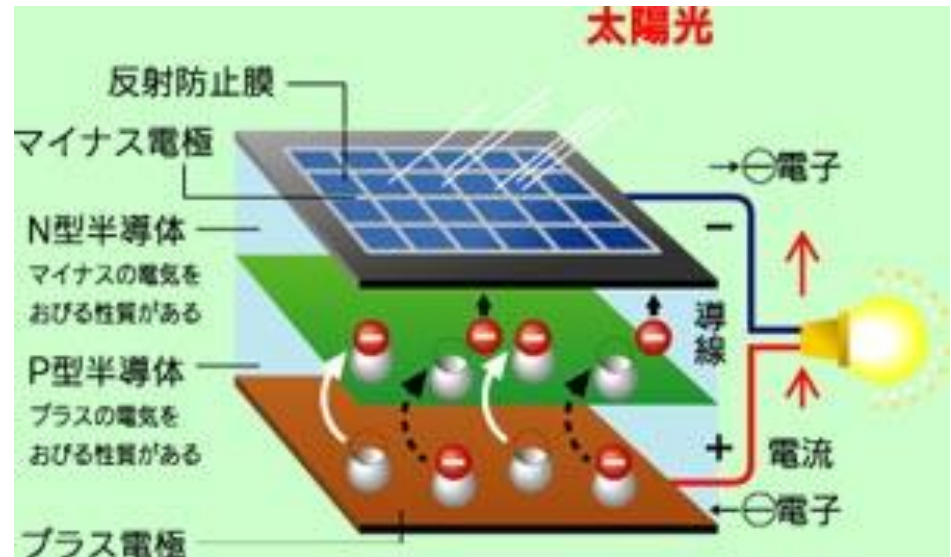
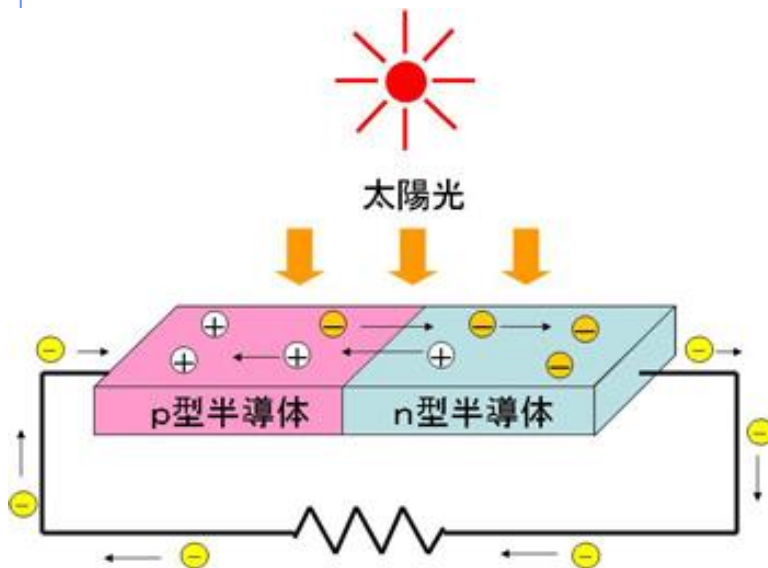
このとき電子が飛び出た後が正孔となる。すなわち光のエネルギーにより電子と正孔の対が生じる。この対で生成した電子はプラス方向に流れ、正孔はマイナス方向に流れ、LEDの逆方向に電流が流れることになる。

応用

- フォトダイオードに流れる電流は、光強度の増加に比例して増加するので直線性の良い光検出器となる。
- このため、CCD、コンパクトディスクプレイヤー等の光検出器に使用される。
- このほか、高速であるため、光通信システムや光制御に利用される。

太陽電池(シリコン系)

太陽電池に太陽の光が当たると、電子(-)と正孔(+)が発生し、表面と裏面につけた電極に電球のような負荷をつなぐと電流が流れ出す。



トランジスタ

1. トランジスタ

➤ 原理

➤ 動作

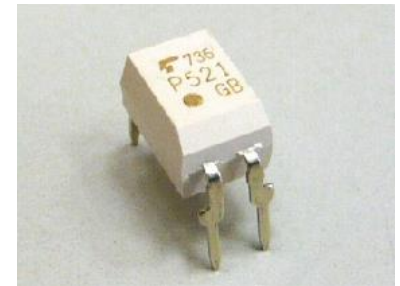
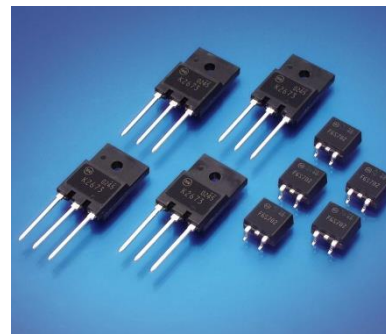
➤ フォトトランジスタ, フォトカプラ, フォトインタラプタ



2. 電界効果トランジスタ

➤ MOS型FET

➤ 接合型FET



半導体:トランジスタ

電流の増幅を行う, スイッチ動作を行う, 半導体素子
1947-1948年の、ベル研究所による発見および発明
1956年のノーベル物理学賞

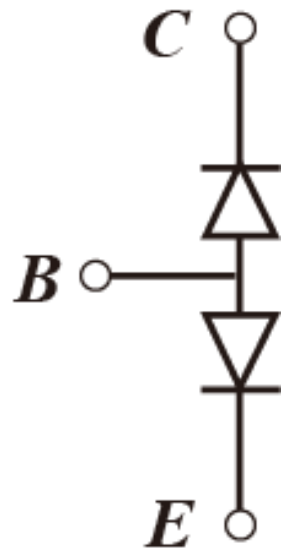


1947年12月23日に発明された
最初のトランジスタ(複製品)

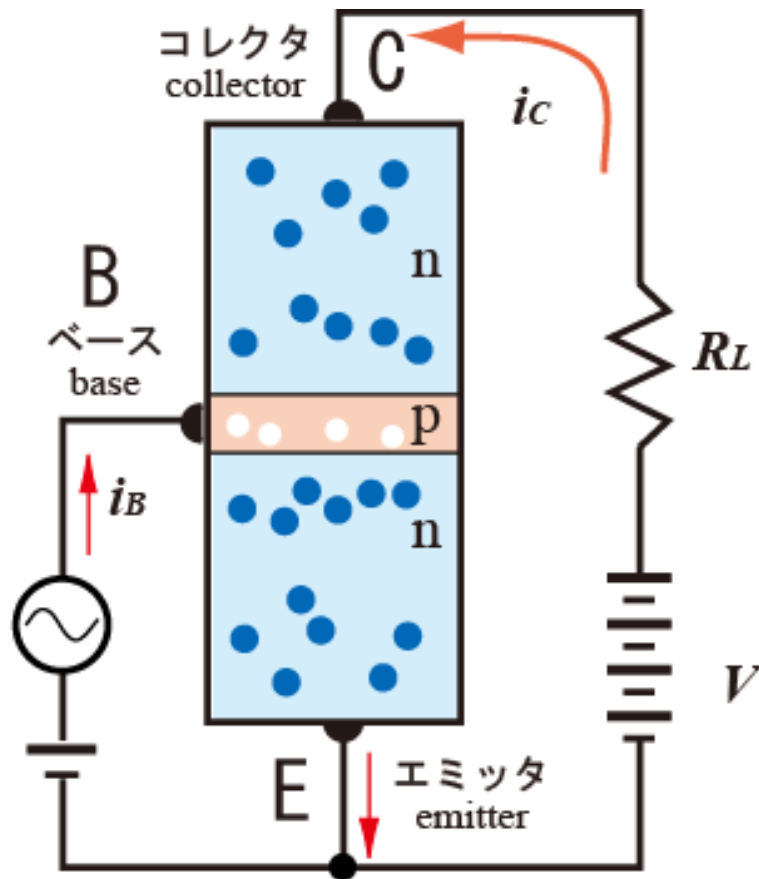


現在利用されているもの

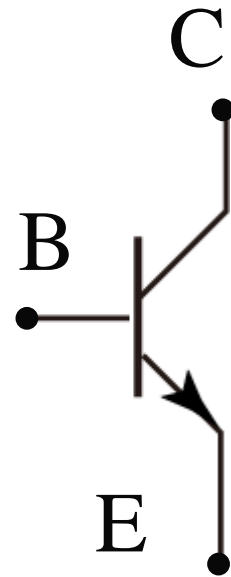
トランジスタの原理1



ダイオードが2つ
組み合わせさ
ったもの??

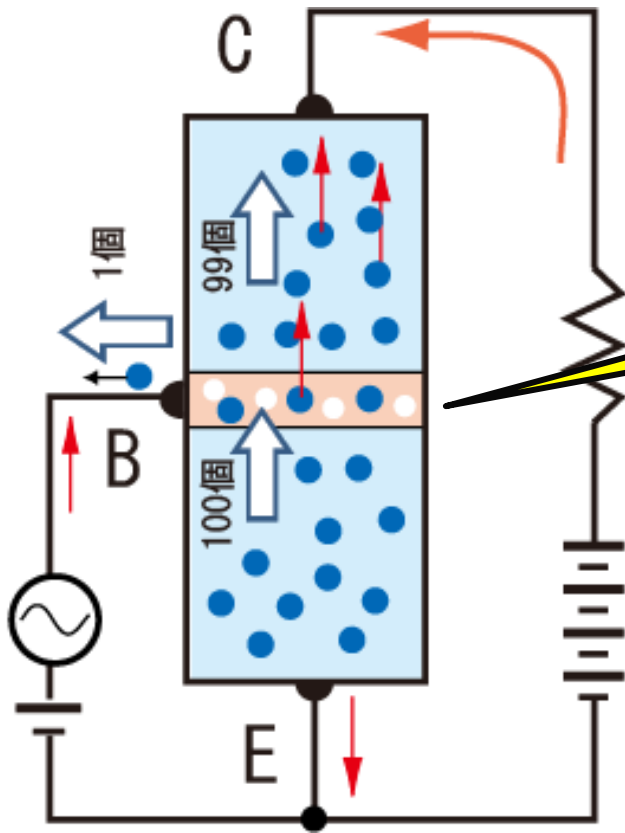


トランジスタの構造



回路図での記号

トランジスタの原理2



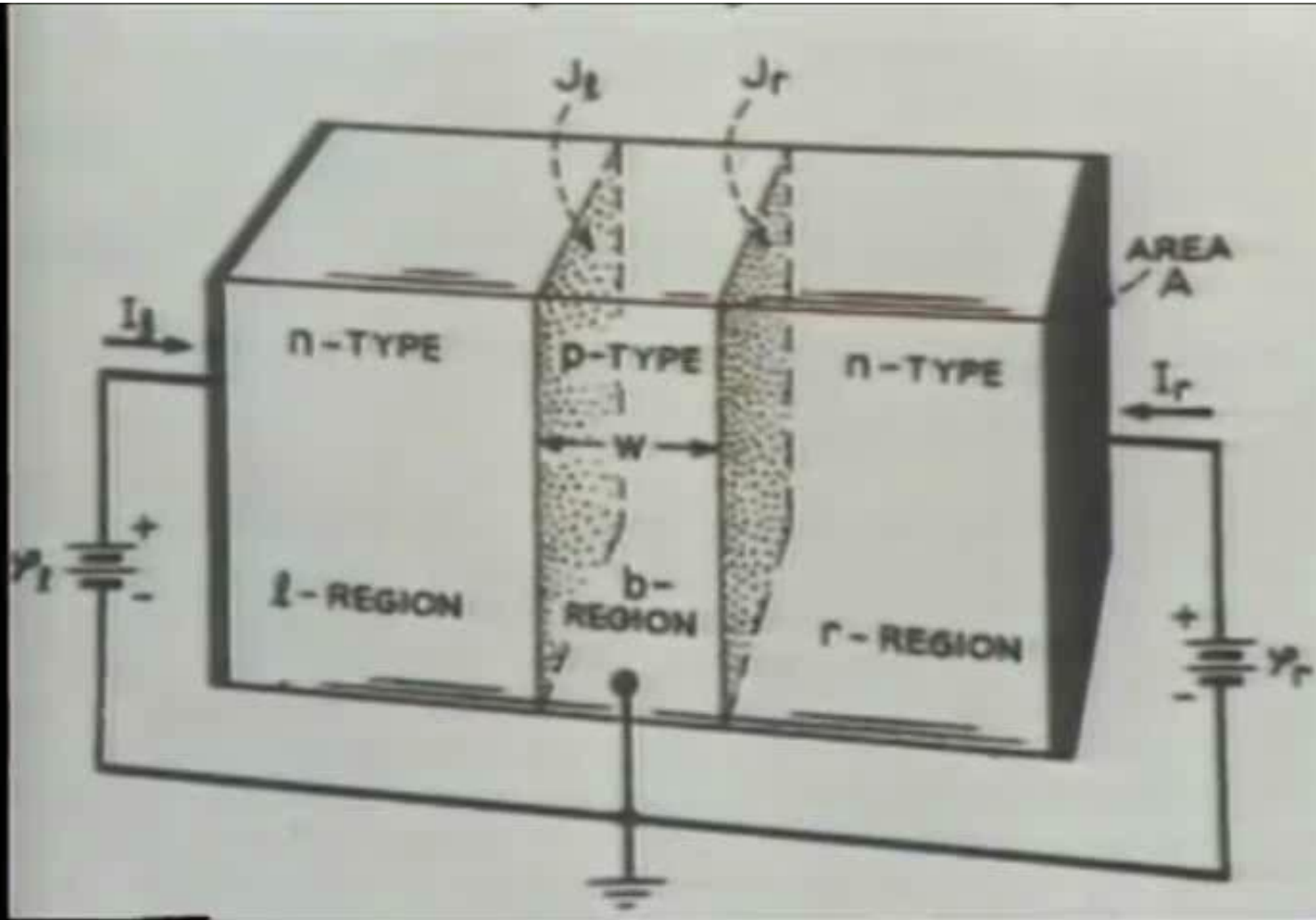
1. ベースがとても薄い
2. 電子が正孔と結合せず、突き抜けるのが多数となる

3. 例えば左図では、ベース電流とコレクタ電流の比は99となる

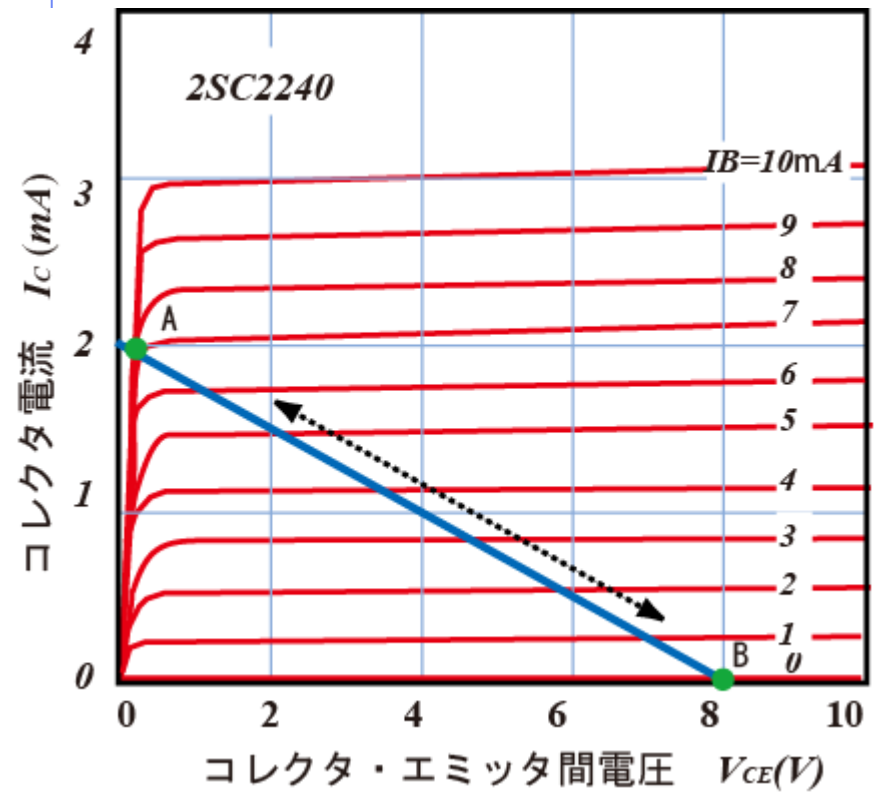
4. 即ち、ベース電流の僅かな電流変化は、コレクタ電流の大きな変化である

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

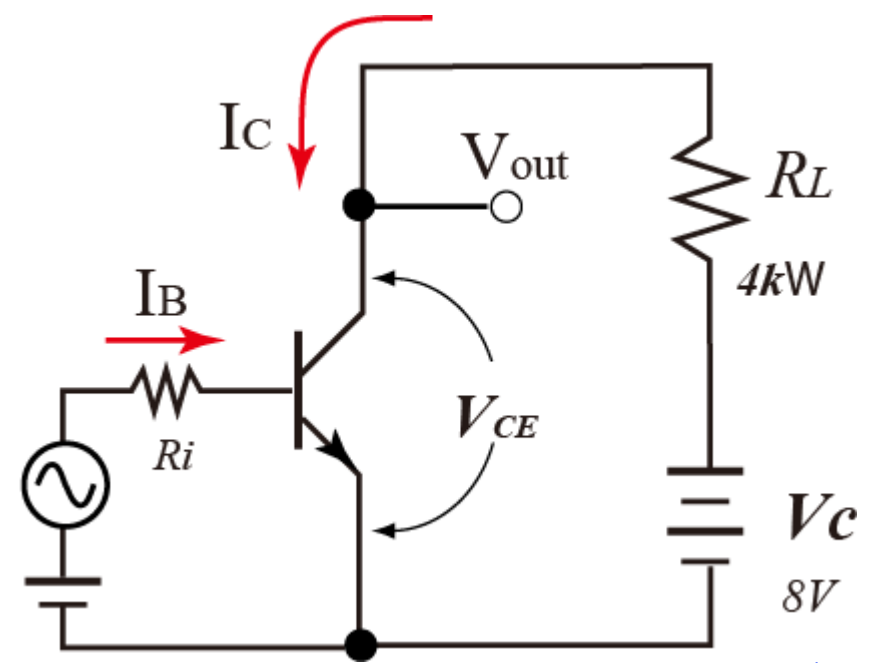
電流増幅率



トランジスタの動作



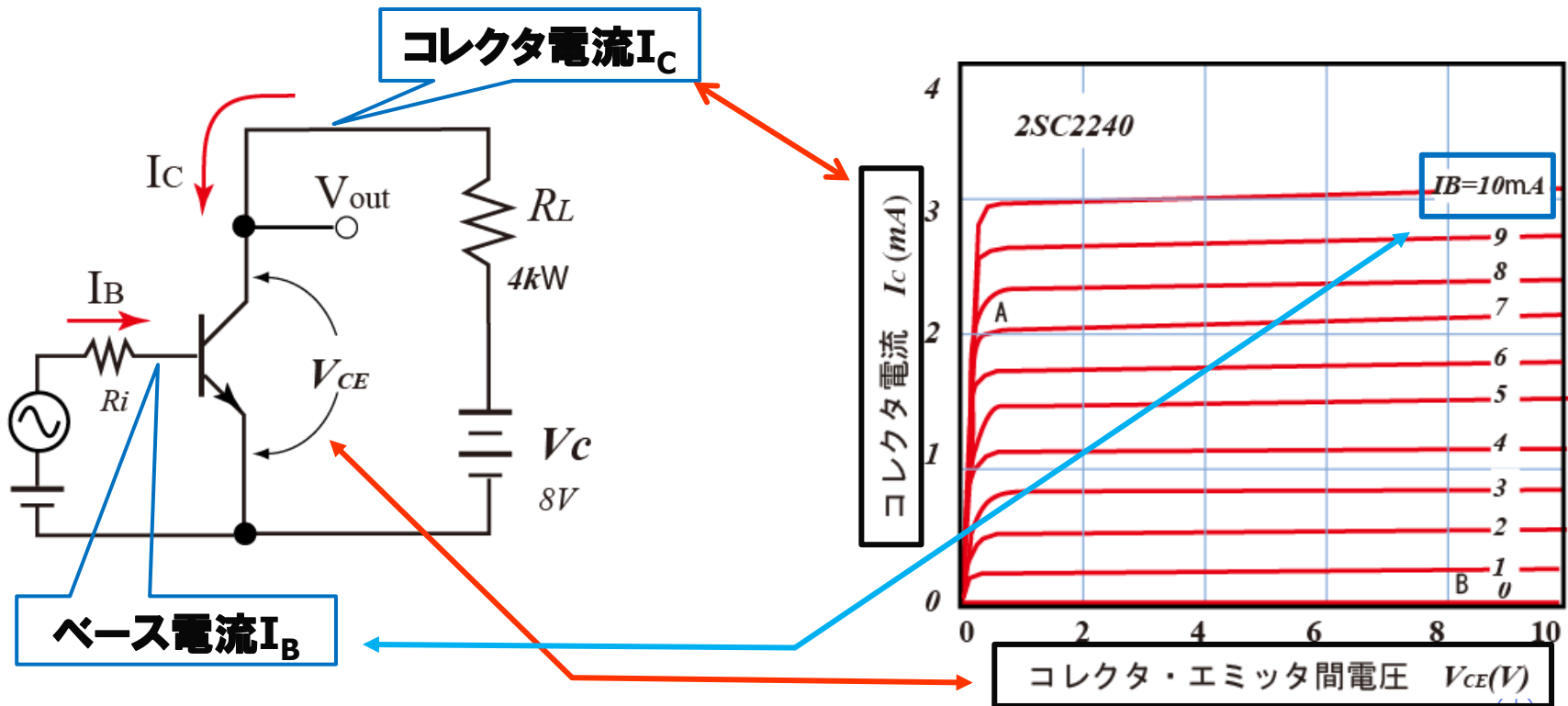
トランジスタ特性



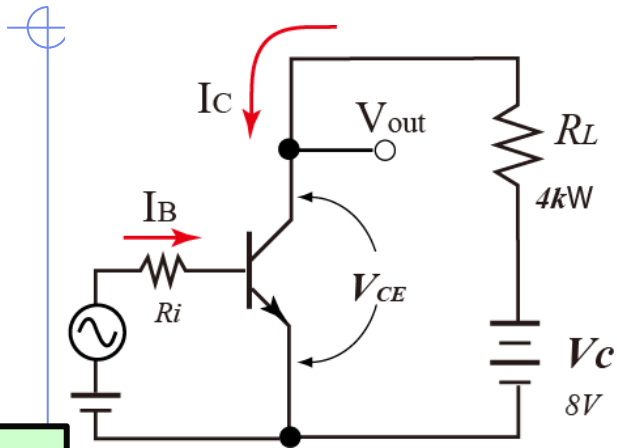
トランジスタ回路

トランジスタ増幅器としての動作1

1. まず、トランジスタの特性である V_{CE} と I_C との関係は、ベース電流 I_B をパラメータに図の赤線のように表せる。 I_B の増加に伴い異なる曲線となる。またこの特性はトランジスタの種類毎に変わるものである。

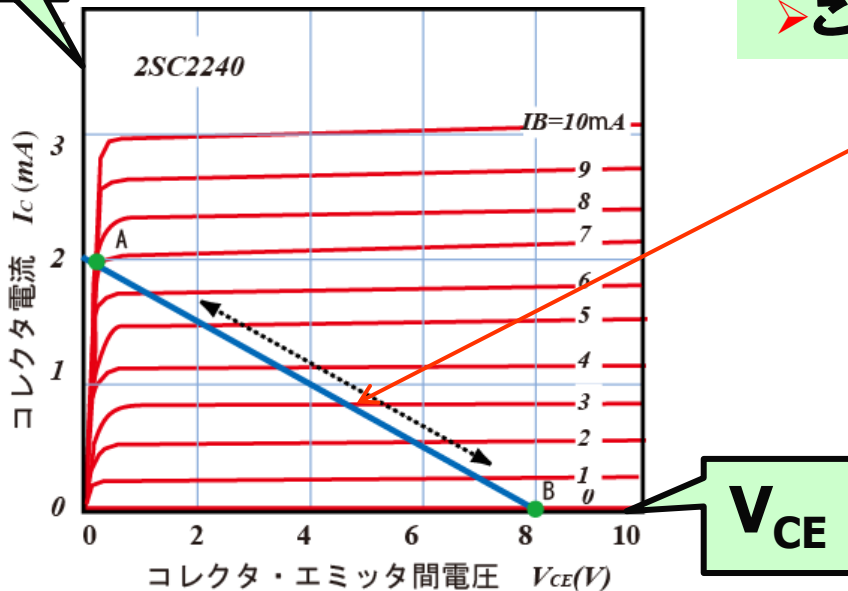


トランジスタ増幅器としての動作2



2. 次に、トランジスタのコレクタとエミッタを接続したループ回路は、次式を満たす必要がある。これはキルヒホッフの電圧則で、電流 I_C と負荷抵抗 R_L および電源電圧 V_C から導かれる。

- 式は下図の青線で示す直線であり、このトランジスタ回路の動作点はこの青線で示す直線上に存在しなければならない。
- この直線を**負荷直線**と呼ぶ。

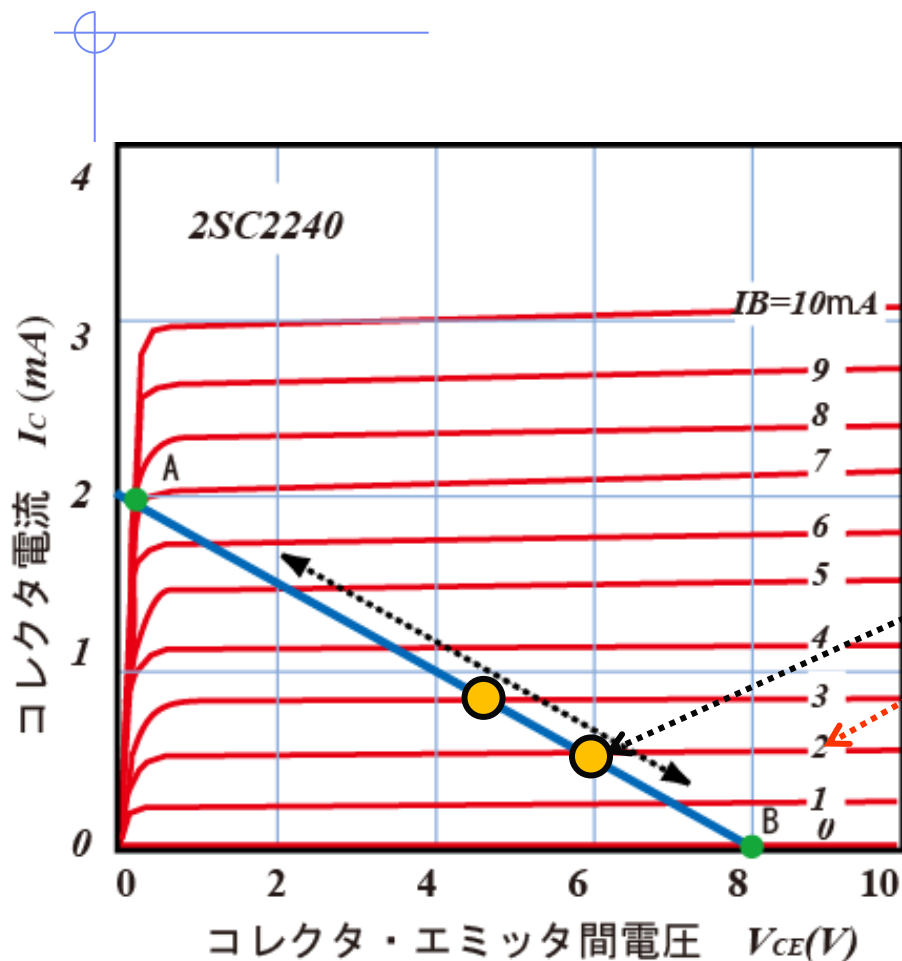


$$V_C = R_L I_C + V_{CE}$$



$$I_C = -\frac{1}{R_L} V_{CE} + \frac{1}{R_L} V_C$$

トランジスタ増幅器としての動作3



3. よって、トランジスタの特性(赤)と負荷曲線(青), 2つの関係を満足する必要がある。

4. このため、ベース電流 I_B を決めると、この回路の動作点は、図の赤線と青線の交点となる。(例えば、 $I_B = 2\mu\text{A}$ の時、その交点は $V_{CE} = 6\text{V}$ となる)

5. また $I_B = 3\mu\text{A}$ の時その交点は $V_{CE} = 4.5\text{V}$ 程度となる。この例のように $I_B = 1\mu\text{A}$ の変化が $V_{CE} = 1.5\text{V}$ 程度の変化となる

6. これはベースに接続した抵抗を $R_i = 10\text{k}\Omega$ とすると $I_B = 1\mu\text{A}$ の変化を起こすための電圧変化は 10mV となり、電圧の増幅度からすると $1.5/0.01 = 150$ 倍の電圧増幅度となる

トランジスタ命名法

1. これまでは **npn** 型のトランジスタの構造について説明した。
2. 同様に **pnp** 型の構造でも同じような機能を発揮する。
3. ただし、npn 型とpnp 型では電圧と電流の方向が逆転する。
4. このnpn 型とpnp 型とを区別するため、表3.1 に示す命名法が決められている。

表 3.1: トランジスタ命名法

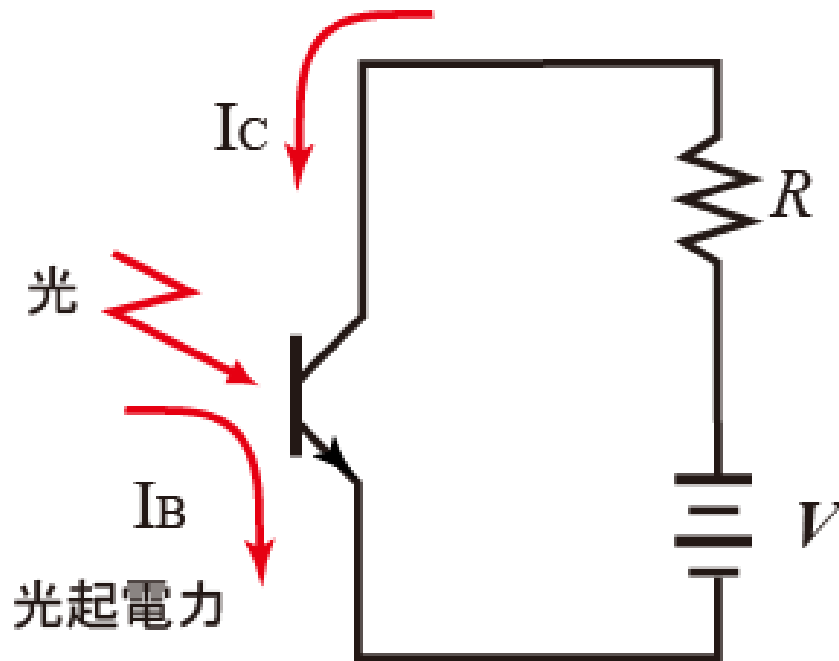
用途	PNP 型	NPN 型
高周波用	2SA ○○○	2SC ○○○
低周波用	2SB ○○○	2SD ○○○

トランジスタの仲間と応用素子

- ①トランジスタ(通常)
- ②フォトトランジスタ
- ③フォトカップラ(応用)
- ④フォトインタラプタ(応用)
- ⑤フォトリフレクタ(応用)

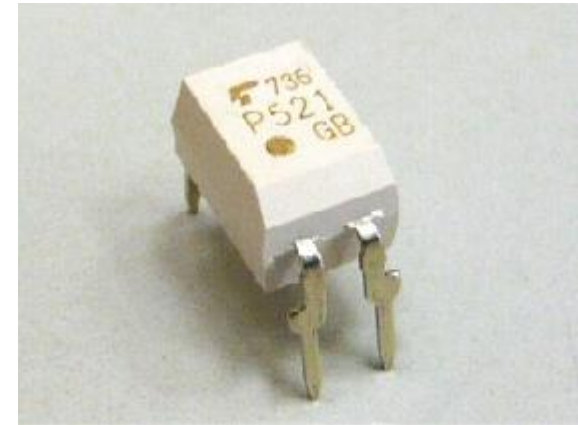
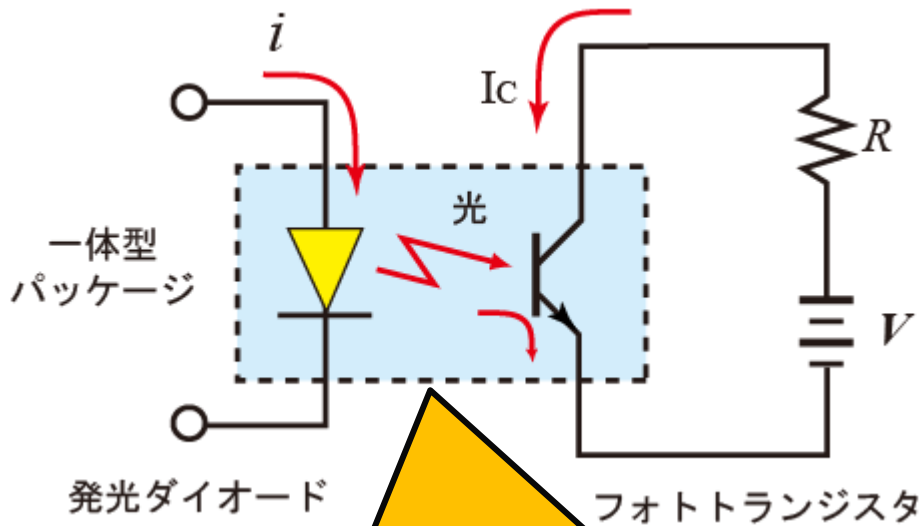
② フォトトランジスタ

光を当てることによる光起電力によって
ベース電流を制御するトランジスタ



③ フォトカップラ

発光ダイオードとフォトランジスタを**対向**させ、光を介して信号を伝達する素子

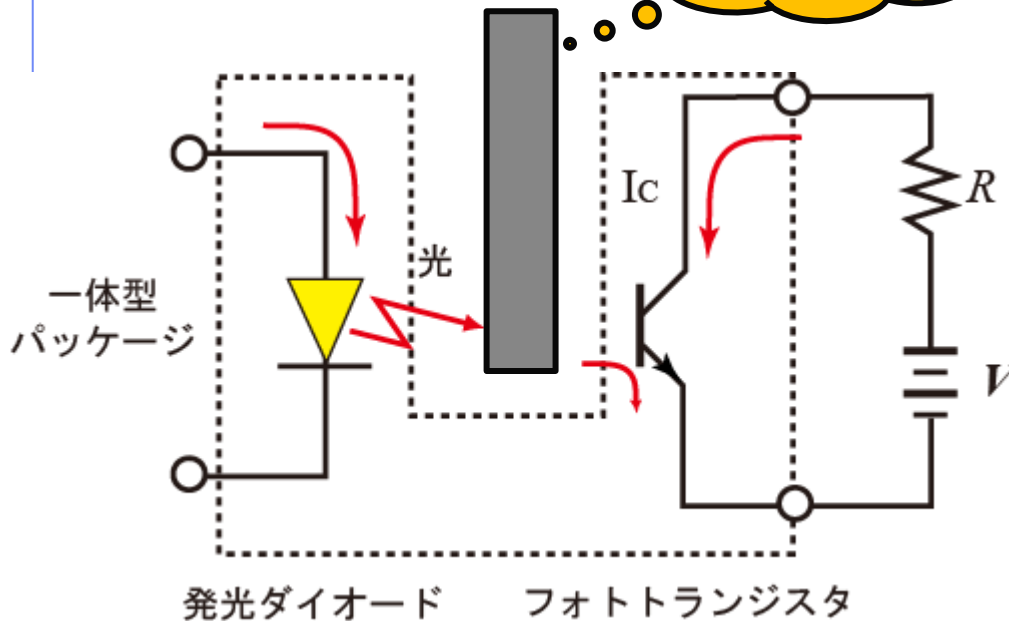


1. 光による信号伝達が可能
2. 回路間は電気的には絶縁されている

④ フォトインターラプタ

発光ダイオードとフォトランジスタを対向して配置させ、この間に物体が入ると光を遮断するため、**物体の検知を行う素子**

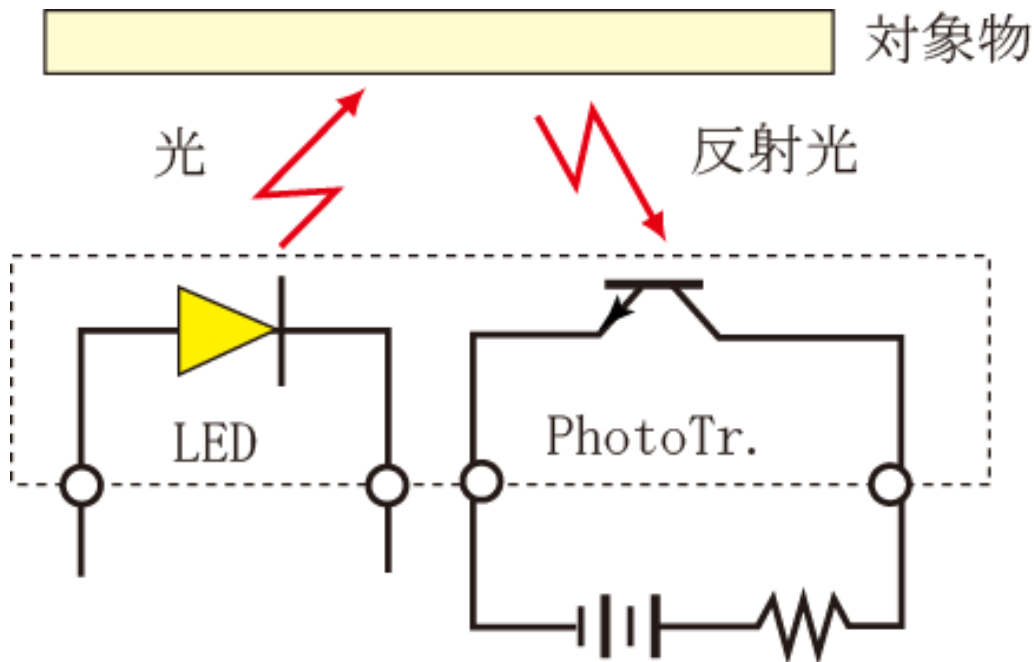
遮蔽物



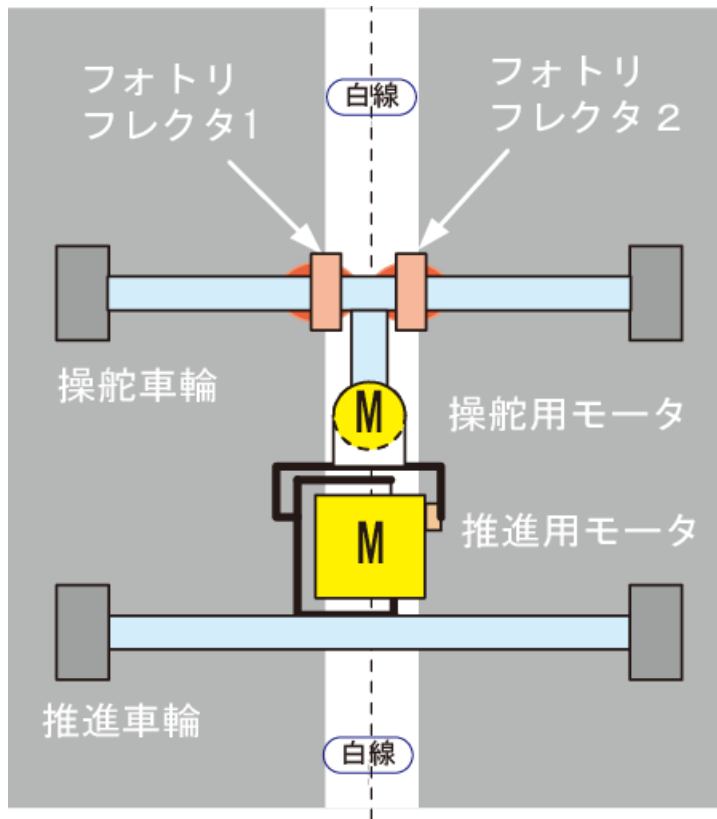
⑤ フォトリフレクター

LED を発光，物体からの反射光の光量をフォトランジスタで検出する。

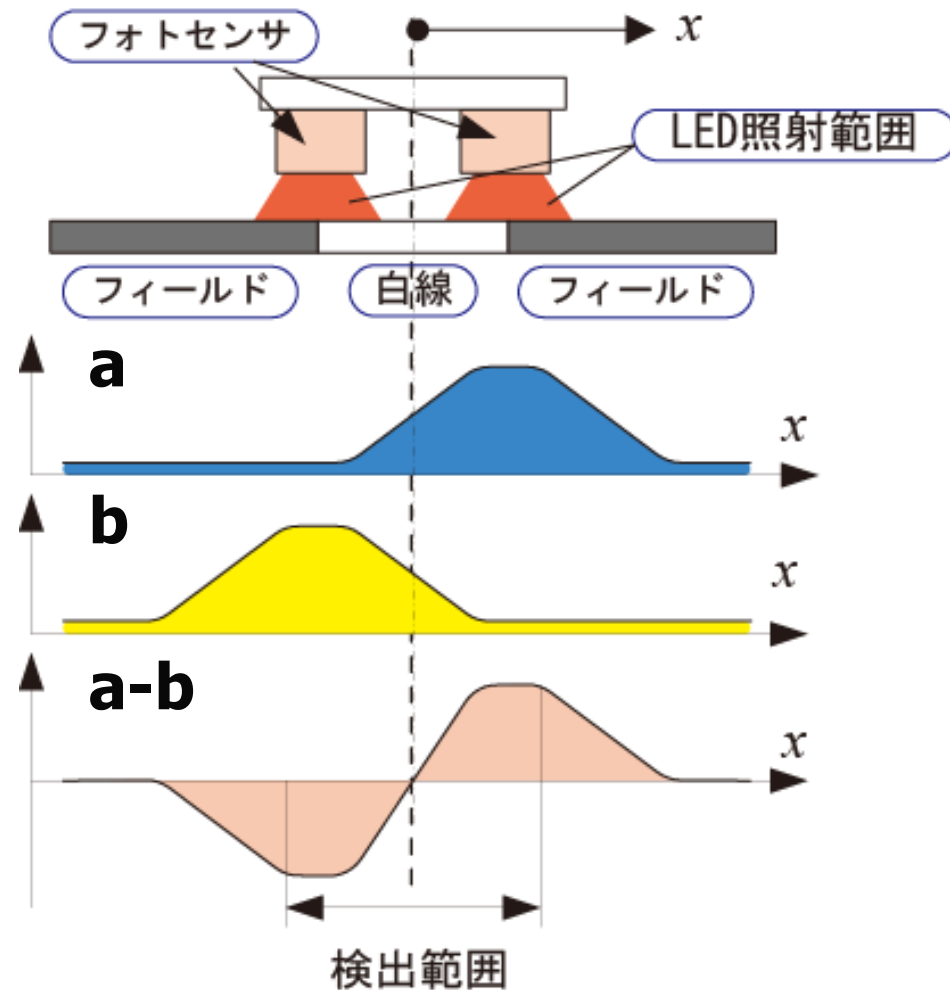
物体までの距離の計測や境界の検出が可能



フォトリフレクター利用例



ライトレース四輪車



電界効果トランジスタ (FET)

電界効果トランジスタは、外部から加えた電界により、電流の通路(チャネル)の幅を変えて電流を制御する電圧動作形の半導体増幅素子である。

➤ **接合形FET**

(junction **F**ield **E**ffect **T**ransistor)

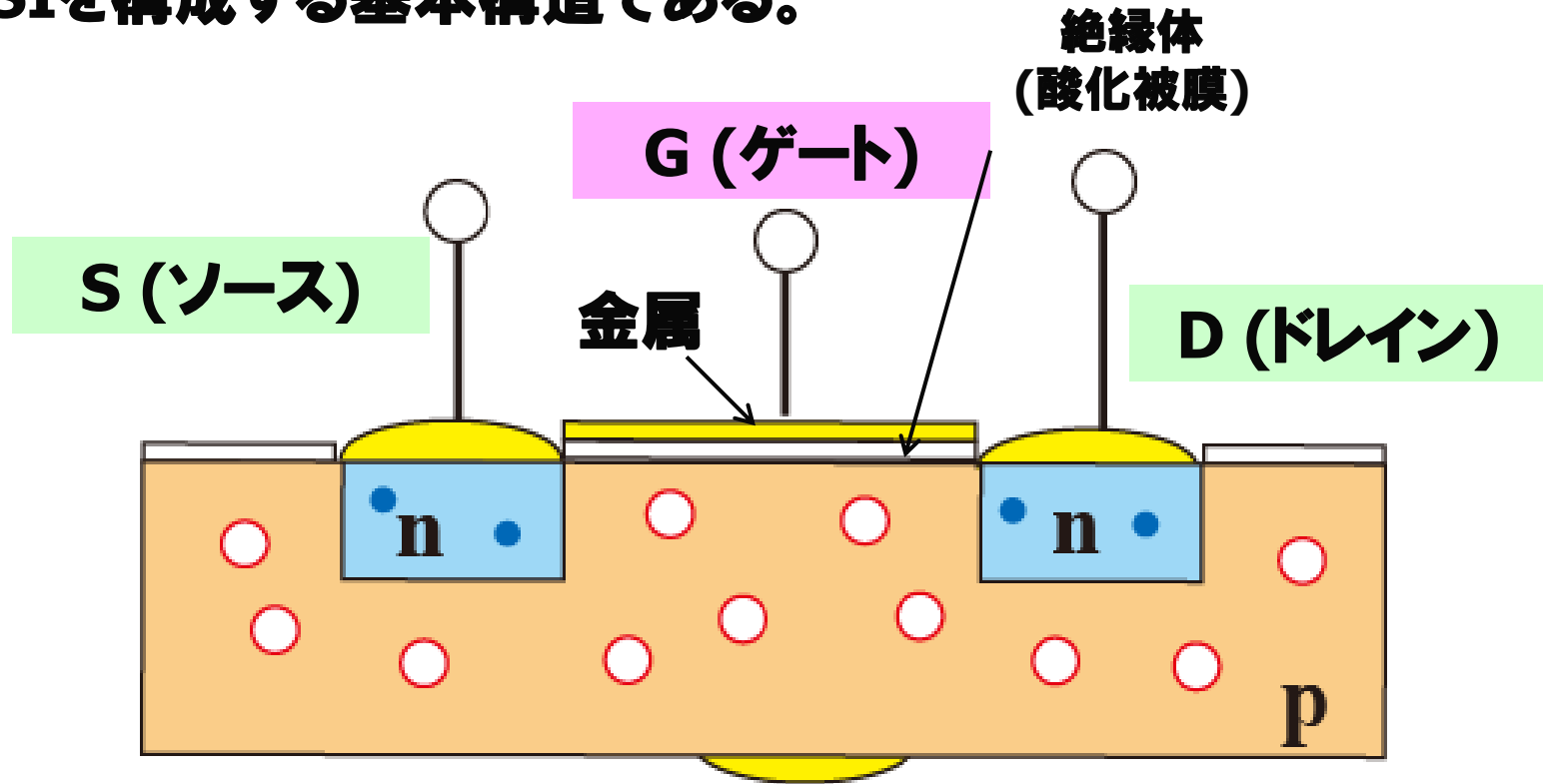
➤ **絶縁ゲート型FET→MOSFET**

(MOS形:metal oxide semiconductor)

MOS型トランジスタ

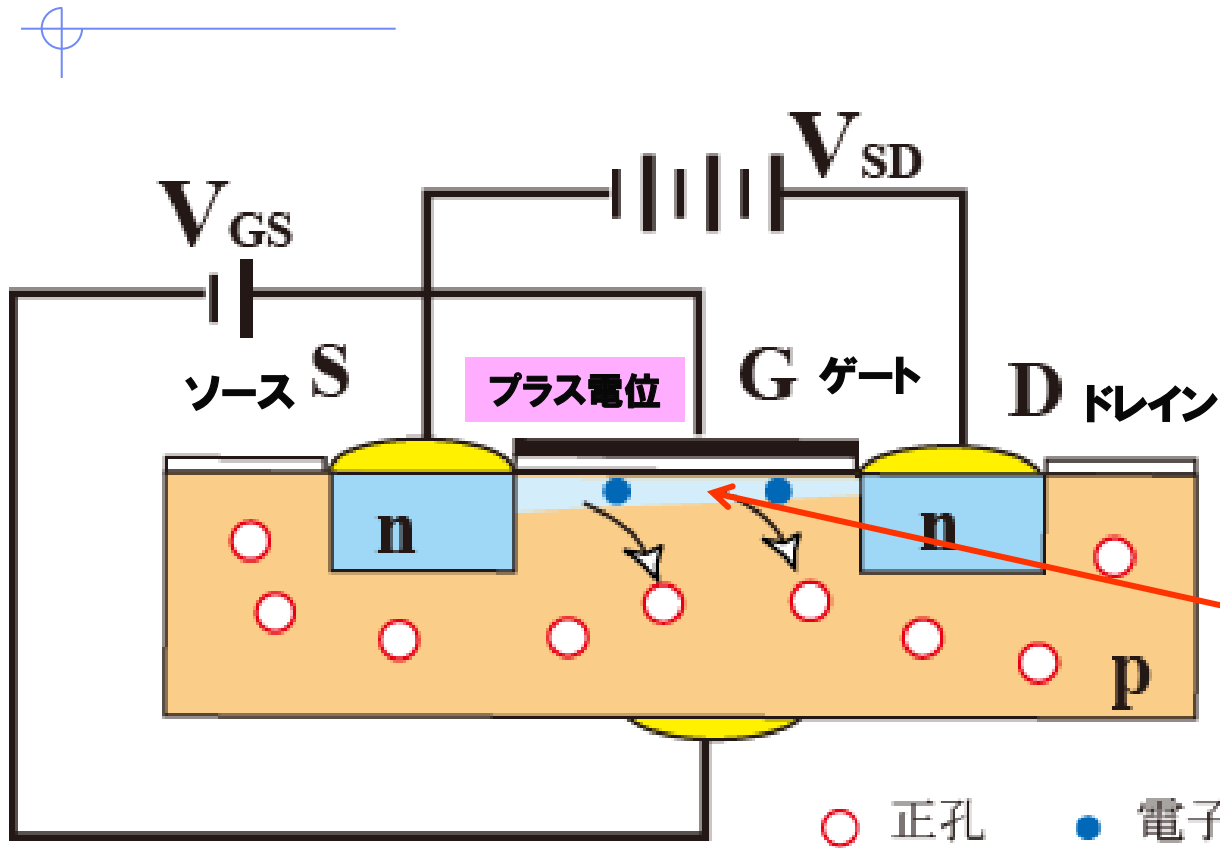
電界効果トランジスタ の一種

LSIを構成する基本構造である。



MOS型トランジスタの構造

MOS型トランジスタの動作原理

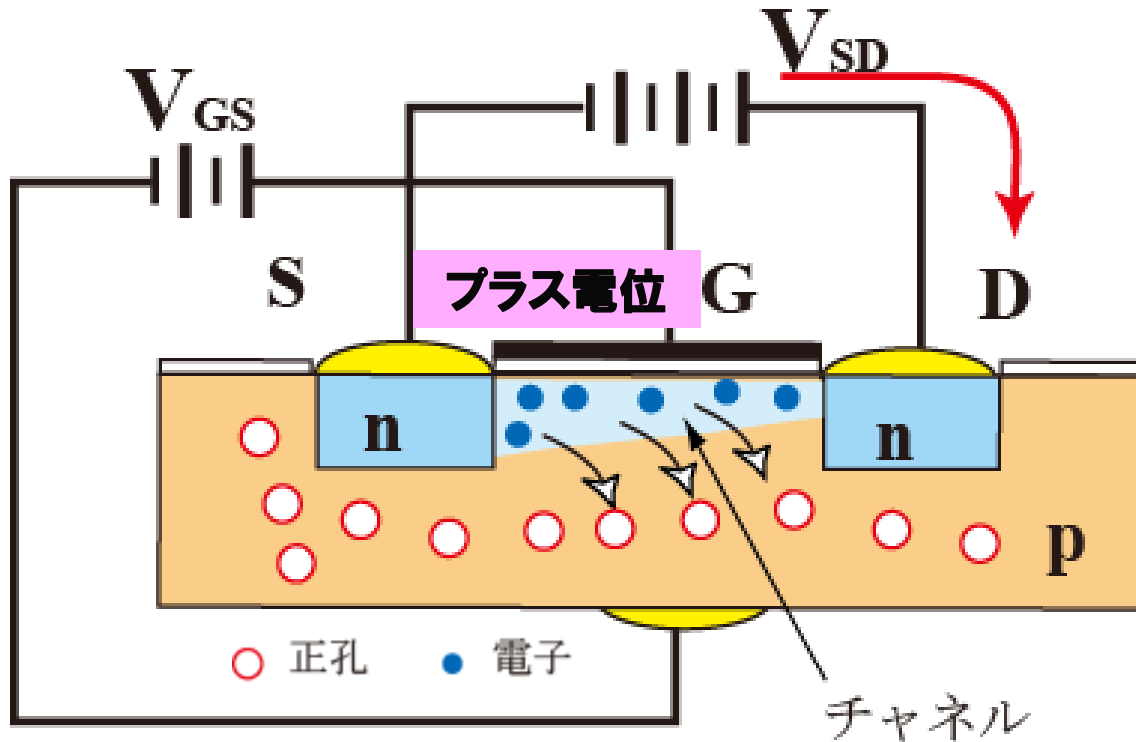


1. ゲート電圧が加わる
2. 正孔が追いやられ電子が集まる
3. p型がn型へ変化

チャンネルができる

4. チャンネルができ、S(ソース)からD(ドレイン)へ電流が流れる

MOS型トランジスタの動作原理



1. ゲート電圧が増大
2. チャンネル幅が増加
3. 電気が通り易くなる
4. SとD間の抵抗値が減少

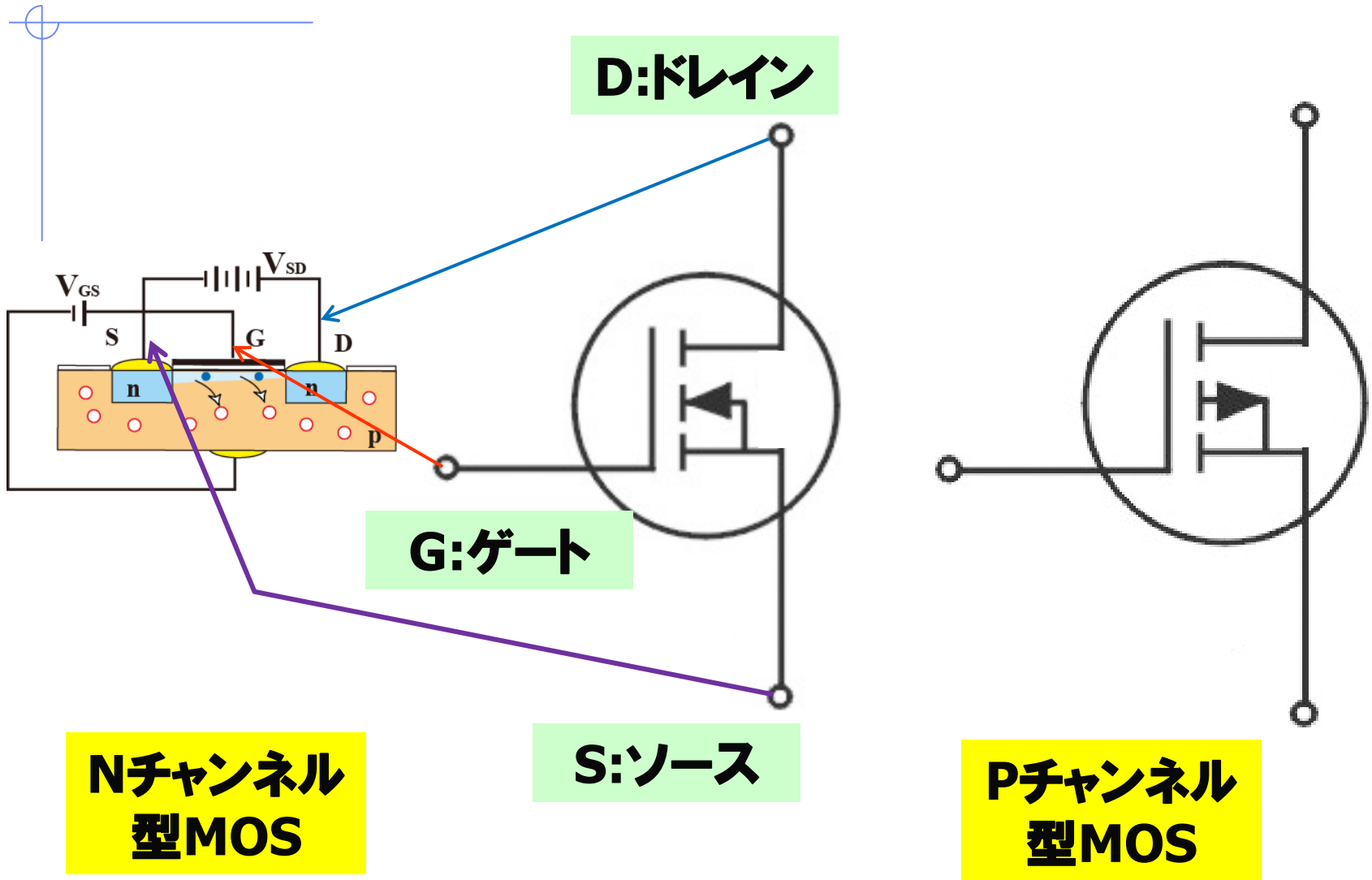
5. これは、G(ゲート)電圧によって、S(ソース)とD(ドレイン)間の抵抗値を制御できることを意味する
6. ゲート電圧で信号の増幅、スイッチング動作が可能となる

The M O S F E T

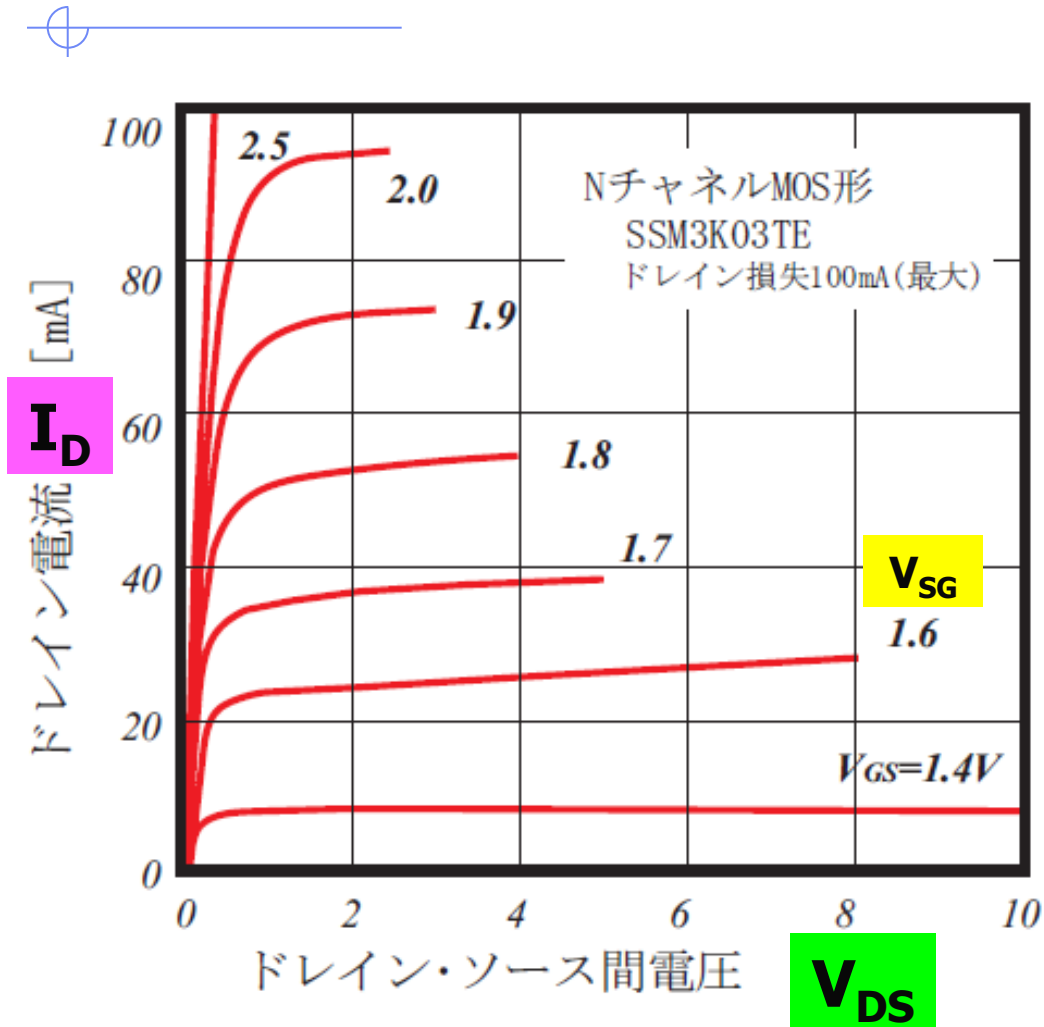


University of Colorado at Boulder

回路記号

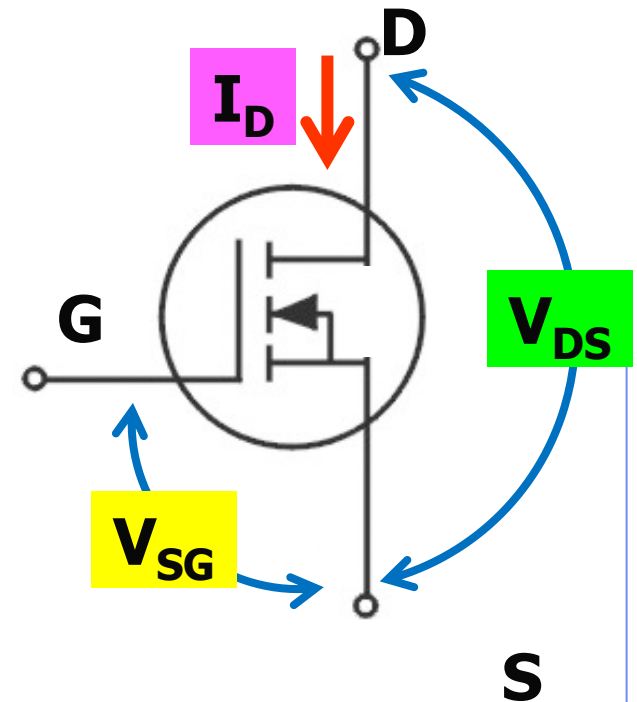


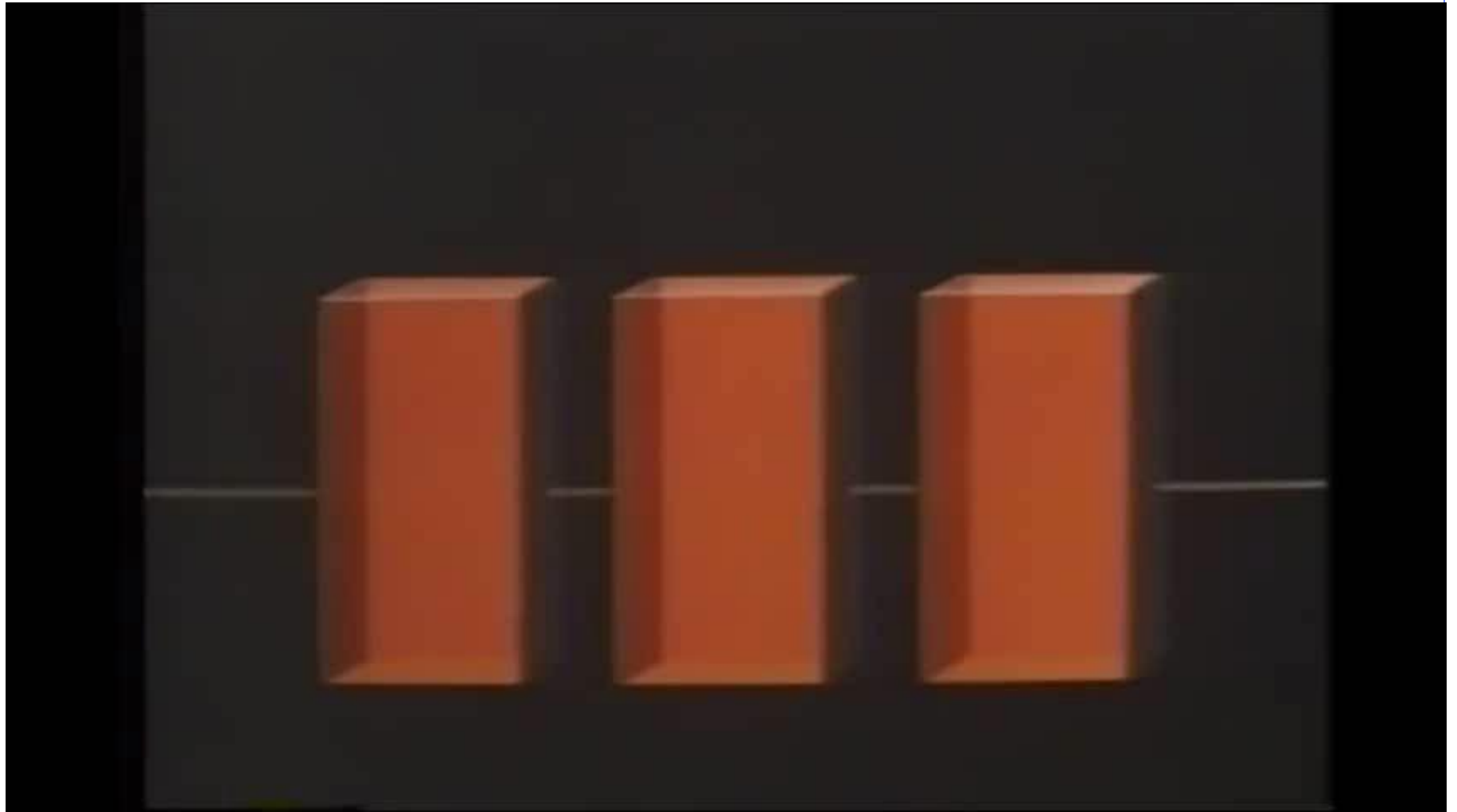
MOS型FETの特性



n チャンネル型MOS

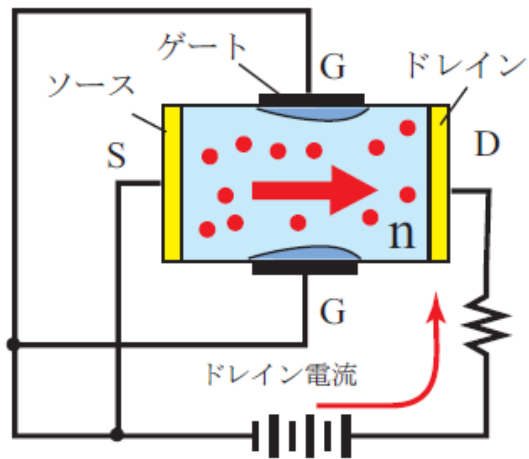
V_{SG} によってトランジスタと同様に流れる電流 I_D を制御できる。



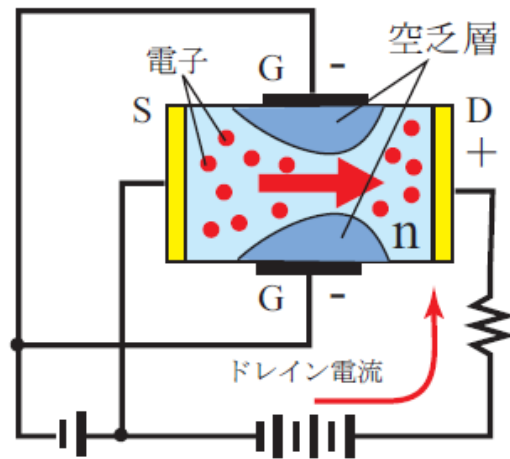


IC製造法

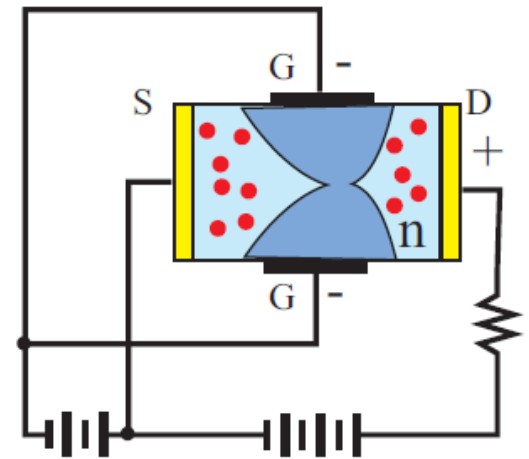
接合型FET動作原理



(a) 空乏層が少なく伝導路が広い



(b) バイアス電圧が増加し
空乏層が広がる



(c) バイアス電圧がさらに増加し
空乏層が伝導路をふさぐ

ピンチオフ

トランジスタと電界効果トランジスタの違い

電流制御型か電圧制御型かの違い

- トランジスタ：**電流制御型**。

- キャリアとして電子と正孔の両方が関与するので**バイポーラトランジスタ**とも呼ばれる

- 電界効果型トランジスタ：**電圧制御型**。

- キャリアとして電子もしくは正孔の片方のみが関与するので**ユニポーラトランジスタ**とも呼ばれる。

MOS 型集積回路は製作工程数が少く、高密度に集積できるので、経済性においてすぐれ、大規模集積回路や集積回路記憶装置(IC メモリ)に広く用いられている。

整流素子(ダイオードの仲間)

電気エネルギーの制御に利用する

-29-

新しい街づくりとしてのスマートコミュニティのイメージ

コントロールセンター

地域の情報・エネルギー・交通を最適に管理するコントロールセンター

- 企業・自治体対住民、住民対住民の様々なサービスを管理・提供する拠点
- 変動の多い自然エネルギーを地域内で有効活用するため、各家庭やオフィスで余った電力を地域内で有効利用
- 電気バスや電気自動車の位置情報と充電状態を管理することで、交通管理とエネルギー管理を一体化

三菱重工(株)のイメージ図を参考に作成

電気自動車を電力インフラとして活用

電力不足時: 電気自動車 → 家庭
電力過剰時: 家庭 → 電気自動車

架線レス路面電車

蓄電池を搭載した路面電車で停車時: 電池に充電
駅間の移動時: 電池で駆動

急速充電ステーション

30分で80%充電

スマートハウス

太陽光発電, 洗濯乾燥機, 食洗機, LED照明, テレビ, スマートメーター, ホームネットワーク, 省エネエアコン, ホームゲートウェイ, 電気自動車

電気バス(将来は路面電車化)

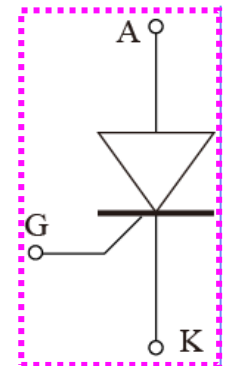
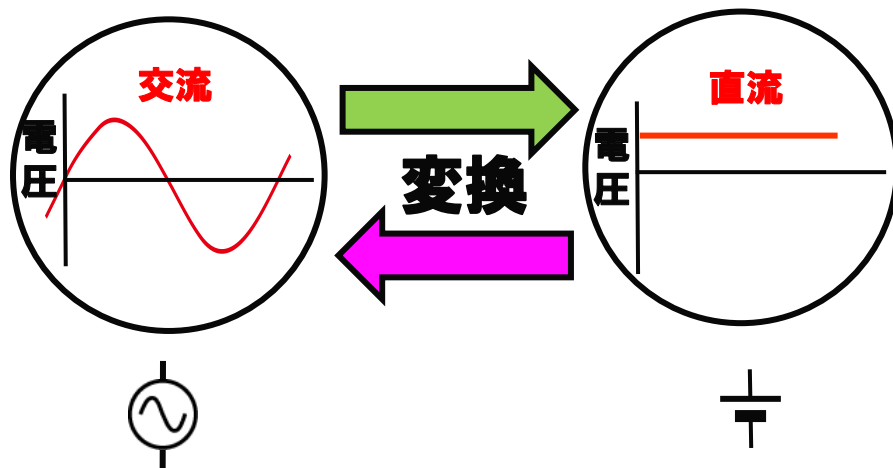
電池交換式の電気バス。将来的には複数台を連結して路面電車化

.....電池.....
・固定式・ 空調 インバータ
モータ電池.....
・交換式・

将来的に路面電車化も視野

電力変換と整流素子

- 電力は、直流、交流、電圧・電流の違い、周波数の違いなどがあり、これら電力の変換する必要があります。
- これらの電力を変換する装置が電力変換装置です。
- この電力変換装置に使われるのがサイリスタ等の半導体素子です。



サイリスタ

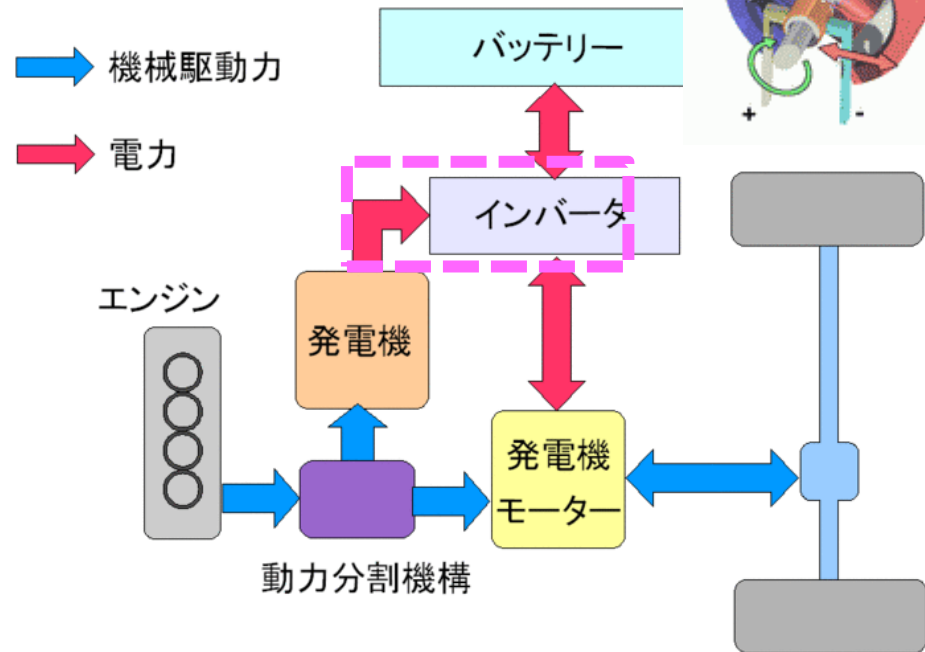
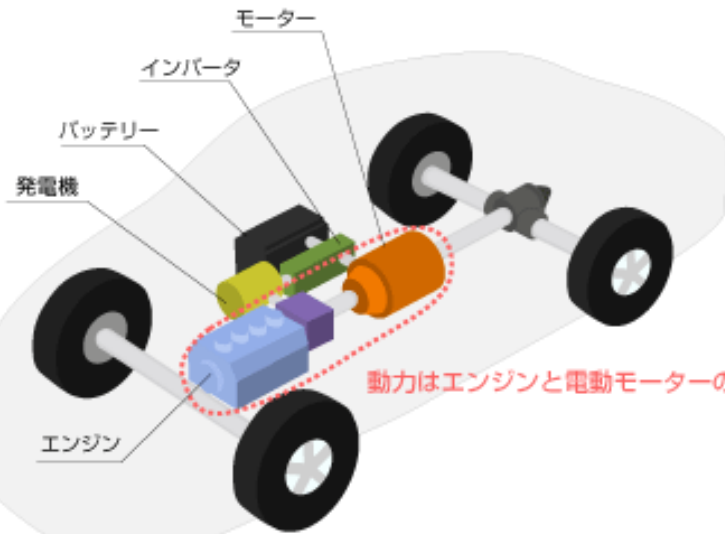
電力変換装置の分類

入力 出力	直流	交流
直流	直流チョツパ  DC-DCコンバータ	コンバータ (順変換装置)
交流	インバータ (逆変換装置)	サイクロコンバータ

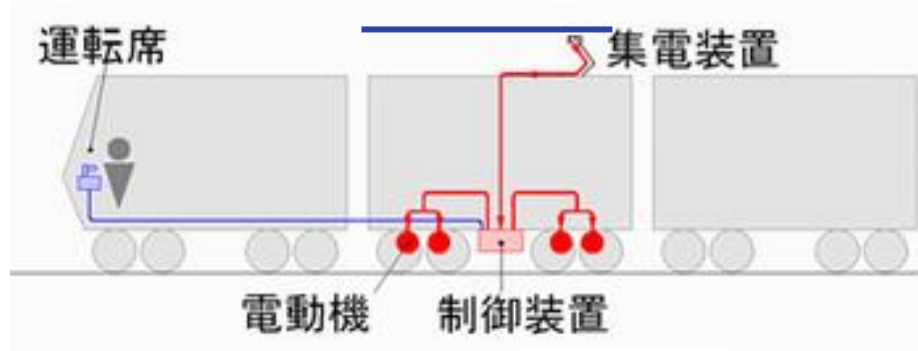
整流素子(ハイブリッド車)



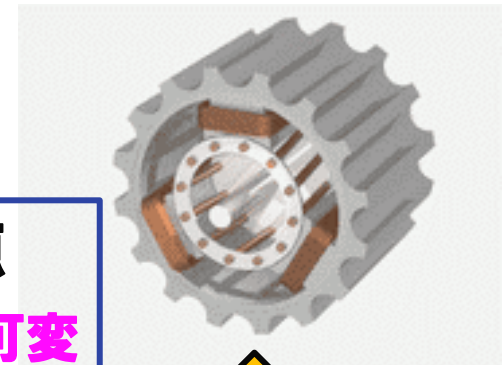
【ハイブリッドカーの基本構造】



整流素子(例電車)



交流モータ

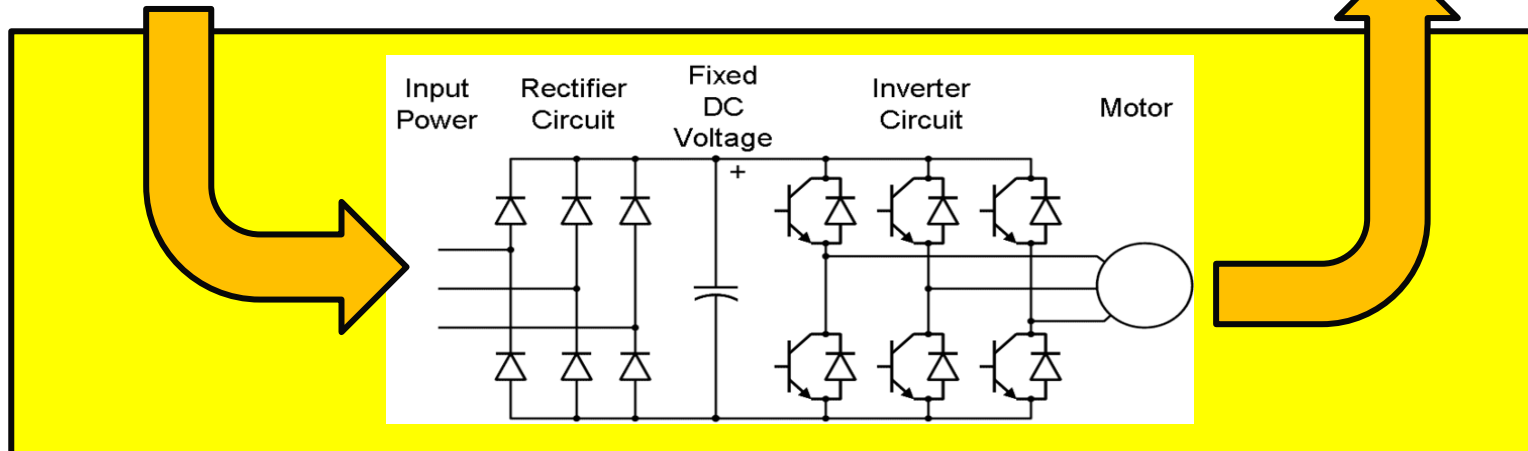


入力

直流 or
交流電源

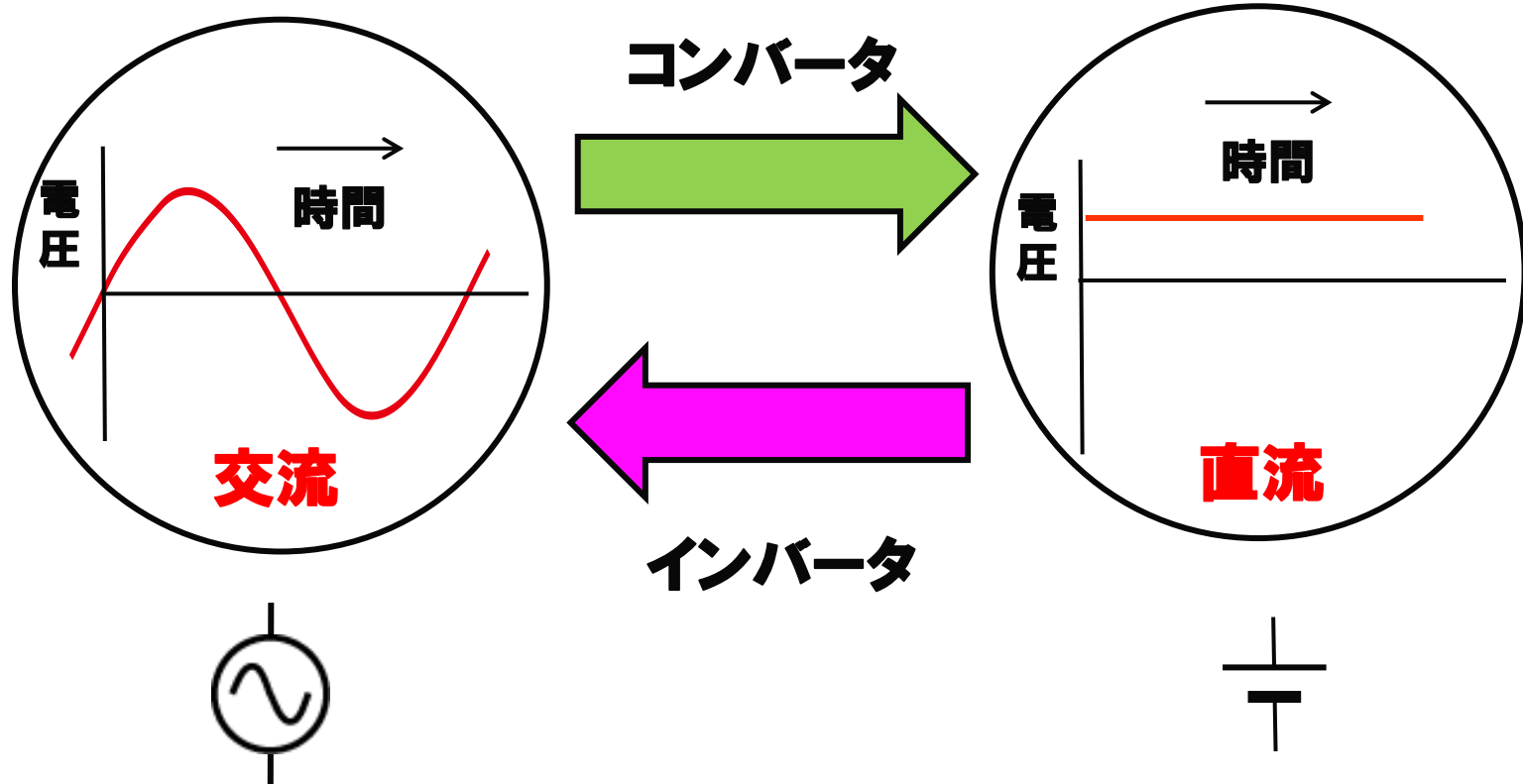
出力

交流電源
電圧・周波数可変

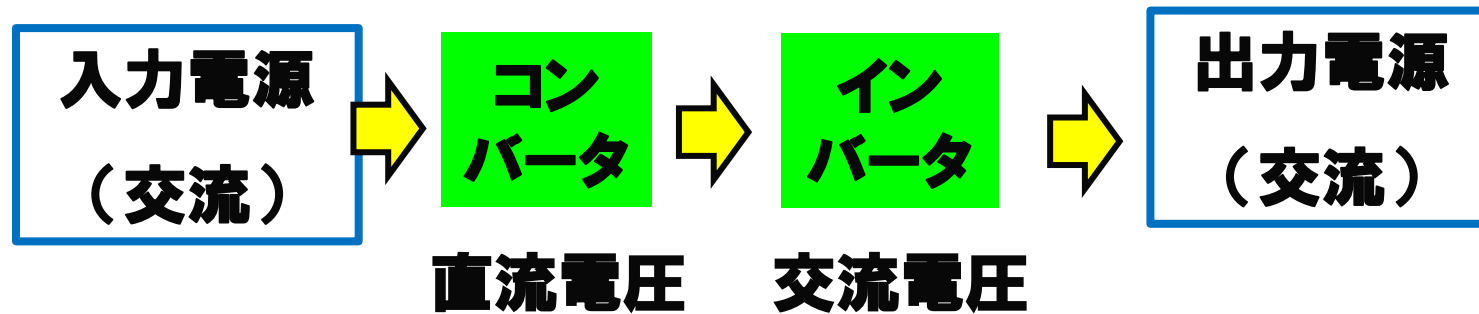


可変電圧可変周波数制御方式(VVVF)

電力変換装置でのコンバータとインバータ



電力変換装置でのコンバータとインバータ



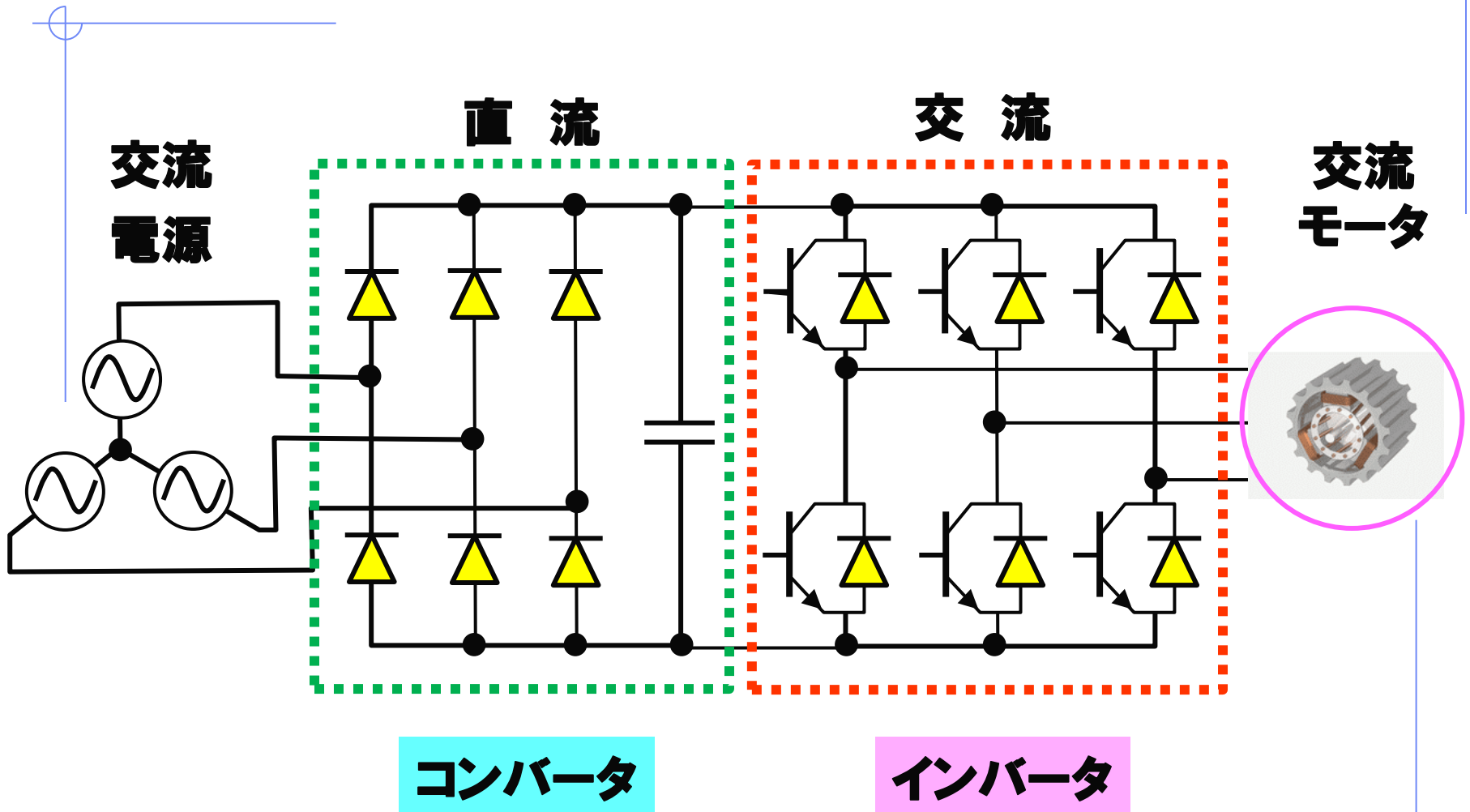
一定電圧
一定周波数



可変電圧
可変周波数

VVVFインバータ (Variable Voltage Variable Frequency Inverter)

電力変換装置でのコンバータとインバータ



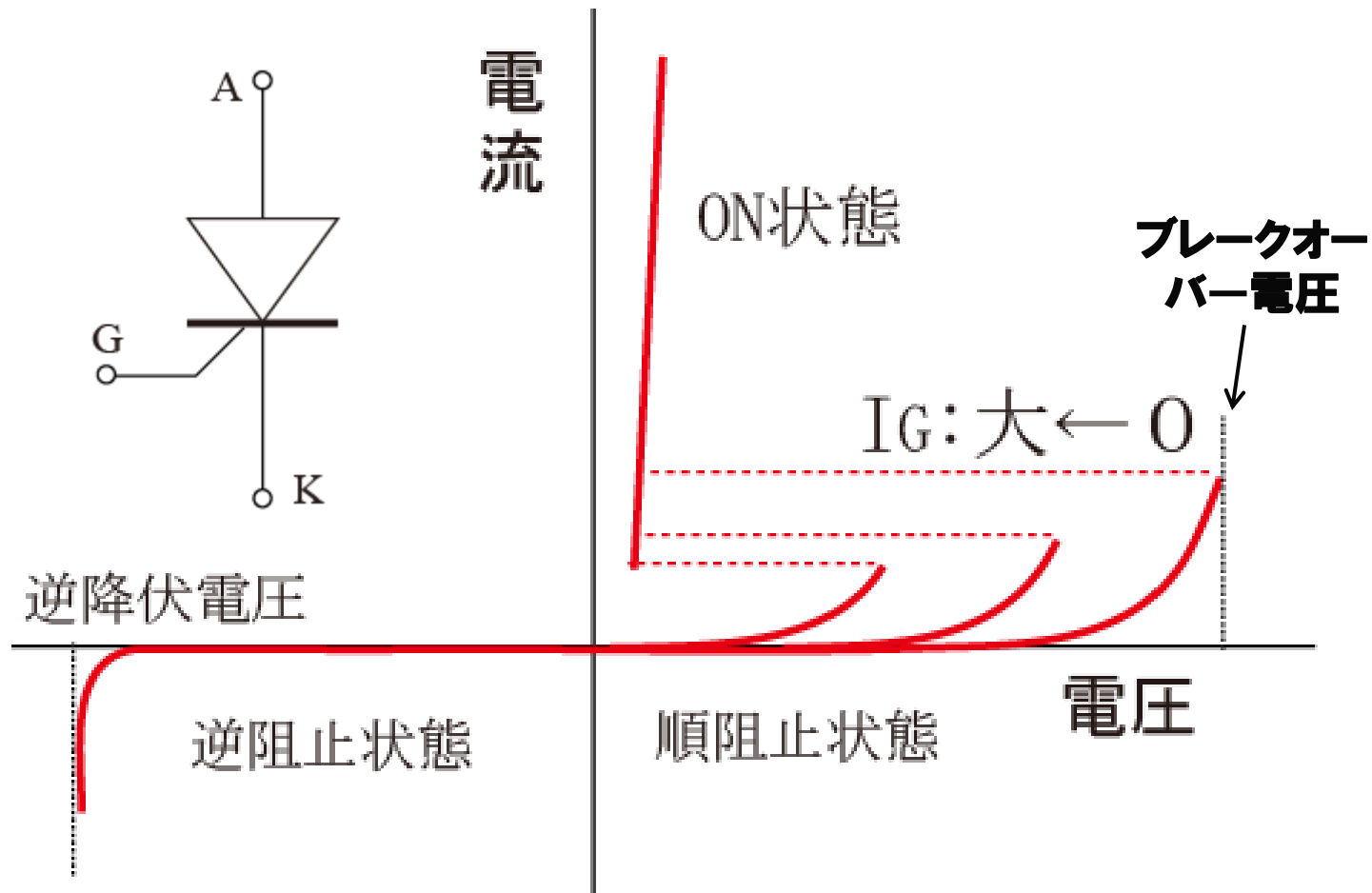
整流素子(サイリスタ)

- **整流素子: 電力変換に用いられる素子**
- **基本動作: 電流を一方方向にのみ流す。但し,**
 - **大電流, 高電圧に耐える**
 - **電流のON/OFFを外部から制御できる**



サイリスタの例

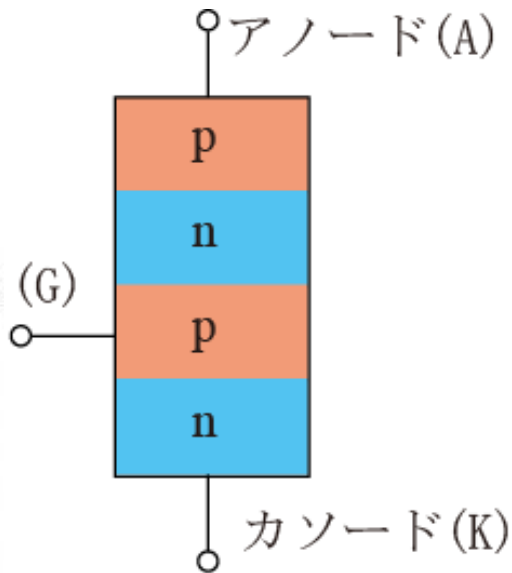
サイリスタ特性



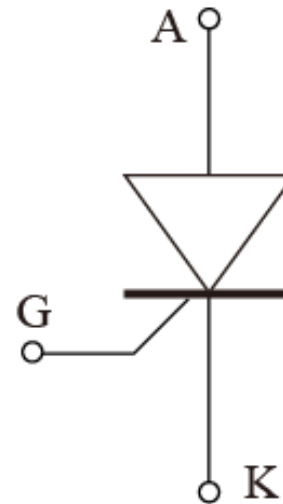
電圧・電流特性

サイリスタ

サイリスタはダイオードと同様の一方方向にのみ大電流を流す素子である



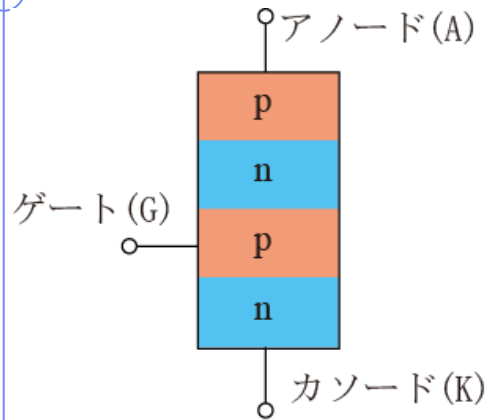
(a) 基本構造



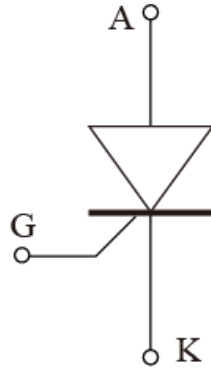
(b) 図記号

但し、
スイッチング機能を行わせるゲートがある

サイリスタ構造

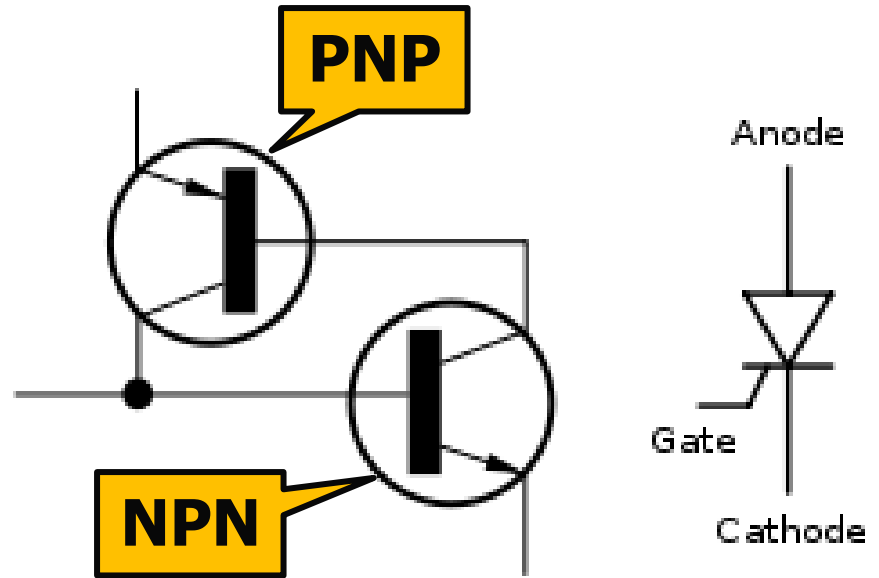
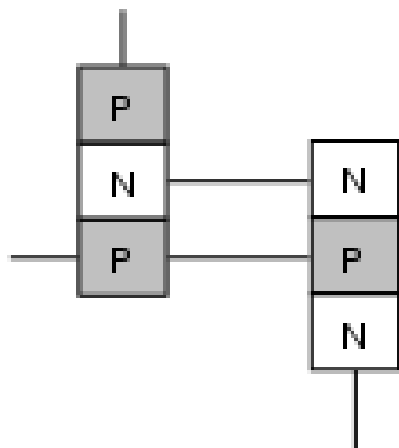
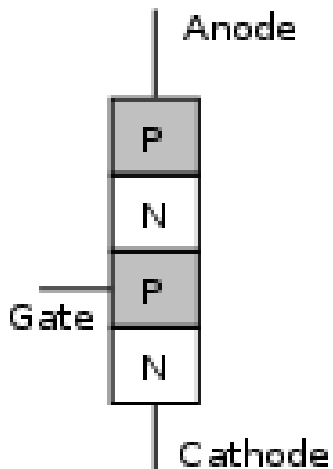


(a) 基本構造

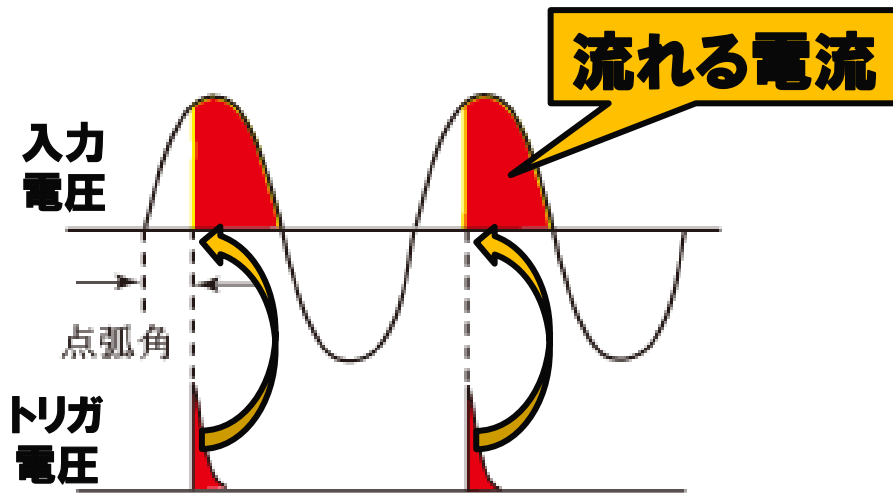
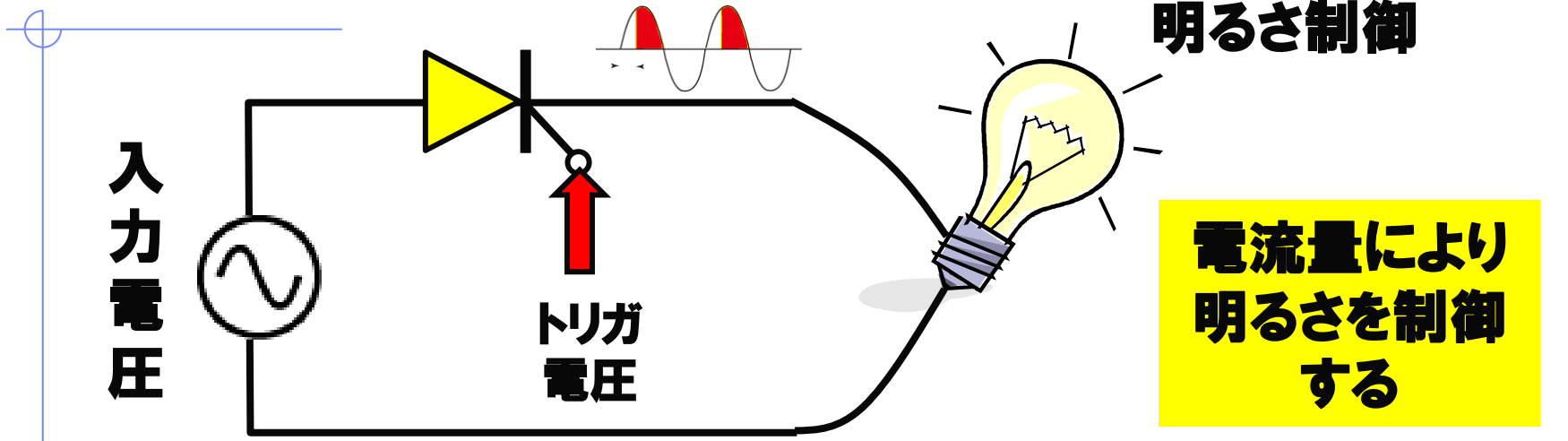


(b) 図記号

原理としては、図のように PNPトランジスタとNPNTランジスタを組み合わせた複合回路と等価である。



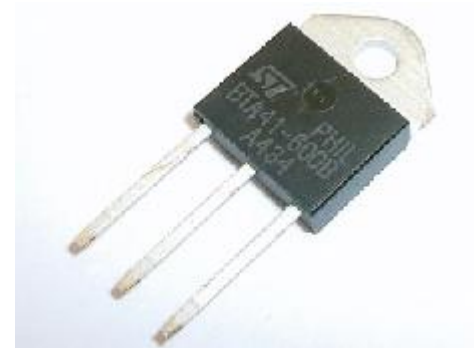
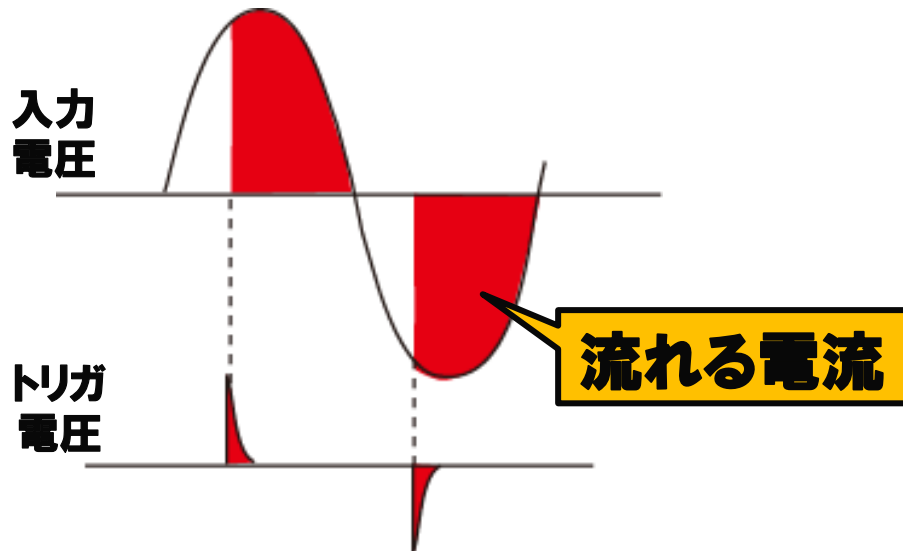
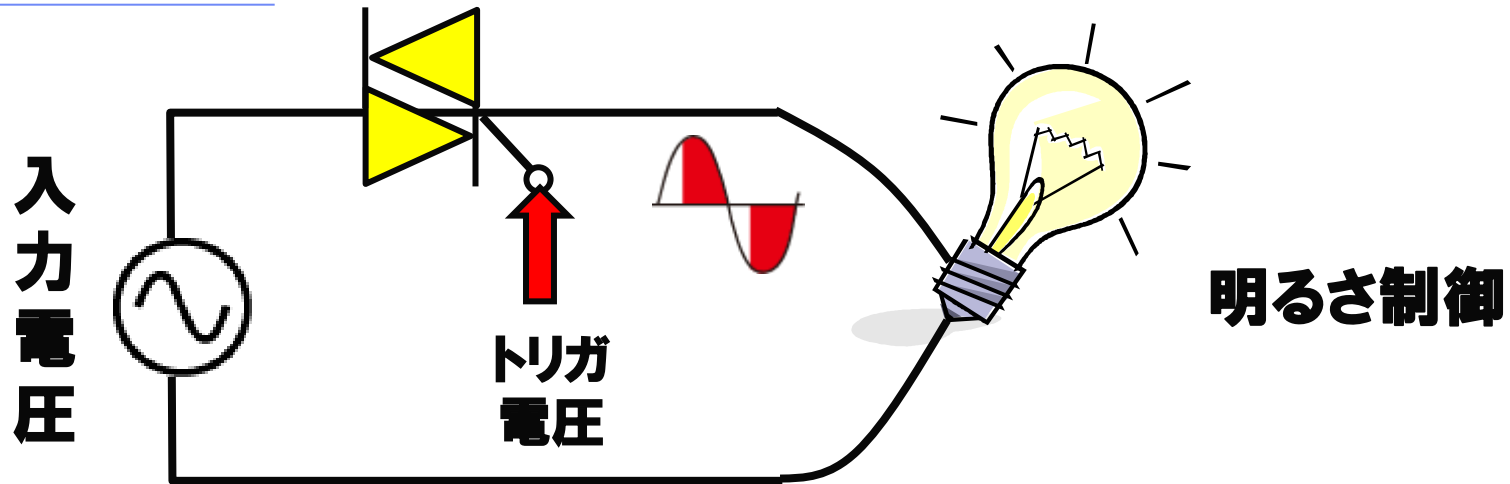
サイリスタ



電流減少



トライアック(双方向サイリスタ)



- ▶ 大容量40A
- ▶ 耐圧600V

PWMとは

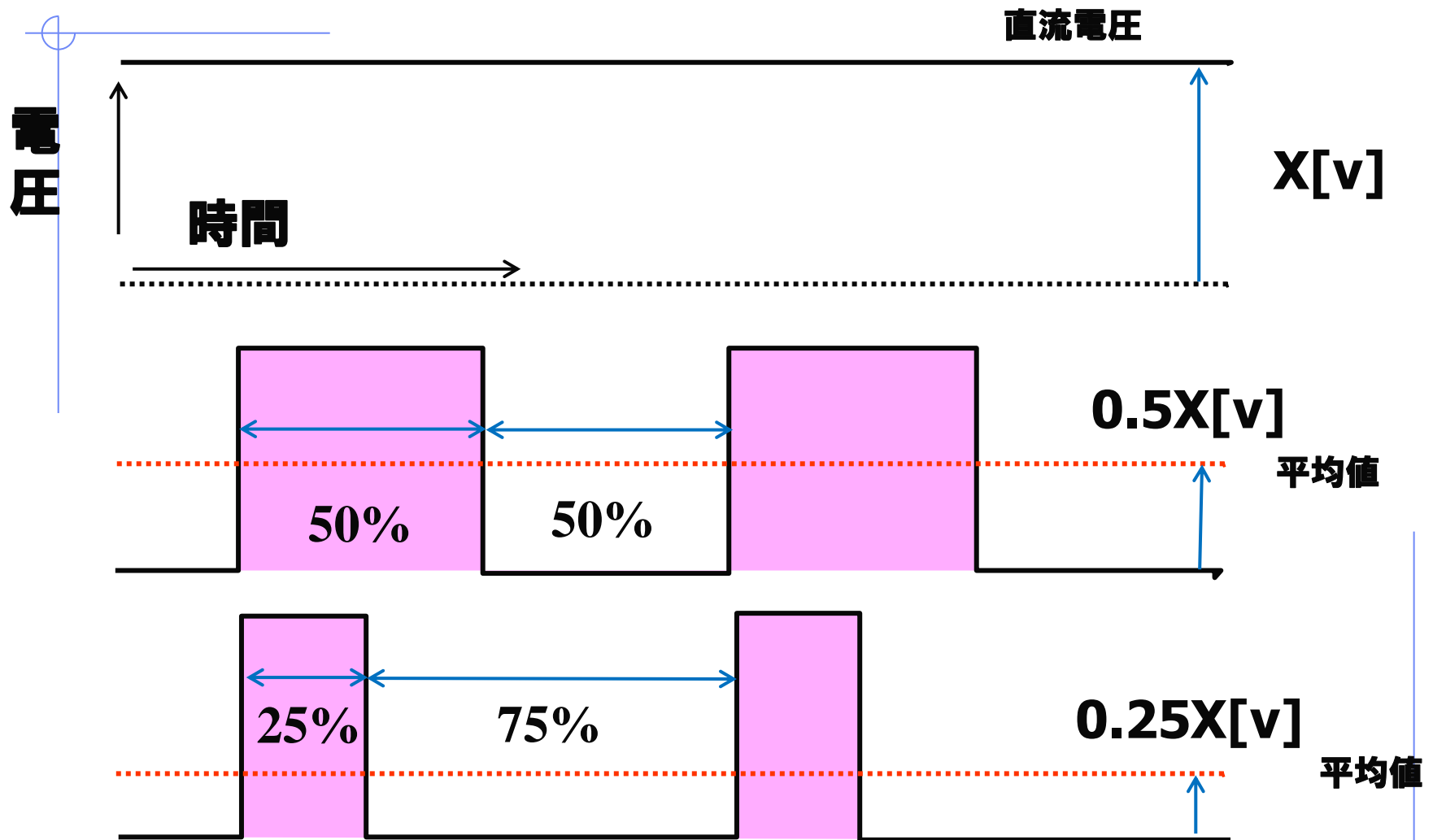


www.HomoFaciens.de

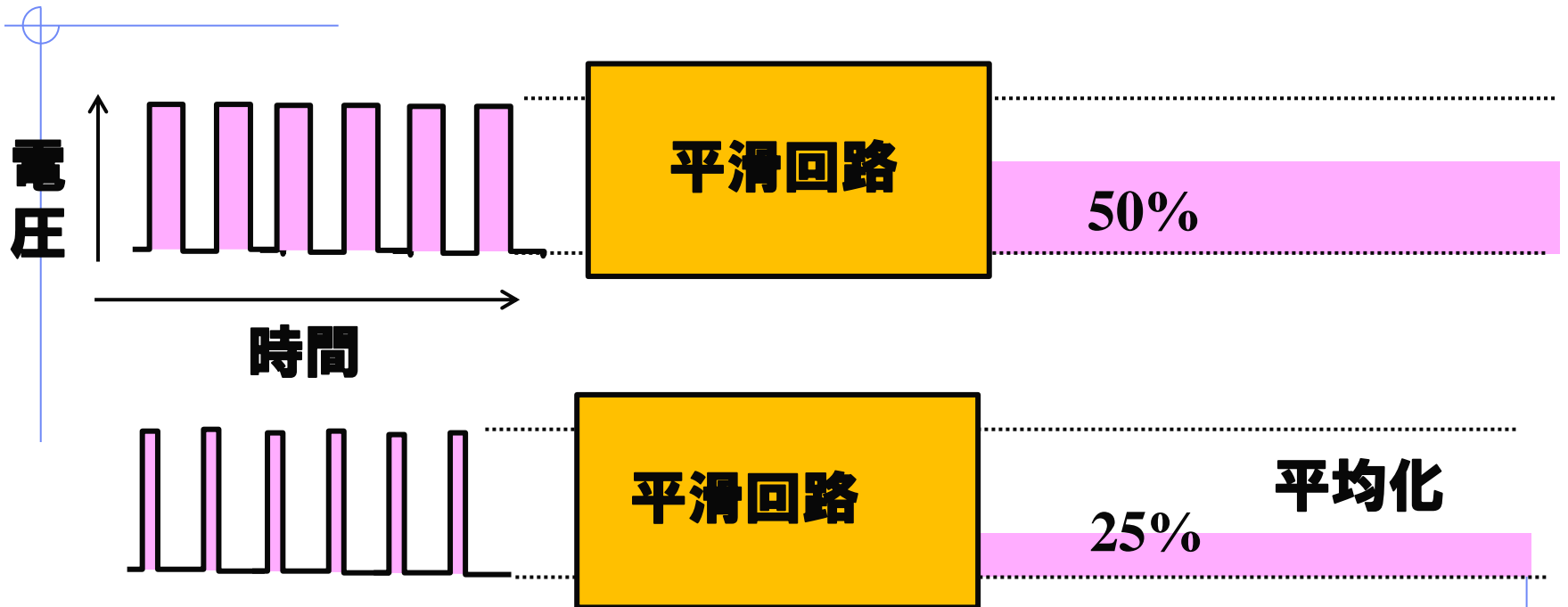
presents:

**"Pulse-width
modulation"**

PWM1

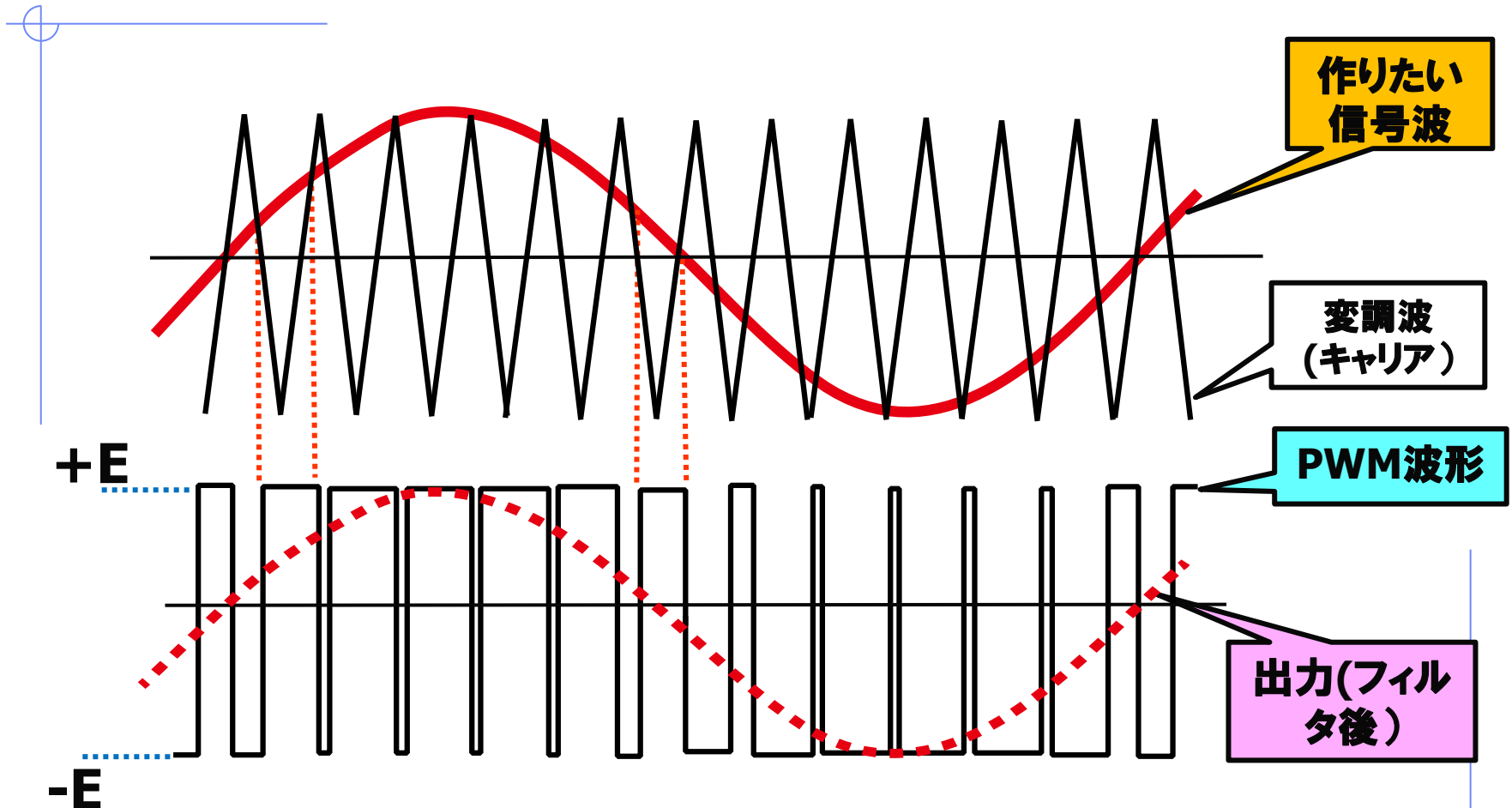


PWM2



PWMと平滑回路を組み合わせれば低い電圧を作れる

インバータ方式による周波数変換方式

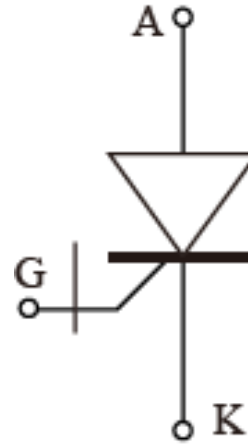


インバータ(Inverter): 直流電力から交流電力を生成する回路

その他の電力制御素子

GTO(ゲートターンオフサイリスタ)

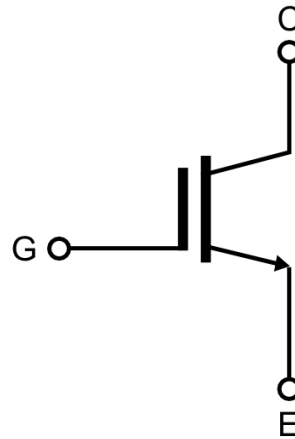
ゲートに逆方向の電流を流すことにより、電流遮断可能



4500V/1000A FG1000BV-90DA(三菱)

IGBT(絶縁ゲートバイポーラトランジスタ)

大電力の高速スイッチングが可能な半導体素子



3300V/1200A_IGBTモジュール(三菱電機)

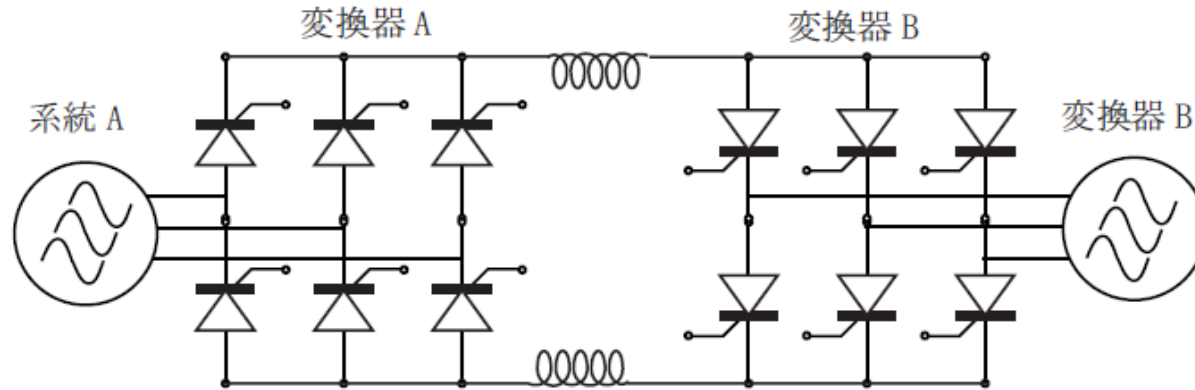
サイリスタの仲間 (IGBT)

直流通勤電車	直流通勤電車	新幹線、交流電車
GTO	IGBT	
2レベル回路	2レベル回路	3レベル回路
450Hz	1000~2000Hz	
4500V 3000~4000A	2000~3300V 400~1200A	

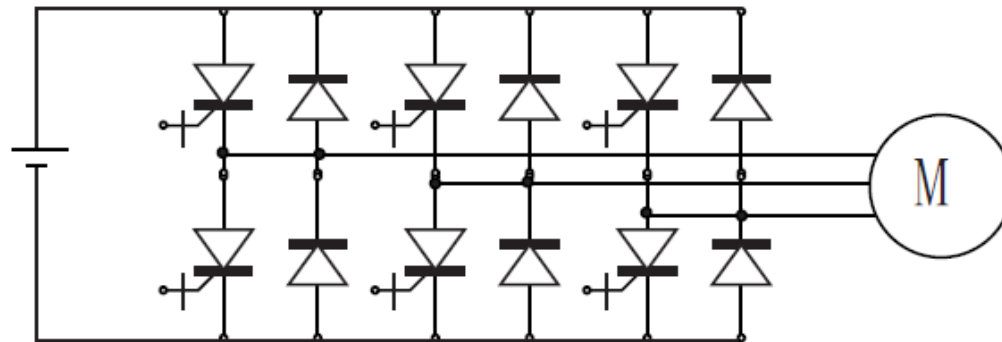
電車制御は、従来はGTOであったが最近ではIGBTが使われる。



パワーエレクトロニクスへの応用例

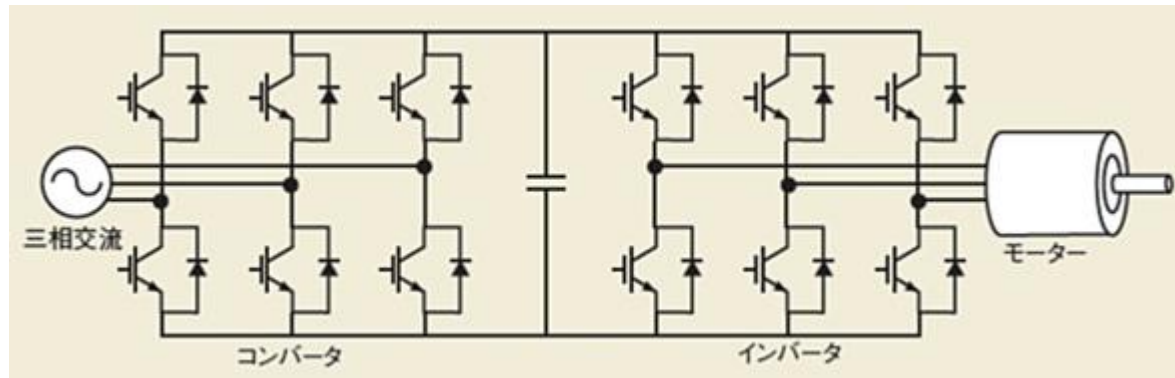


(a) 周波数変換器



(b) インバータ制御

おわり



レポート課題

課題：次世代半導体SiCについて調べる

- 1.構造・特性(どのような半導体であるか)**
- 2.優れた点は何か**
- 3.応用分野, 事例**

締め切り： 月 日 授業終了後に提出

レポート用紙(A4判)を使う。

学籍番号, 氏名を忘れずに