

パワーエレクトロニクス

第二回 パワー半導体デバイス

2023年4月19日

授業の予定

- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

歪波交流

- 直流や正弦波交流が欲しいのに出力には複数の周波数成分が含まれる
- フーリエ級数展開

- 原信号

- $f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$

- 角周波数 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ [rad/sec]
 - n 次高調波成分

- 実フーリエ級数

- 直流成分

- $$\left. \begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \\ b_0 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

- $$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos n\omega t dt \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin n\omega t dt \end{aligned} \right\}$$

高調波成分

- 周期 T [sec]に対する周波数 $\frac{1}{T}$ [Hz]の n 倍の周波数成分 $f_n(t)$

- $f_n(t) = a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t$

- $$= \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \left\{ \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \cos n\omega t + \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \sin n\omega t \right\}$$

- 位相 θ_n

振幅 c_n

- $$\left. \begin{aligned} \cos \theta_n &= \frac{b_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \\ \sin \theta_n &= \frac{a_n}{\sqrt{a_n^2 + b_n^2}} \end{aligned} \right\}$$

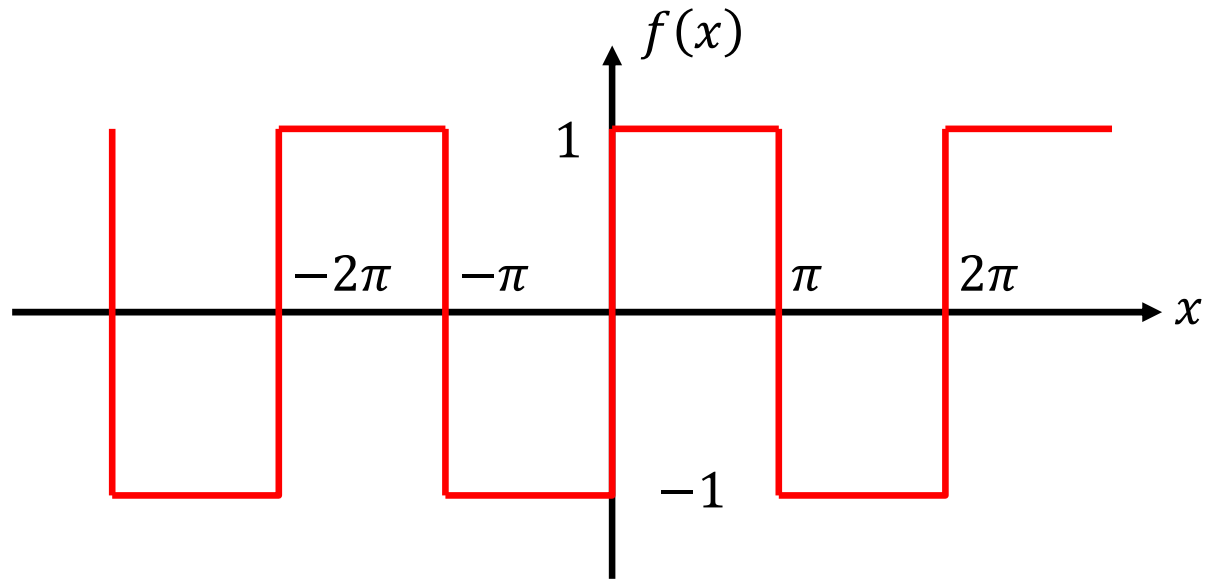
$$c_n = |f_n(t)| = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\begin{aligned} f_n(t) &= c_n \{ \sin \theta_n \cos n\omega t + \cos \theta_n \sin n\omega t \} \\ &= c_n \sin(n\omega t + \theta_n) \end{aligned}$$

矩形波の周波数成分

- 矩形波

- $f(x) = \begin{cases} -1 & (2n - 1)\pi < x \leq 2n\pi \\ 1 & 2n\pi < x \leq (2n + 1)\pi \end{cases}$



複数の周波数成分で構成される → フーリエ級数展開

矩形波の周波数成分

- 直流成分

- $$\begin{aligned} a_0 &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 -1 dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} 1 dx \\ &= -\frac{1}{\pi} [x]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} [x]_0^{\pi} \\ &= -\frac{1}{\pi} \pi + \frac{1}{\pi} \pi \\ &= 0 \end{aligned}$$

矩形波の周波数成分

- n 次の高調波成分(cosの係数)

$$\begin{aligned} \bullet a_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos nx \, dx \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 -\cos nx \, dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos nx \, dx \\ &= -\frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{n} \sin nx \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{n} \sin nx \right]_0^{\pi} \\ &= -\frac{1}{\pi} 0 + \frac{1}{\pi} 0 \\ &= 0 \end{aligned}$$

矩形波の周波数成分

- n 次の高調波成分(sinの係数)

$$\begin{aligned} \bullet \quad b_n &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin nx \, dx \\ &= \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^0 -\sin nx \, dx + \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sin nx \, dx \\ &= -\frac{1}{\pi} \left[-\frac{1}{n} \cos nx \right]_{-\pi}^0 + \frac{1}{\pi} \left[-\frac{1}{n} \cos nx \right]_0^{\pi} \\ &= \frac{1}{n\pi} [1 - \cos(-n\pi)] - \frac{1}{n\pi} [\cos(n\pi) - 1] \\ &= \frac{2}{n\pi} [1 - \cos(-n\pi)] \end{aligned}$$

矩形波の周波数成分

- n 次の高調波成分(sinの係数)

$$\begin{aligned} \bullet \quad b_n &= \frac{2}{n\pi} [1 - \cos(-n\pi)] \\ &= \frac{2}{n\pi} [1 - (-1)^n] \\ &= \begin{cases} \frac{4}{n\pi} & n = 2m - 1 \\ 0 & n = 2m \end{cases} \end{aligned}$$

矩形波の周波数成分

- フーリエ級数展開

- $f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx$

- $$= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1)x$$

- $$= \frac{4}{\pi} \left\{ \sin x + \frac{1}{3} \sin 3x + \frac{1}{5} \sin 5x + \dots \right\}$$

- 高調波成分は周波数に反比例した振幅を持つ

複数周波数成分を含む実効値

- 実効値

- $F_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt}$

- $f(t) = \sum_{i=0}^{\infty} [a_i \cos i\omega t + b_i \sin i\omega t]$
 $= \sum_{i=0}^{\infty} c_i \sin(i\omega t + \theta_i)$

- $F_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [\sum_{i=0}^{\infty} c_i \sin(i\omega t + \theta_i)]^2 dt} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\infty} c_i^2}{2}}$

- 実効値 F_{eff} は各周波数成分の振幅 c_i の二乗和の平方根に比例

複数の周波数成分が含まれる電圧・電流に対する皮相電力

- 電圧・電流

- $$\left. \begin{aligned} v(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} V_i \sin(i\omega t + \theta_i) \\ i(t) &= \sum_{i=0}^{\infty} I_i \sin(i\omega t + \phi_i) \end{aligned} \right\}$$

- 平均電力

- $$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \left[\sum_{i=0}^{\infty} V_i \sin(i\omega t + \theta_i) \right] \left[\sum_{j=0}^{\infty} I_j \sin(j\omega t + \phi_j) \right] dt \\ &= \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} V_i I_i \cos(\theta_i - \phi_i) \end{aligned}$$

- 異なる周波数成分の電圧 V_i ・電流 I_j 積により得られる平均電力は0
 - 同じ周波数の電圧 V_i ・電流 I_i 積による成分のみが有効電力

非線形回路で生じる高調波と電力

- 印加電圧: 振幅 V_1 [V], 角周波数 ω [rad/sec], 位相初期値 θ_1 [rad]
 - $v(t) = V_1 \sin(\omega t + \theta_1)$
- 正弦波電圧を印加した場合に生じる歪電流: I_i : i 次成分電流振幅, ϕ_i : 位相初期値
 - $i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} I_i \sin(i\omega t + \phi_i)$
- 平均電力
 - $$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt$$
$$= \frac{1}{T} \int_0^T V_1 \sin(\omega t + \theta_1) \left[\sum_{j=0}^{\infty} I_j \sin(j\omega t + \phi_j) \right] dt$$
$$= \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \phi_1)$$
 - 平均電力 P [W] は印加した電圧の周波数成分のみで生じる

歪波に対する諸量

- 電流実効値 I_{rms}

$$\bullet I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} I_{i,rms}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\infty} I_i^2}{2}}$$

- 負荷力率 pf

$$\begin{aligned} \bullet pf &= \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{V_{1,rms} I_{1,rms} \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_{1,rms} I_{rms}} \\ &= \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos(\theta_1 - \phi_1) \end{aligned}$$

- 平均電力 P [W] は変わらない
- 基本波成分のみに比べて力率 pf が $\frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$ 倍される

歪波に対する諸量

- 歪率 DF : 電流波形の歪の程度

- $DF = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$ (Distortion Factor)

- 実効値に対する基本波の比

- 歪力率 pf_d

- $pf_d = DF \cos(\theta_1 - \phi_1)$

- 総合歪率 THD (Total Harmonic Distortion)

- $THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0, \neq 1}^{\infty} I_i^2}{I_{1,rms}^2}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} = \sqrt{\frac{1}{DF^2} - 1}$

歪波に対する諸量

- 歪電流に対する無効電力 Q [VAr]
 - $Q = \frac{1}{2} V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \phi_1)$
 - 基本波成分に対する成分で表される
- 基本波以外の電流成分に対する歪電力 D
 - $D = V_{rms} \sqrt{\sum_{i=0, \neq 1}^{\infty} I_{i,rms}^2}$
- 皮相電力 S [VA], 有効電力 P [W], 無効電力 Q [VAr]の関係
 - $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

歪波に対する諸量

- 歪電流波形の平均値 I_{avg}
- 歪電流波形の尖頭値 I_{peak}
- 波形率 FF (Form Factor)
 - $FF = \frac{I_{rms}}{I_{avg}}$
- 波高率 CF (Crest Factor)
 - $CF = \frac{I_{peak}}{I_{rms}}$

パワー半導体デバイスの変遷

- 回転整流器
 - 電気機械変換

電子化

- 水銀整流器
 - 真空管

半導体化
高信頼化

- Siダイオード
- Siサイリスタ

素子構造
可制御化
半導体プロセス

- 自己消弧素子
(電流制御)
 - GTO
 - GCT

素子構造
半導体プロセス
高性能化

- 電圧制御素子
 - MOSFET
 - IGBT

半導体材料

- ワイドバンド
ギャップ素子
 - SiC
 - GaN, Ga₂O₃
 - ダイヤモンド……

パワー半導体デバイスの分類 分け方その①

• バイポーラ系

- 少数キャリアで導電
 - N形半導体に注入された正孔
 - P形半導体に注入された電子
- 代表的デバイス
 - PNダイオード
 - トランジスタ
 - NPN,PNP,IGBT含
 - サイリスタ
 - GTO,GCT含

• ユニポーラ系

- 多数キャリアで導電
 - N形半導体の電子
 - P形半導体の正孔
- 代表的デバイス
 - ショットキーバリアダイオード
 - FET
 - MOSFET
 - JFET

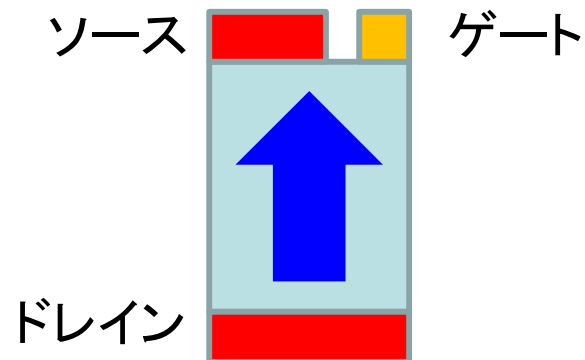
パワー半導体デバイスの分類 分け方その②

- 自然消弧素子
 - ターンオフ
 - 非可制御
 - 外的要因により決まる
 - ターンオン動作
 - 非可制御
 - ダイオード
 - 可制御
 - サリスタ, トライアック
- 自己消弧素子
 - ゲート駆動
 - ターンオン
 - ターンオフ
 - ゲート駆動方式
 - 電流制御型
 - バイポーラトランジスタ
 - GTO, GCT
 - 電圧制御型
 - MOSFET
 - IGBT

パワー半導体デバイスの分類 分け方その③

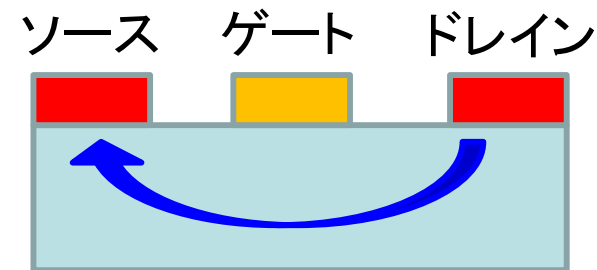
縦型デバイス

- 電流と熱流の方向が一致
- 放熱が容易
- 熱伝導率の差による影響も小
- 高耐圧化が容易



横型デバイス

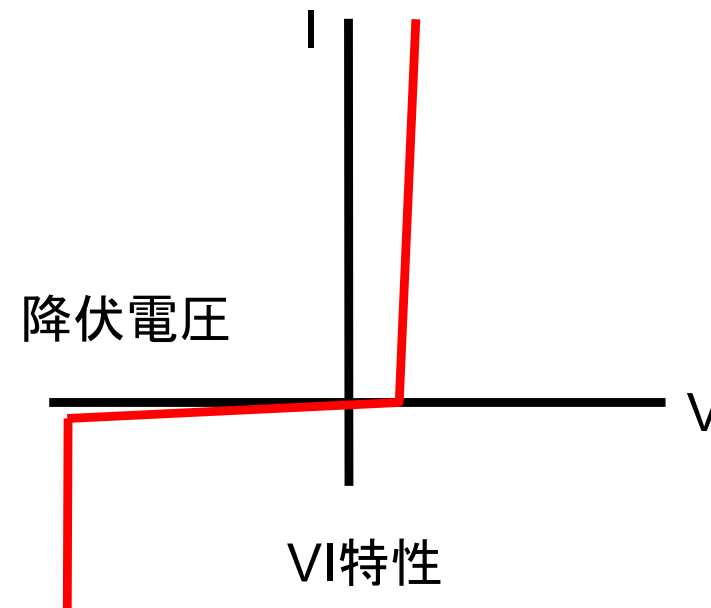
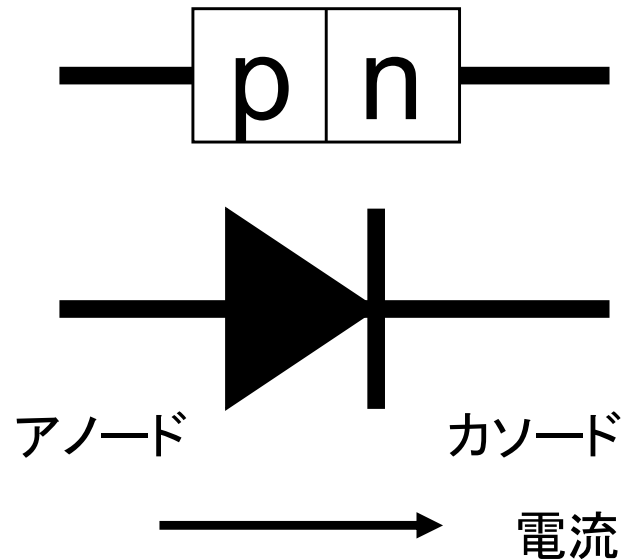
- ゲート駆動回路, 保護回路等との集積化が可能



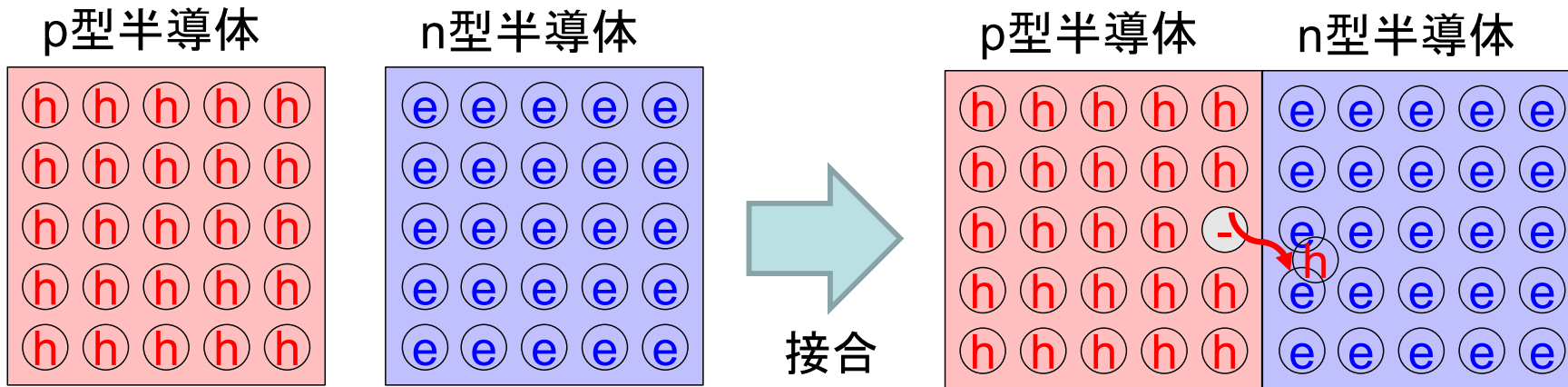
縦型・横型両方製造できる事が、アプリケーション展開に重要

pn接合ダイオード

- p形半導体とn形半導体を接合した2端子素子
 - 点接触形, 接合形などがある
 - 整流, 検波に用いる



pn接合の動作

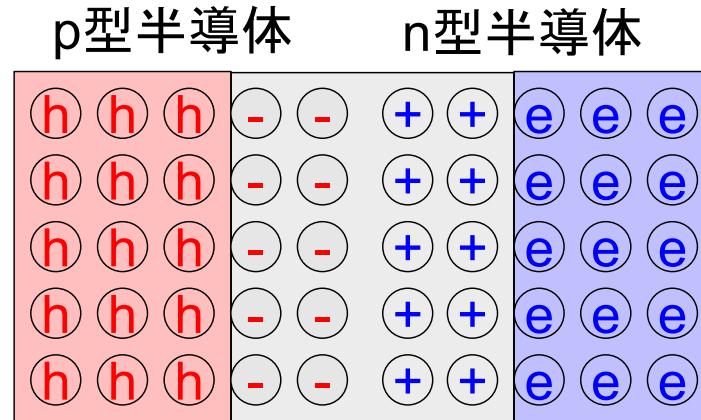


Ⓜ 正孔, 濃度 N_A Ⓜ 電子, 濃度 N_D

$$N_A > N_D$$

不純物濃度の濃いp型半導体の正孔が、
不純物濃度の低いn型半導体に拡散
正孔がなくなった不純物(アクセプタ)は負の固定電荷となる
n型半導体に拡散した正孔は電子と再結合する
電子がなくなった不純物(ドナー)は正の固定電荷となる

pn接合の動作



接合された定常状態

—————> 空間電荷による電界

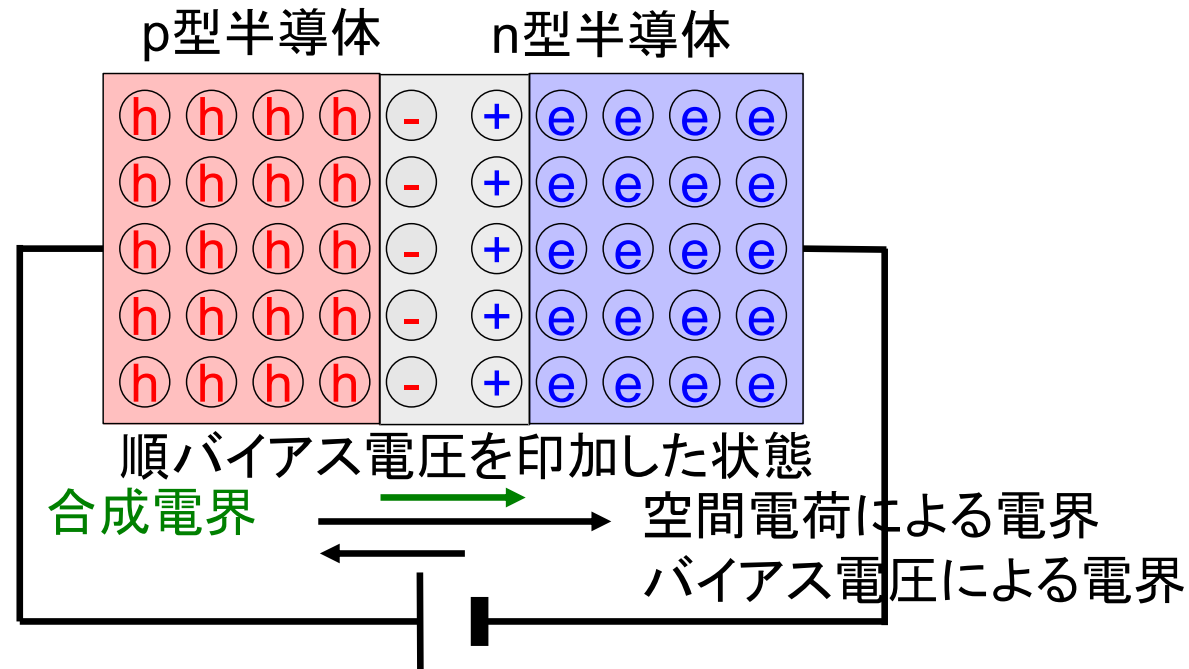
接合界面付近に正負の電荷の層(空乏層,空間電荷層)が形成される

正の電荷から負の電荷に向かって電界が発生

生じた電界が拡散を妨げる

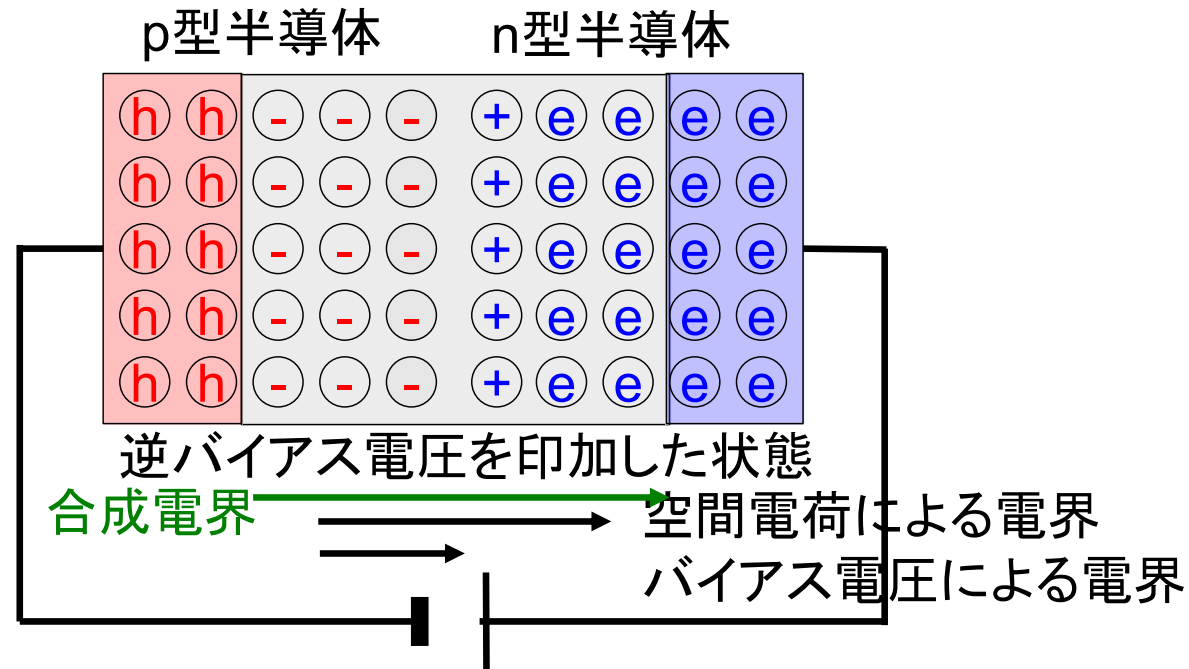
拡散電位, ビルトインポテンシャル:空乏層の端から端までの電界による電位差

pn接合の動作



p型半導体に正，n型半導体に負となる極性で外部から順バイアス電圧を印加
バイアス電圧による電界が空間電荷による電界を弱める
正孔がp型層からn型層に拡散，電子がn型層からp型層に拡散し拡散電流となる
電界により正孔，電子が運ばれドリフト電流となる

pn接合の動作



p型半導体に負, n型半導体に正となる極性で外部から逆バイアス電圧を印加
バイアス電圧による電界が空間電荷による電界を強める
正孔と電子の拡散が抑制され, 遮断状態となる

キャリアの輸送メカニズム

- 半導体を流れる電流
 - ドリフト電流と拡散電流の和
 - ドリフト電流
 - 電界によりキャリアが運ばれる
 - 拡散電流
 - キャリアの濃度勾配が平衡するよう拡散する
 - ドリフト現象と拡散現象の関係
 - アインシュタインの関係

ドリフト電流

- n型半導体中の電子電流密度 J_e
 - $J_e = qnv = qn\mu_e E$
- p型半導体中の正孔電流密度 J_h
 - $J_h = qp v = qp\mu_h E$
 - q :単位電荷, v :キャリアの速度, n :電子密度, μ_e :電子移動度, p :正孔密度, μ_h :正孔移動度, E :電界強度
 - 低電界において $v = \mu E$ が成り立つ
 - 高電界下では速度飽和が発生 $v \neq \mu E$

拡散電流

- 真性半導体

- 電子密度 n と正孔密度 p が等しい

- $p = n$

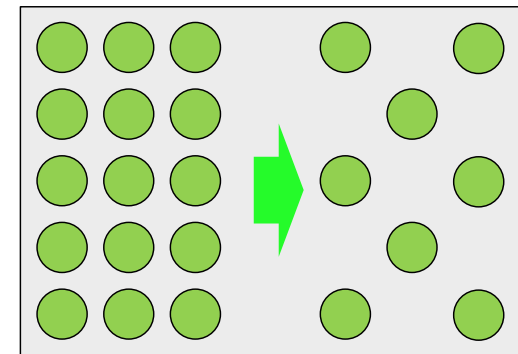
- 真性キャリア密度 n_i

- $n_i^2 = pn \sim 10^{10} \text{cm}^{-3}$

- 不純物半導体

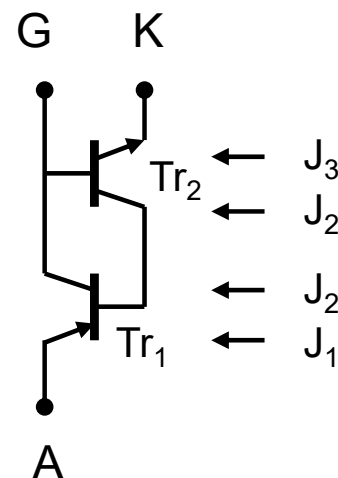
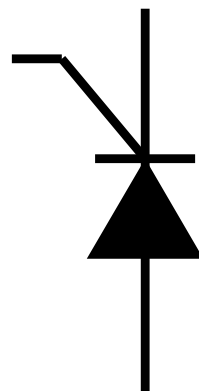
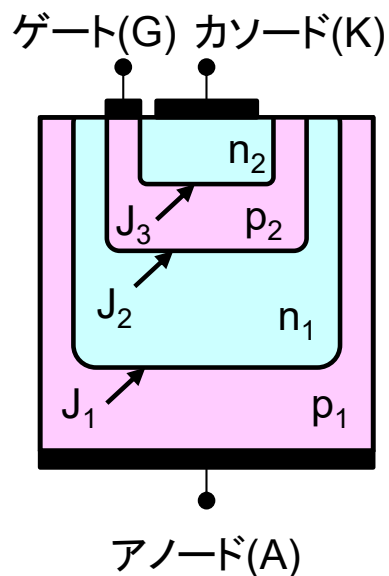
- $p, n \sim 10^{16 \sim 20} \text{cm}^{-3}$

- 密度が高いほうから低いほうへキャリアが拡散



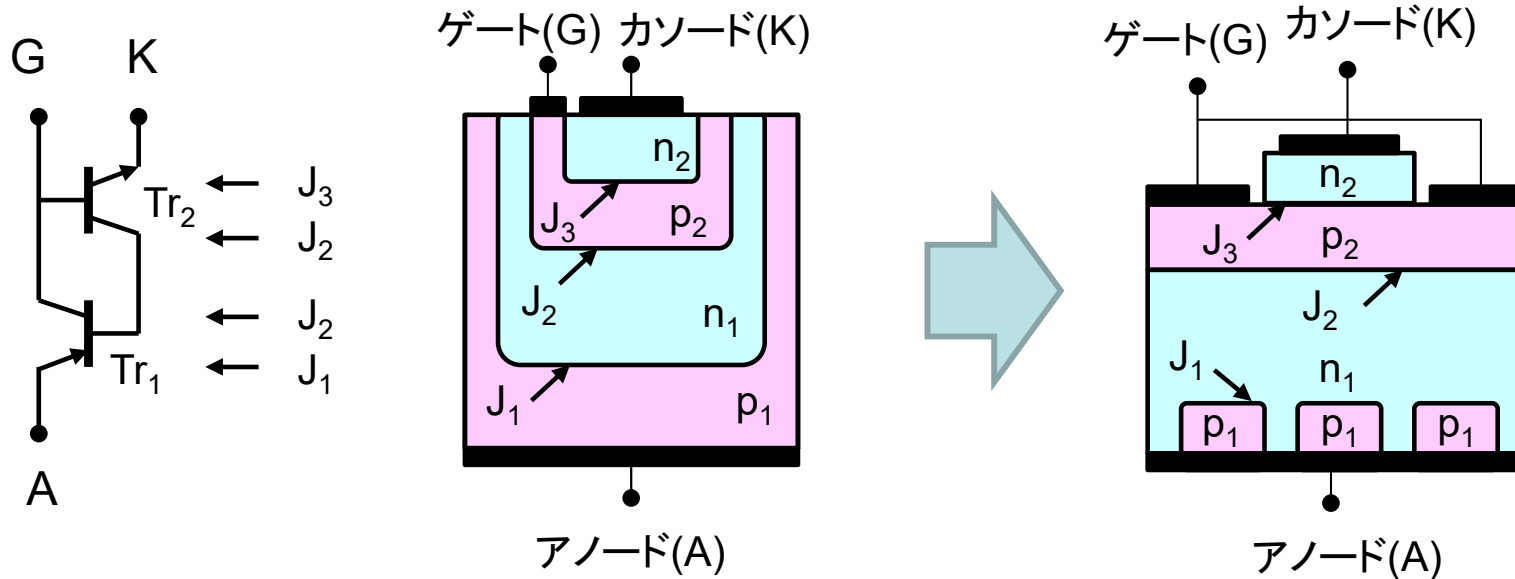
高密度 拡散 低密度

サイリスタ



- ターンオン
 - 接合J₃を順バイアス
 - 注入された電子が、高電界のかかっているJ₂で加速、なだれ破壊
 - 光直接点弧有
- ターンオフ
 - AK間電圧を小さくする、電圧の極性を反転
 - J₁, J₃逆バイアス

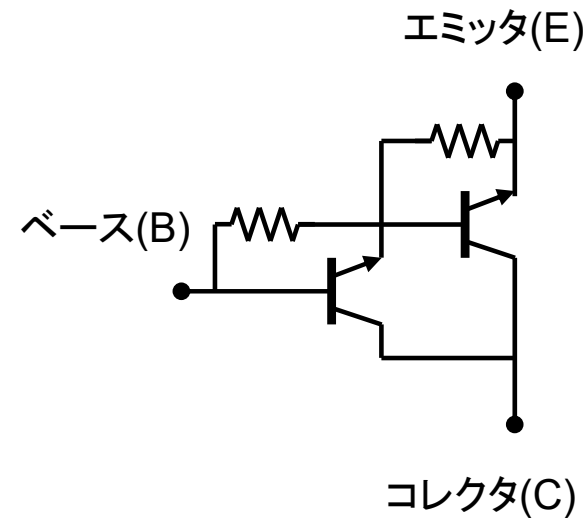
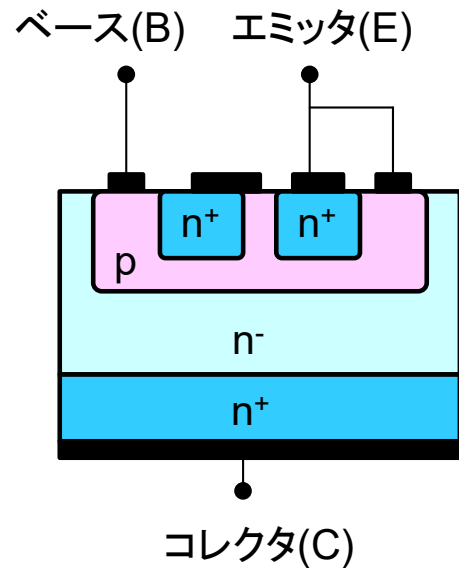
GTO



- GTOサイリスタ

- アノードは短絡エミッタ構造
 - 阻止状態で、急峻な電圧変化によるターンオンを防ぐ
- オン時は J_2 近傍にキャリアが蓄積
- ターンオフ時に J_2 のキャリアを引き抜く
 - 微細GTOの集合

パワーバイポーラトランジスタ



- パワー用として耐圧, 電流容量, 放熱を向上
 - コレクタ領域不純物濃度を下げ耐圧向上
 - N^+ 層を作りできるだけ低抵抗化
- ダーリントン接続構造