

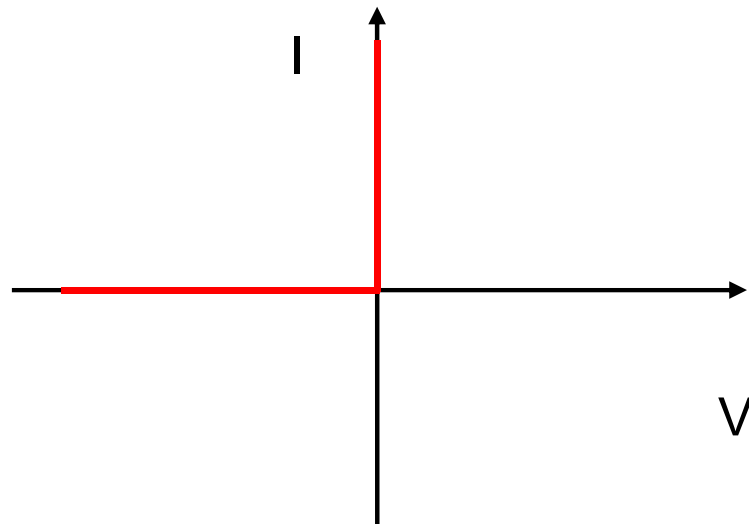
パワーエレクトロニクス
第三回 パワー半導体デバイス

平成31年4月24日

授業の予定

- パワーエレクトロニクスに必要な基礎知識
- 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

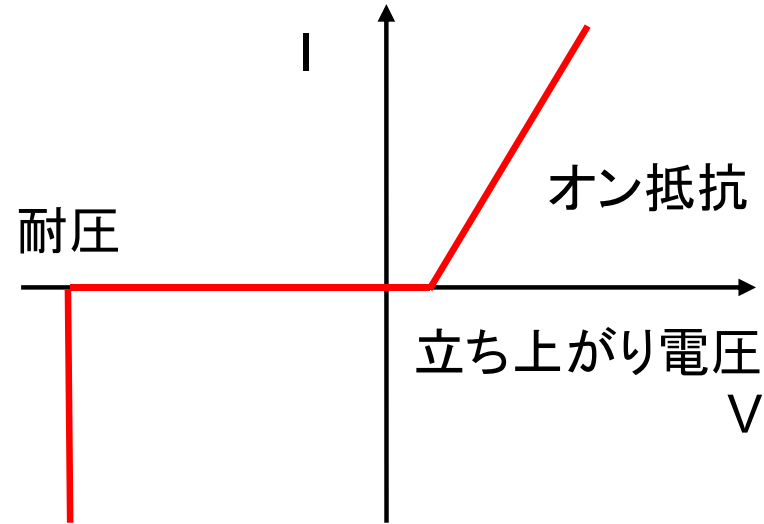
理想スイッチと実際の素子



理想スイッチの電圧電流特性



オフ時 $C=0$



実際の素子の電圧電流特性



オフ時 $C \neq 0$

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

- 密度が高いほうから低いほうへキャリアが拡散

- 電子の拡散電流密度 J_e

- $J_e = qD_e \frac{dn}{dx}$

- $\frac{dn}{dx}$: 濃度勾配, D_e : 拡散定数[cm²/s]

- 正孔の拡散電流密度 J_h

- $J_h = -qD_h \frac{dp}{dx}$

- $\frac{dp}{dx}$: 濃度勾配, D_h : 拡散定数[cm²/s]

半導体を流れる電流

- ドリフト電流と拡散電流の和

- 電子電流密度 J_e

- $J_e = q \left(n\mu_e E + D_e \frac{dn}{dx} \right)$

- 正孔電流密度 J_h

- $J_h = q \left(p\mu_h E - D_h \frac{dp}{dx} \right)$

- アインシュタインの関係

- $D = \frac{\mu kT}{q}$

拡散電位

- p型半導体とn型半導体のフェルミ準位の差により生じる
 - p型半導体のフェルミ準位 E_{Fp}
 - $E_{Fp} = E_V + kT \ln \frac{N_V}{p}$
 - N_V : 価電子帯の有効電子密度, E_V : 価電子帯の準位
 - n型半導体のフェルミ準位 E_{Fn}
 - $E_{Fn} = E_C - kT \ln \frac{N_C}{n}$
 - N_C : 導電帯の有効電子密度, E_C : 導電帯の準位

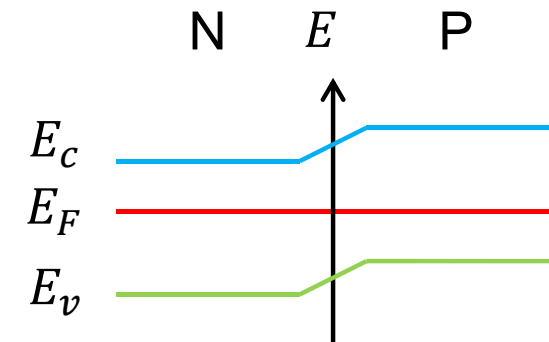
拡散電位

- 接合するとp型とn型半導体のフェルミ準位が一致する
 - フェルミ準位が一致するようp型とn型半導体の間で拡散電位 V_D が生じる

- $V_D = \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q}$

- 順バイアス電圧 V を加えた場合

- $V_D - V = \frac{E_{Fn} - E_{Fp}}{q}$



少数キャリアのふるまい

- マクスウェル-ボルツマン分布
 - p層空乏層始端の電子密度

$$\bullet n_{p0} = N_C e^{-\frac{E_{Cp} - E_{Fp}}{kT}}$$

- n層空乏層端の電子密度

$$\bullet n_{n0} = N_C e^{-\frac{E_{Cn} - E_{Fn}}{kT}}$$

$$\bullet \frac{n_{p0}}{n_{n0}} = e^{-\frac{E_{Cp} - E_{Cn}}{q}} = e^{-\frac{qV_D}{kT}}$$

少数キャリアのふるまい

- p層空乏層終端 $x = \infty$ の電子密度
 - 全て再結合 $\Delta n_p(\infty) = 0$
- p層中での少数キャリア分布
 - $\Delta n_p(x) = \Delta n_{p0} e^{-\frac{x}{L_e}}$
 - 少数キャリア拡散長 $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$
- 少数キャリアの拡散電流密度
 - $J_e(x) = qD_e \frac{d\Delta n_p}{dx} = -\frac{qD_e}{L_e} \Delta n_{p0} e^{-\frac{x}{L_e}}$

少数キャリアのふるまい

- n層からp層に注入される電子電流密度

- $J_n = -\frac{qD_en_{p0}}{L_e} \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$

- p層からn層に注入される正孔電流密度

- $J_p = -\frac{qD_hp_{n0}}{L_h} \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$

- pn接合の電流密度

- $J = -J_p + J_n = J_0 \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$

- $J_0 = q \left(\frac{D_en_{p0}}{L_e} - \frac{D_hp_{n0}}{L_h} \right)$

理想導通特性からのずれ

- 再結合電流

- 低印加電圧時の拡散電流が小さい場合
- 再結合電流密度

- $J_{rec} \approx \frac{qW}{2} S v_{th} N_t n_i e^{\frac{qV}{2kT}}$

- S : キャリア捕獲断面積, v_{th} : キャリア熱速度, N_t : トラップ密度

- 順方向電流密度

- $J_{fwd} \approx J_0 e^{\frac{qV}{kT}} + \frac{qW}{2} S v_{th} N_t n_i e^{\frac{qV}{2kT}} \propto e^{\frac{qV}{nkT}}$

- n : 理想因子。 $n = 1 \sim 2$ 拡散電流と再結合電流

理想導通特性からのずれ

- 高注入状態
 - 注入された少数キャリア密度が多数キャリア密度の同等以上になる状態
 - n型の高注入状態
 - $p_n = p_{n0} e^{\frac{qV}{kT}} \gg n_{n0} \approx N_d$
 - 注入された少数キャリアにより中性領域に内部電界が形成される
 - ドリフト電流が流れる

理想導通特性からのずれ

- 導通抵抗

- 中性領域ではキャリアのドリフトにより電流が流れる
 - 移動度, 電界強度に比例

- 生成電流

- 空乏層内でのキャリアの生成・消滅
- 逆電圧印加時はキャリアの生成による電流が支配的

- $$J_{gen} = \frac{qn_iW}{\tau_e}$$

- τ_e : 電子正孔対の生成に要する時間, W : 空乏層厚

pn接合のI-V特性

- pn接合の電流I-電圧V特性

- $I = I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right)$

- I_0 :飽和電流, q :単位電荷, k :ボルツマン定数, T :絶対温度, V :接合部電圧 I :接合部電流

- n :理想係数(1~2)。接合界面の影響を受ける

- ダイオードの端子電圧 V_t は, 接合電圧に電流による電圧降下が重畳される

- $V_t = V + RI$

遮断時のpn接合の特性

- pn接合に電圧Vを印加した場合の電荷密度分布と電位分布の関係

- ポアソンの方程式

$$\bullet \frac{d^2 \phi(x)}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

ρ :不純物濃度
 ϕ :ポテンシャル

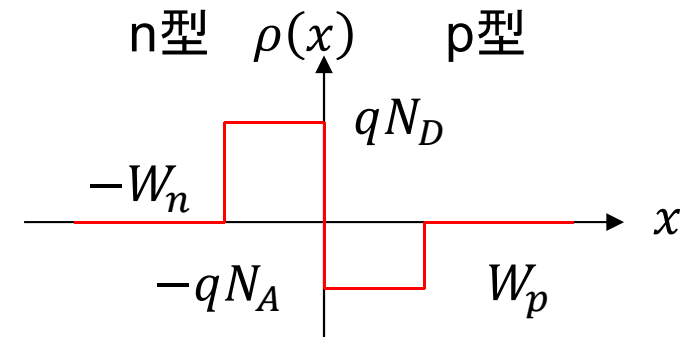
- 電荷密度分布

- 区間1 $x \leq -W_n$

- 区間2 $-W_n \leq x \leq 0$

- 区間3 $0 \leq x \leq W_p$

- 区間4 $W_p \leq x$



$$\frac{d^2 \phi_1(x)}{dx^2} = 0$$

$$\frac{d^2 \phi_2(x)}{dx^2} = \frac{qN_D}{\epsilon}$$

$$\frac{d^2 \phi_3(x)}{dx^2} = -\frac{qN_A}{\epsilon}$$

$$\frac{d^2 \phi_4(x)}{dx^2} = 0$$

空乏層幅

電荷中性条件

n層の空乏層内の全電荷量はp層の空乏層の全電荷量と等しい

$$N_D W_n = N_A W_p$$

- n型半導体中

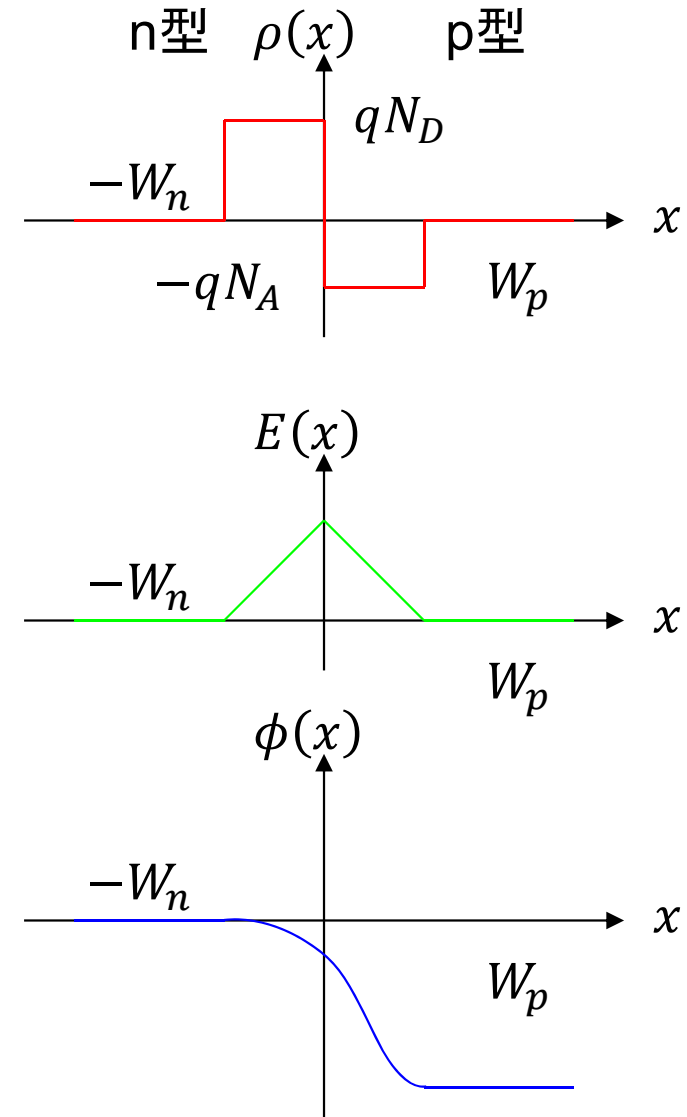
- $W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} \frac{N_A}{N_A+N_D} (V_D - V)}$

- p型半導体中

- $W_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_A} \frac{N_D}{N_A+N_D} (V_D - V)}$

- 合計

- $W = W_n + W_p$
 - $= \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \left(\frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) (V_D - V)}$



空乏層電荷量

- $$Q = q(W_n N_D + W_p N_A)$$
$$= q \sqrt{\frac{2\varepsilon}{q} \frac{V_D - V}{N_A + N_D}} \left(\sqrt{\frac{N_A}{N_D}} N_D + \sqrt{\frac{N_D}{N_A}} N_A \right)$$
$$= \sqrt{2q\varepsilon \frac{V_D - V}{N_A + N_D}} 2\sqrt{N_A N_D}$$
$$= 2 \sqrt{2q\varepsilon \frac{N_A N_D}{N_A + N_D}} \sqrt{V_D - V}$$

接合容量

- 積分容量

- $$C = \frac{Q}{V} = 2 \sqrt{2q\epsilon \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{\sqrt{V_D - V}}{V}}$$

- 微分容量

- $$C = \frac{dQ}{dV} = 2 \sqrt{2q\epsilon \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \left(\frac{1}{2}\right) (V_D - V)^{-\frac{1}{2}}}$$
$$= \sqrt{2q\epsilon \frac{N_A N_D}{(N_A + N_D)(V_D - V)}}$$

耐圧と抵抗

- 片側階段状接合 N_D : 不純物濃度
- 電位分布: $V(x) = -\frac{eN_D}{2\varepsilon_s}(x-w)^2$
 - 印加電圧に対する空乏層幅 $w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{eN_D}V}$
- 電界分布: $E(x) = -\frac{eN_D}{\varepsilon_s}(x-w)$
 - 最大電界強度 $E_{max} = E(0) = \sqrt{\frac{2eN_D}{\varepsilon_s}V}$

耐圧と抵抗

- 最大電界強度 E_{max} が半導体の破壊電界強度 E_C となる電圧(耐圧) V_{bd}

- $E_C = \sqrt{\frac{2eN_D}{\epsilon_s} V_{bd}} \rightarrow N_D = \frac{E_C^2 \epsilon_s}{2eV_{bd}}$

- $w_{bd} = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{e} \frac{2eV_{bd}}{E_C^2 \epsilon_s} V_{bd}} = \frac{2V_{bd}}{E_C}$

- オン抵抗 $R_d = \frac{w_{bd}}{\mu e N_D A} = \frac{1}{\mu e A} \frac{2V_{bd}}{E_C} \frac{2eV_{bd}}{E_C^2 \epsilon_s} = \frac{4V_{bd}^2}{\mu \epsilon_s E_C^3}$

- 耐圧の2乗に比例。破壊電界強度の3乗に反比例