

パワーエレクトロニクス
第四回 パワー半導体デバイス

平成30年5月9日

授業の予定

シラバスより

- 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(2回)
- 整流回路(2回)
- 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(2回)
- 演習

少数キャリアのふるまい

- 無バイアス電圧時
- p型半導体
 - p層空乏層端の電子濃度上昇
 - 過剰少数キャリア
 - p層中を少数キャリアが拡散
 - 拡散方程式より
 - $D_e \frac{d^2 \Delta n_p}{dx^2} - \frac{\Delta n_p}{\tau_e} = 0$
 - 電界0, キャリアの生成0

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

- $n_{p0} = n_{n0} e^{-\frac{qV_D}{kT}}$
- 順方向バイアス電圧印加時
 - $n_p = n_{n0} e^{-\frac{q(V_D - V)}{kT}} = n_{n0} e^{-\frac{qV_D}{kT}} e^{\frac{qV}{kT}} = n_{p0} e^{\frac{qV}{kT}}$
 - $\Delta n_p = n_p - n_{p0} = n_{p0} \left[e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right]$

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

- Nn型中性領域内での電子電流密度, 正孔電流密度

- $J_n = q \left(n_n \mu_n E + D_n \frac{dn_n}{dx} \right)$

- $J_p = q \left(p_n \mu_p E - D_p \frac{dp_n}{dx} \right)$

- 正孔の高注入状態では, 電子電流は正孔電流に比べて小さい

- $J_n = q \left(n_n \mu_n E + D_n \frac{dn_n}{dx} \right) = 0$

- $E = - \frac{D_n}{n_n \mu_n} \frac{dn_n}{dx} = - \frac{kT}{q n_n} \frac{dn_n}{dx}$

$$D_e = \frac{kT}{q} \mu_e$$

理想導通特性からのずれ

- 電荷中性の条件

- $N_n = N_d + p_n \approx p_n$

- $E = -\frac{kT}{qn_n} \frac{dn_n}{dx} \approx -\frac{kT}{qn_n} \frac{dp_n}{dx}$

- $J_p = q \left(p_n \mu_p E - D_p \frac{dp_n}{dx} \right) \approx -2qD_p \frac{dp_n}{dx}$

- $p_n = n_i e^{\frac{qV}{2kT}}$

- $J_p \propto e^{\frac{qV}{2kT}}$

理想導通特性からのずれ

- 直列抵抗
 - 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

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

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

ρ :不純物濃度
 ϕ :ポテンシャル

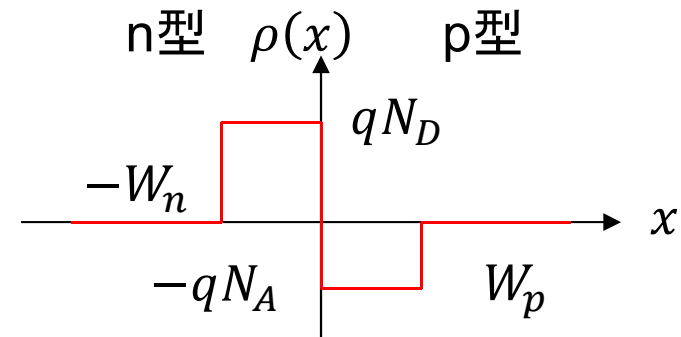
- 電荷密度分布

- 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 $W_p \leq x$



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

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

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

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

半導体中の電位分布

- ポテンシャルの境界条件

- $\phi_1(-\infty) = 0$
- $\phi_1(-W_n) = \phi_2(-W_n)$
- $\phi_2(0) = \phi_3(0)$
- $\phi_3(W_p) = \phi_4(W_p)$
- $\phi_4(\infty) = V - V_D$

- 電界強度の境界条件

- $\frac{d\phi_1(x)}{dx} = 0$
- $\frac{d\phi_1(-W_n)}{dx} = \frac{d\phi_2(-W_n)}{dx}$
- $\frac{d\phi_2(0)}{dx} = \frac{d\phi_3(0)}{dx}$
- $\frac{d\phi_3(W_p)}{dx} = \frac{d\phi_4(W_p)}{dx}$
- $\frac{d\phi_4(x)}{dx} = 0$

半導体中の電位分布

• 電界強度の分布

- $x \leq -W_n$ $E_1(x) = 0$
- $-W_n \leq x \leq 0$
 $E_2(x) = -\frac{qN_D}{\varepsilon}(x + W_n)$
- $0 \leq x \leq W_p$
 $E_3(x) = \frac{qN_A}{\varepsilon}(x - W_p)$
- $W_p \leq x$ $E_4(x) = 0$

$$\phi_3(W_p) = -V + V_D = \frac{q}{2\varepsilon}(N_A W_p^2 + N_D W_n^2)$$

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

$$N_D W_n = N_A W_p$$

• ポテンシャルの分布

- $x \leq -W_n$ $\phi_1(x) = 0$
- $-W_n \leq x \leq 0$ $\phi_2(x) = -\frac{qN_D}{2\varepsilon}(x + W_n)^2$
- $0 \leq x \leq W_p$
 $\phi_3(x) = \frac{qN_A}{2\varepsilon}(x - W_p)^2 - \frac{q}{2\varepsilon}(N_A W_p^2 + N_D W_n^2)$
- $\phi_4(x) = V - V_D$

空乏層幅

- n型半導体中

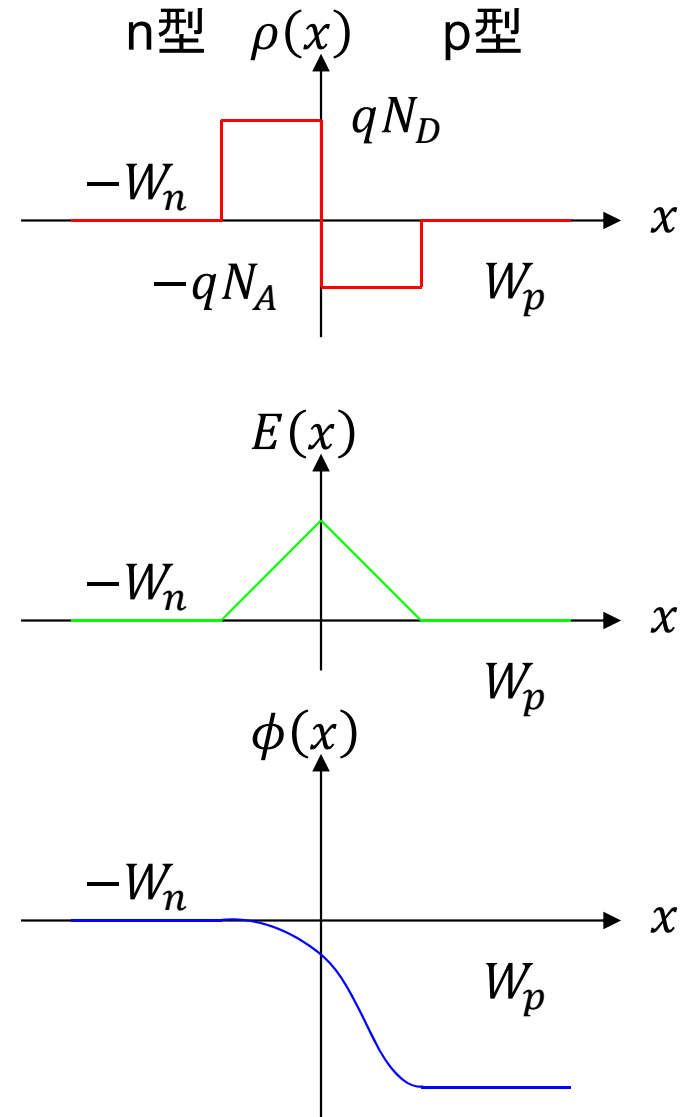
$$W_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} \frac{N_A}{N_A+N_D} (V_D - V)}$$

- 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

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



接合容量

- 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}

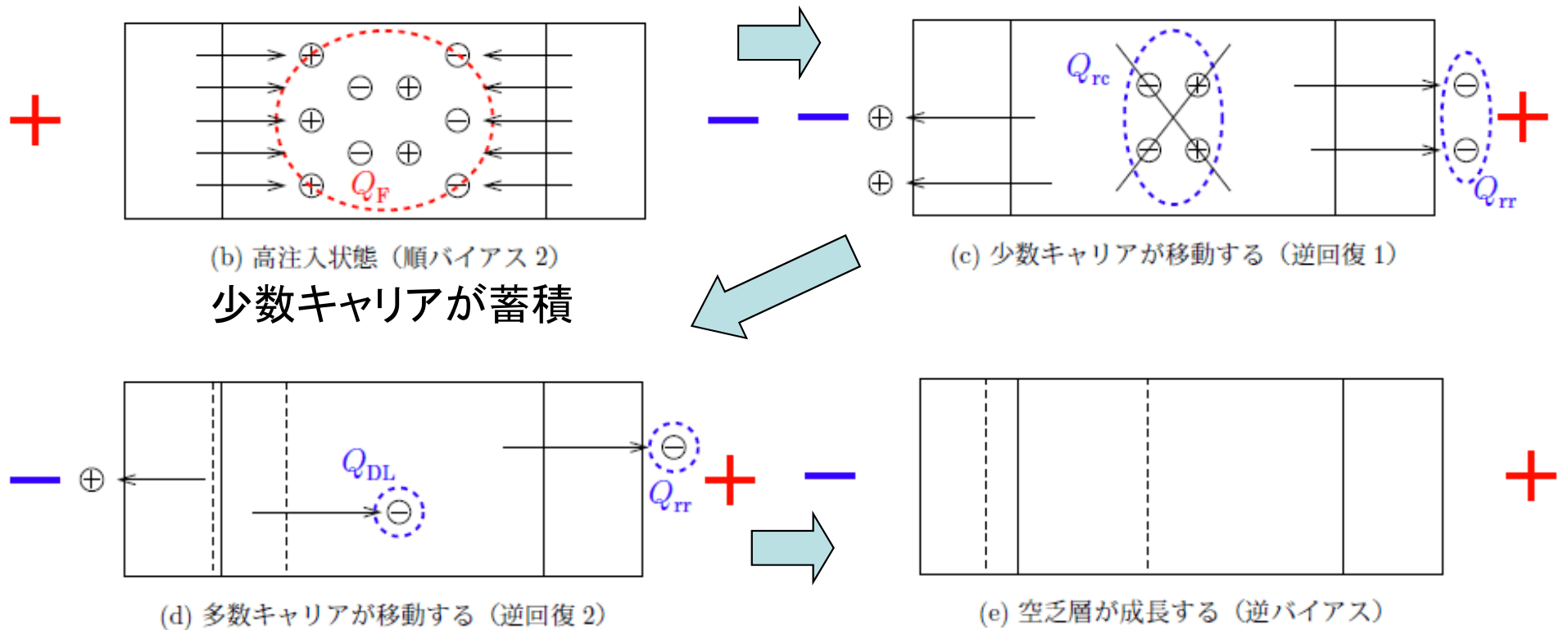
- $$E_C = \sqrt{\frac{2eN_D}{\epsilon_s} V_{bd}} \rightarrow N_D = \frac{E_C^2 \epsilon_s}{2eV_{bd}}$$

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

- 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

PNダイオードのスイッチング損失 逆回復現象



ショットキバリアダイオードでは逆回復現象は生じない