

パワーエレクトロニクス  
第二回 パワー半導体デバイス

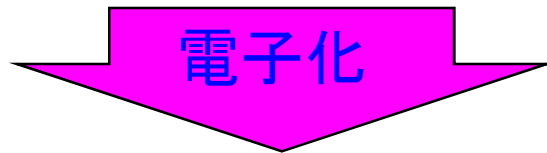
2020年4月22日

# 授業の予定

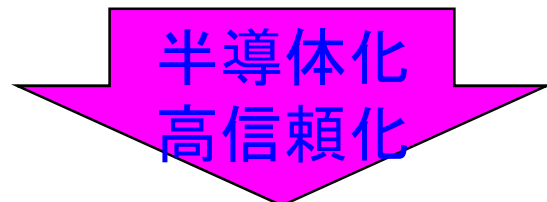
- パワーエレクトロニクス緒論
- パワーエレクトロニクスにおける基礎理論
- パワー半導体デバイス
- 整流回路
- 整流回路の交流側特性と他励式インバータ
- 交流電力制御とサイクロコンバータ
- 直流チョッパ
- DC-DCコンバータと共振形コンバータ
- 自励式インバータ
- 演習

# パワー半導体デバイスの変遷

- 回転整流器
  - 電気機械変換



- 水銀整流器
  - 真空管

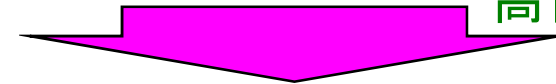


- Siダイオード
- Siサイリスタ

2020/04/22

素子構造  
可制御化  
半導体プロセス  
パワエレ-2

- 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
  - 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

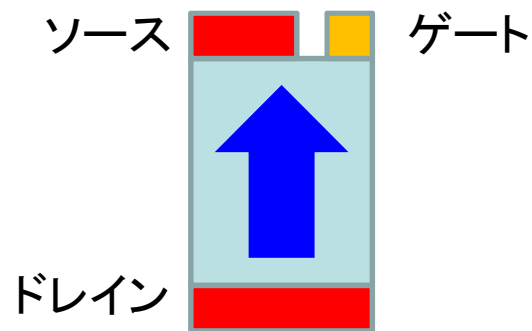
# パワー半導体デバイスの分類 分け方その②

- 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

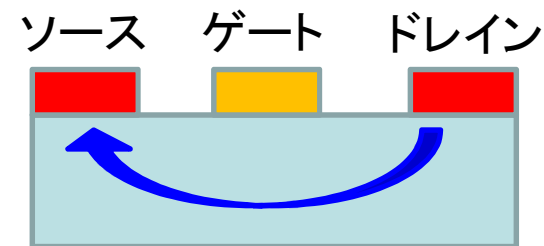
## • 縦型デバイス

- 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



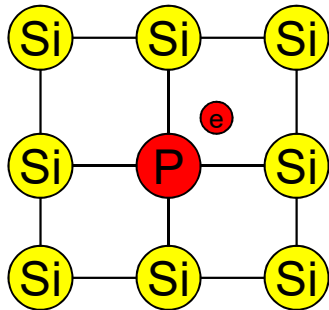
縦型・横型両方製造できる事が、アプリケーション展開に重要

# 半導体

- 半導体(Si, Ge等)
  - 真性半導体
    - $10^{-2} \sim 10^4 \Omega\text{m}$
    - 絶対零度では絶縁体
    - 温度が上がると電子と正孔が電流を運ぶ
  - 不純物半導体
    - 不純物を導入して, 伝導電子や正孔を供給
    - P形, N形
- 絶縁体
  - 外部から電界を印加しても電流は流れない
- 金属
  - 電界を印加すると, 電流が良く流れる

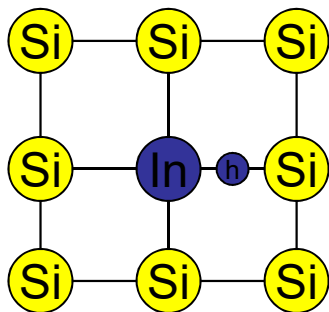
# 半導体

## • N型半導体



- シリコン等の4族(元素の周期表の左から4番目)の真性半導体にアンチモン(Sb), リン(P)等の5族の不純物(ドナー)を加えて作る半導体.
- 結晶を構成する電子が余り, 自由電子となり電気伝導が行われる。

## • P型半導体

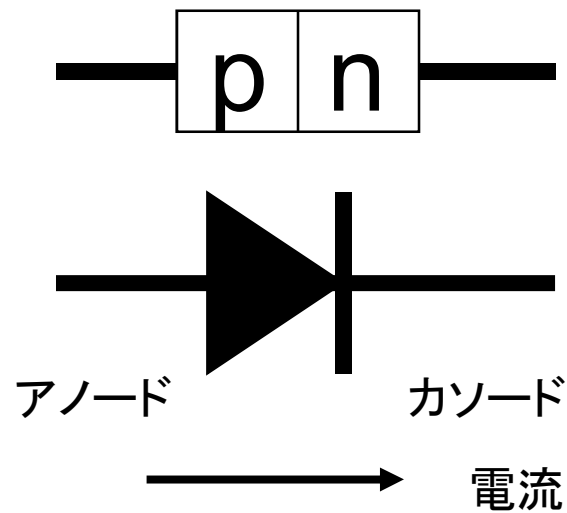


- シリコン等の4族の真性半導体にホウ素(B), インジウム(In)等の3族の不純物(アクセプタ)を加えて作る半導体.
- 結晶を構成する電子が不足し, 正孔となり電気伝導が行われる。
- 自由電子や正孔をキャリアと呼ぶ

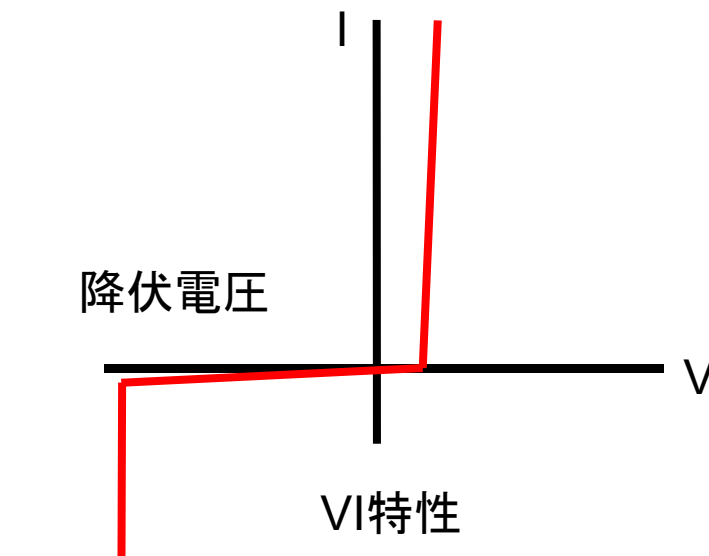


# pn接合ダイオード

- 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



2020/04/22



パウエレ-2

# pn接合のI-V特性

- pn接合の電流I-電圧V特性

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

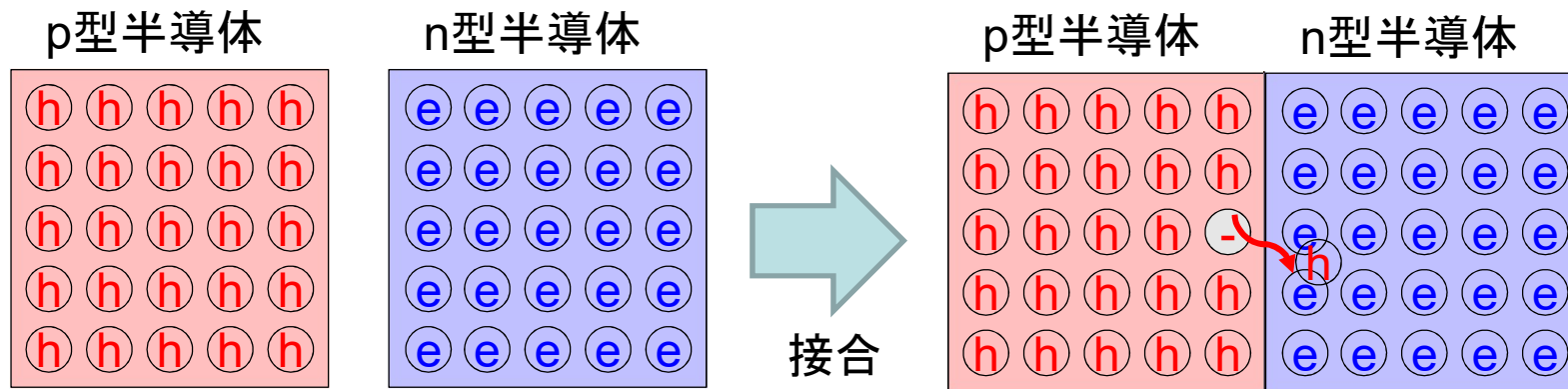
- $I_0$ :飽和電流,  $q$ :単位電荷,  $k$ :ボルツマン定数,  $T$ :絶対温度,  $V$ :接合部電圧,  $I$ :接合部電流

- $n$ :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

- $V_t = V + RI$

# pn接合の動作



分離された状態

Ⓜ 正孔, 濃度 $N_A$    Ⓜ 電子, 濃度 $N_D$

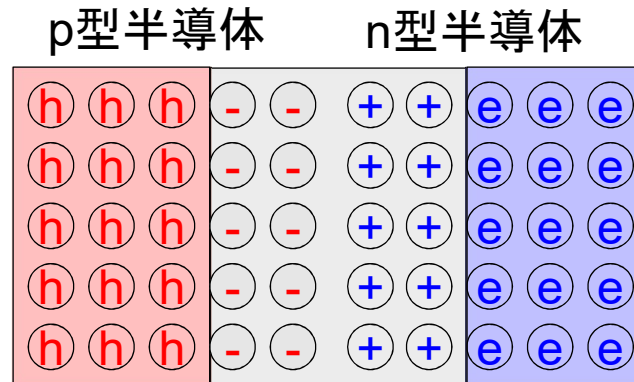
$$N_A > N_D$$

接合された状態

(接合された直後)

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

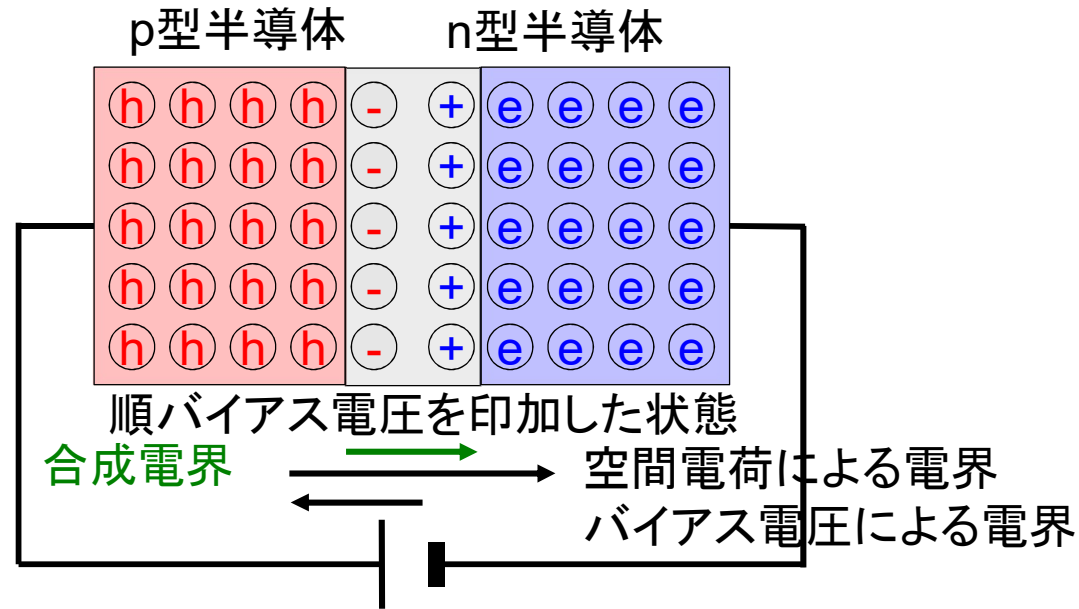
接合界面付近に正負の電荷の層(空乏層,空間電荷層)が形成される

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

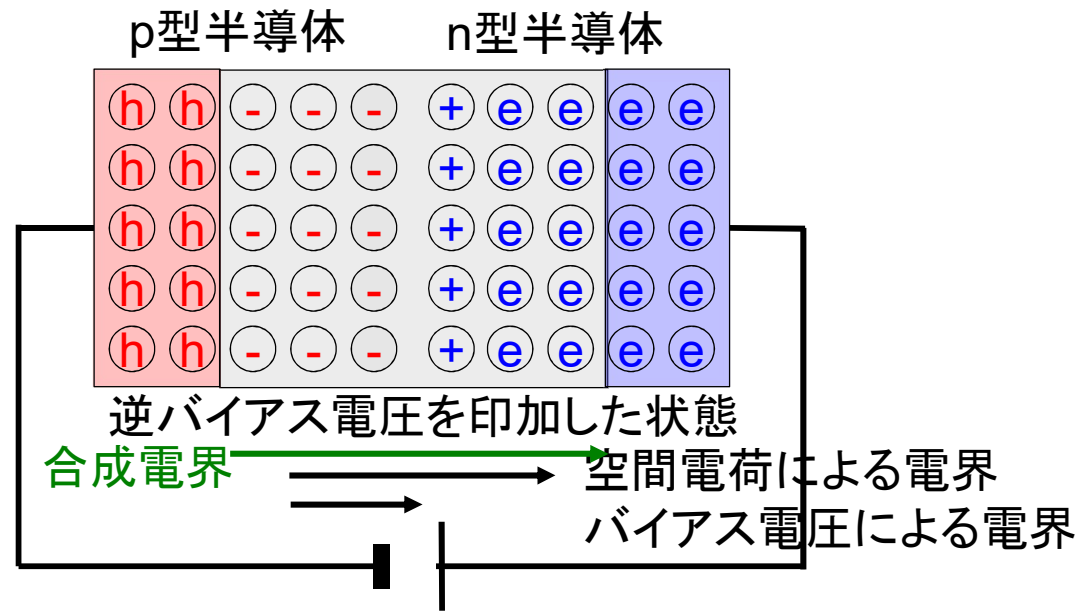
拡散電位, ビルトインポテンシャル:空乏層の端から端までの電界による電位差

# pn接合の動作



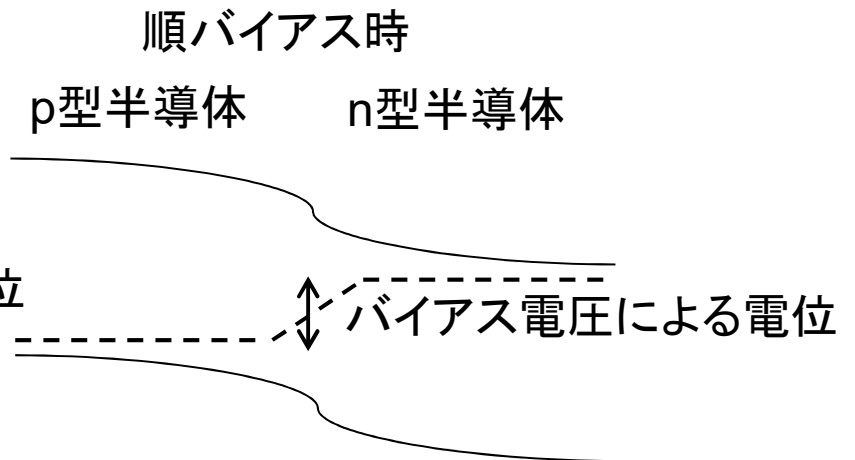
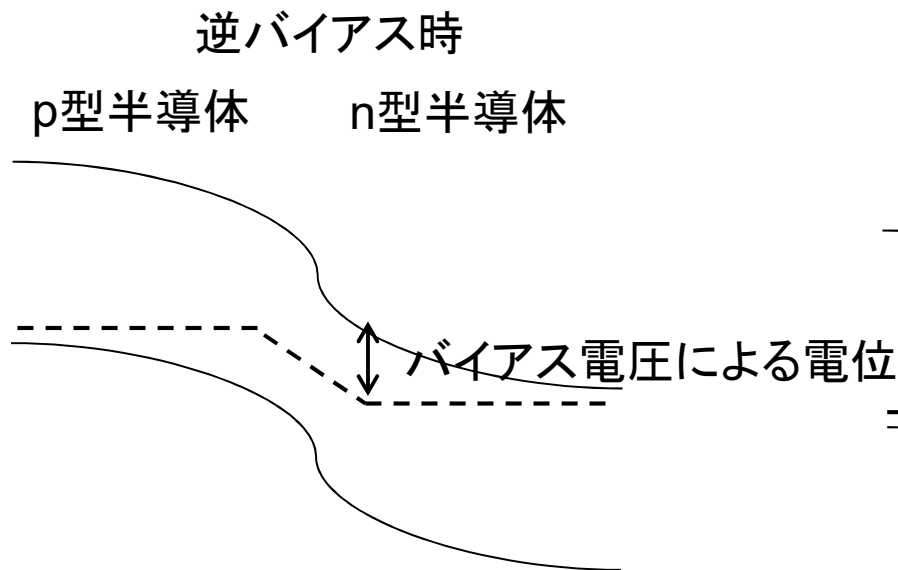
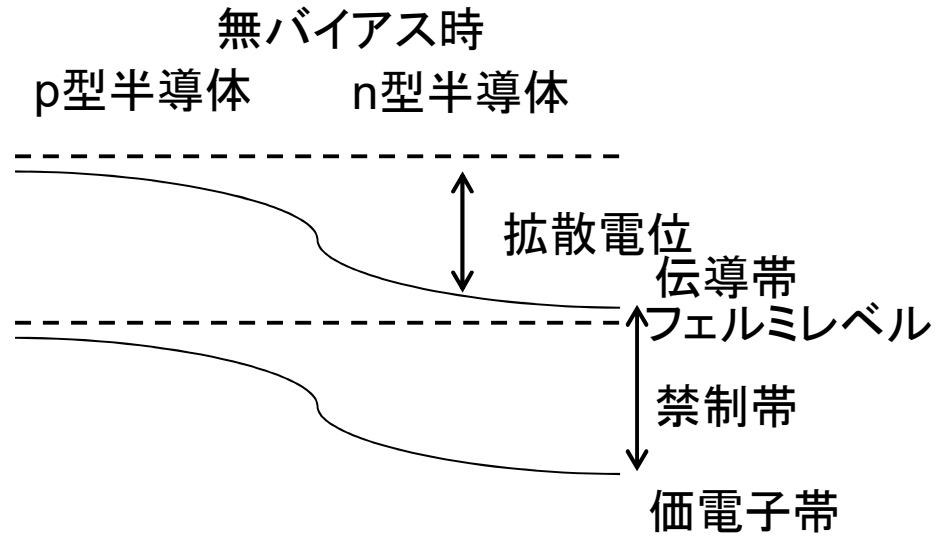
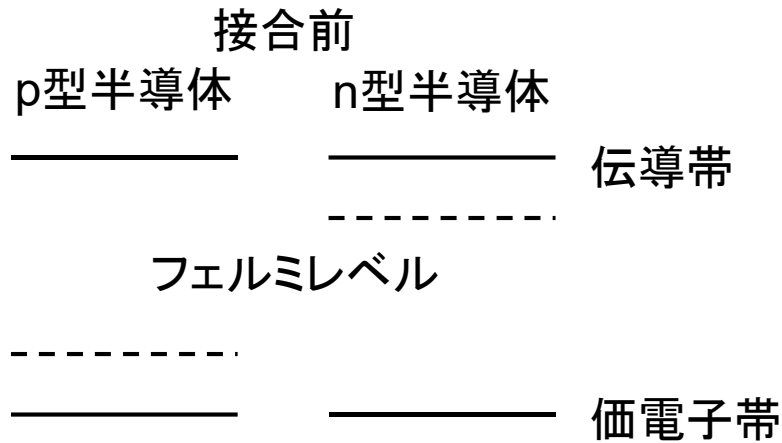
p型半導体に正, n型半導体に負となる極性で外部から順バイアス電圧を印加  
バイアス電圧による電界が空間電荷による電界を弱める  
正孔がp型層からn型層に拡散, 電子がn型層からp型層に拡散し拡散電流となる  
電界により正孔, 電子が運ばれドリフト電流となる

# 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

# pn接合のバンド図



# 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 $J_h$ 
  - $J_h = qp v = qn\mu_h E$
  - $q$ :単位電荷,  $v$ :キャリアの速度,  $n$ :電子密度,  $\mu_e$ :電子移動度,  $p$ :正孔密度,  $\mu_h$ :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

- $p = n$

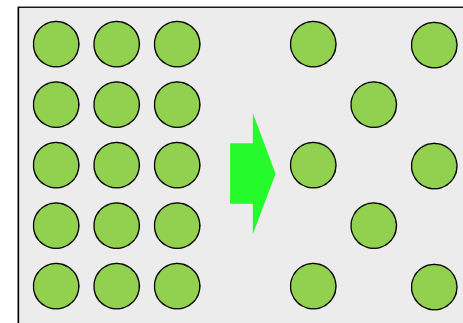
- 真性キャリア密度 $n_i$

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

- 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

# 拡散電流

- 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 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]

- 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 [ $\text{cm}^2/\text{s}$ ]

# 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

- 位置 $x$ における電界強度(p型)

- $E(x) = -\frac{V(x)}{dx}$

- 位置 $x$ における正孔密度

- $p(x) = C e^{-\frac{qV(x)}{kT}}$

- $C$ :定数

- キャリア密度勾配

- $\frac{dp}{dx} = \frac{dV}{dx} \frac{dp}{dV} = \frac{dV}{dx} \frac{-q}{kT} p = \frac{qp}{kT} E$

- $\frac{dp}{dV} = -\frac{q}{kT} C e^{-\frac{q}{kT}} = -\frac{q}{kT} p$

# アインシュタインの関係

- 熱平衡状態で電流は流れない

- $J_h = q \left( p\mu_h E - D_h \frac{dp}{dx} \right) = 0$

- $p\mu_h E = D_h \frac{dp}{dx} = D_h \frac{qp}{kT} E \rightarrow \mu_h = D_h \frac{q}{kT}$

- 拡散定数と移動度は比例する

- p型半導体  $D_h = \frac{kT}{q} \mu_h$

- n型半導体  $D_e = \frac{kT}{q} \mu_e$

# 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

- 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

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

- $S$ : 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

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

- $n$ : 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

- n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
    - $J_{gen} = \frac{qn_iW}{\tau_e}$
    - $\tau_e$ : 電子正孔対の生成に要する時間,  $W$ : 空乏層厚

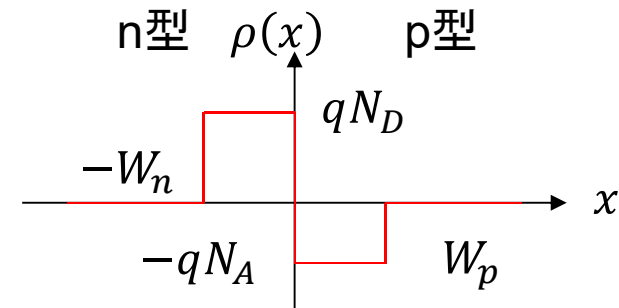
# 遮断時のpn接合の特性

- 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

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

$\rho$ :不純物濃度  
 $\phi$ :ポテンシャル



- 電荷密度分布

- 区間1

$$x \leq -W_n$$

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

- 区間2

$$-W_n \leq x \leq 0$$

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

- 区間3

$$0 \leq x \leq W_p$$

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

- 区間4

$$W_p \leq x$$

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

# 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

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

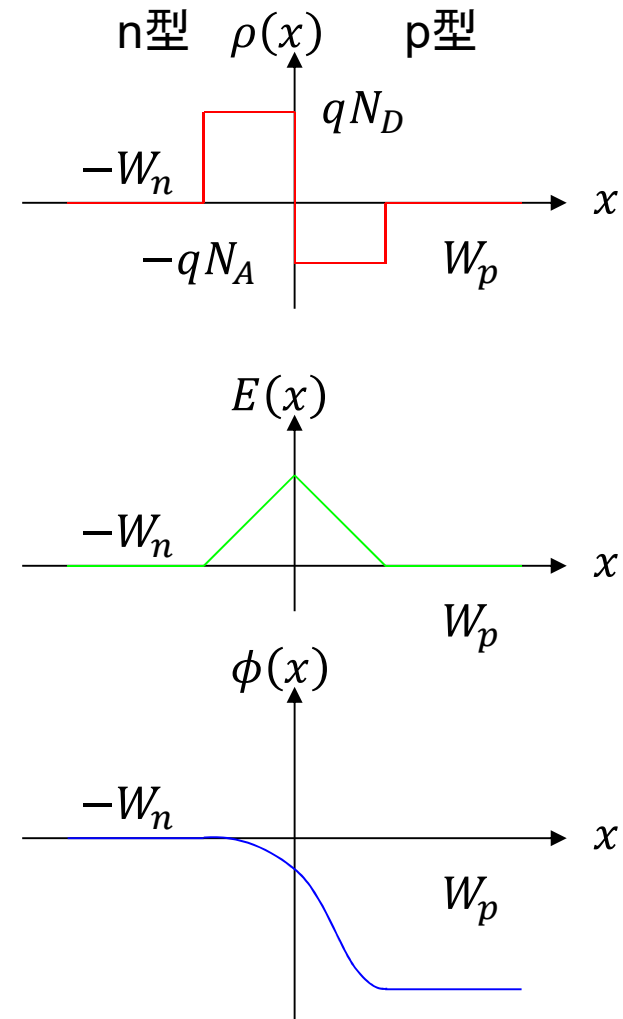
- p型半導体中

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

- 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

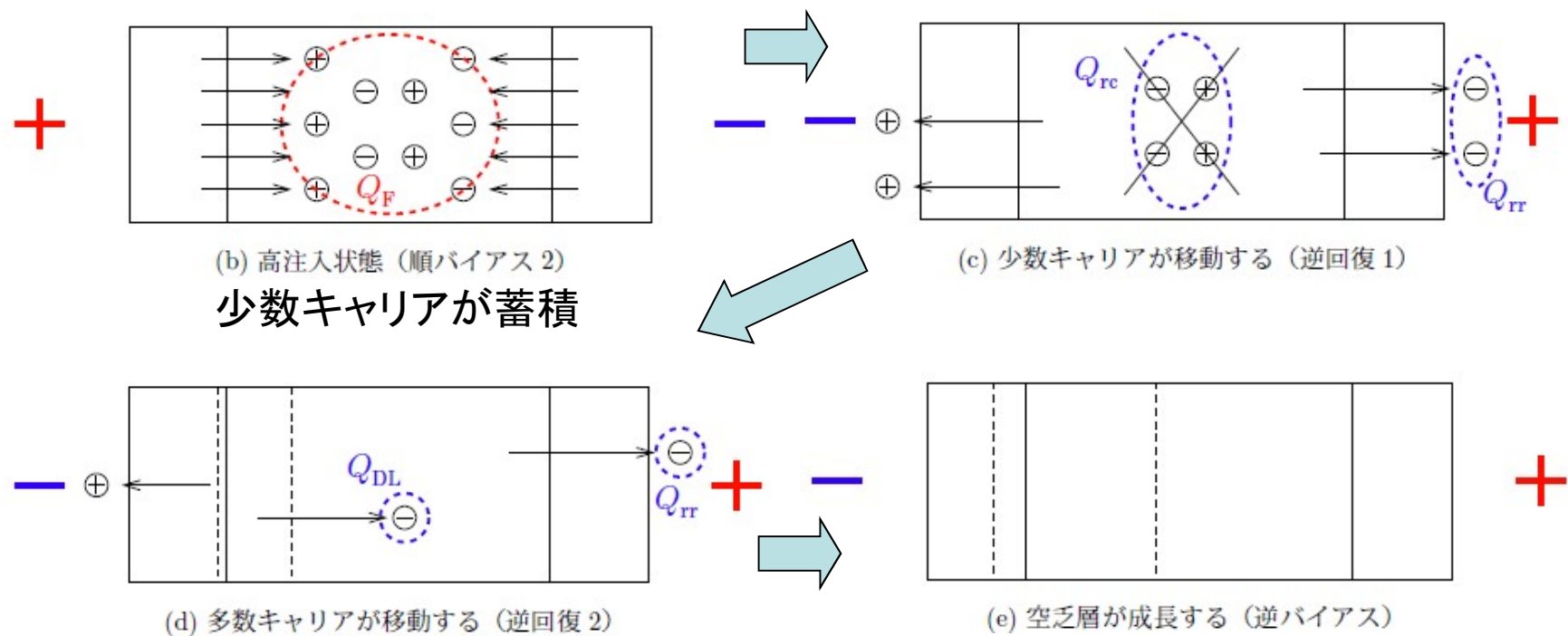
- $C = \frac{Q}{V} = 2 \sqrt{2q\epsilon \frac{N_A N_D}{N_A + N_D} \frac{\sqrt{V_D - V}}{V}}$

- 微分容量

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



# 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

# 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