

# パワーエレクトロニクス

## 第二回 パワー半導体デバイス

2021年4月21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

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, Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>
  - 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

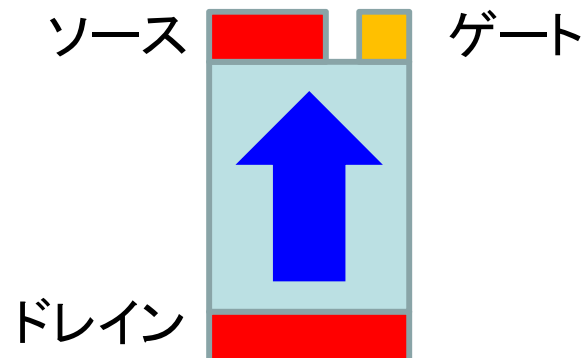
# パワー半導体デバイスの分類 分け方その②

- 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

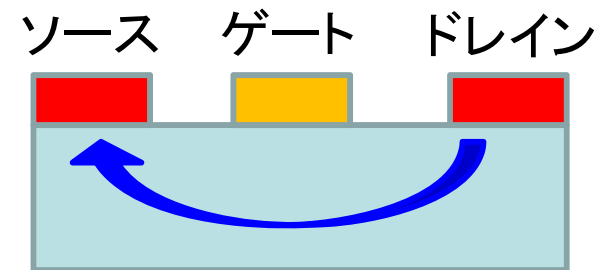
## 縦型デバイス

- 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

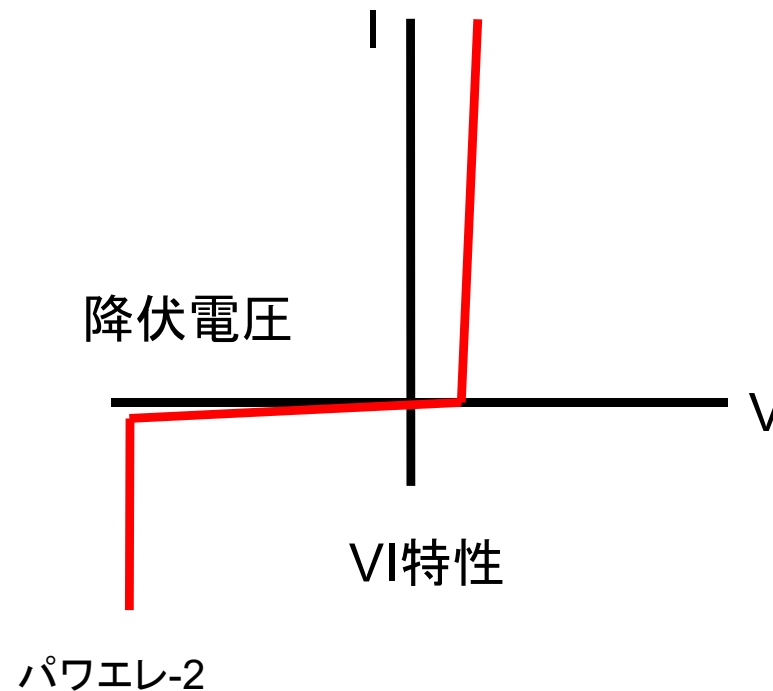
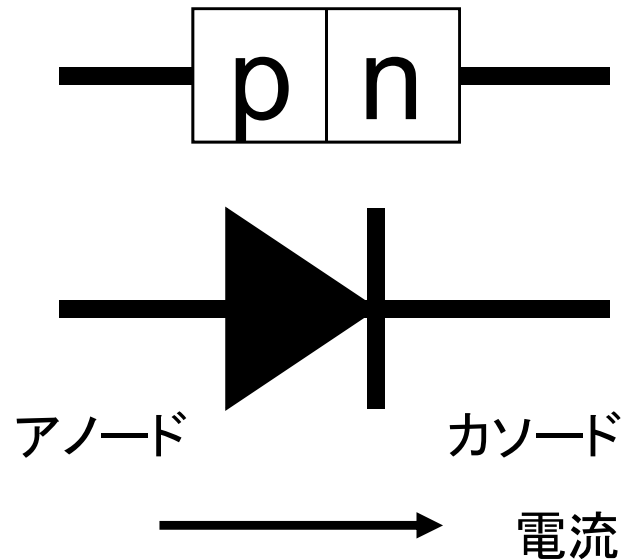
- ゲート駆動回路, 保護回路等との集積化が可能



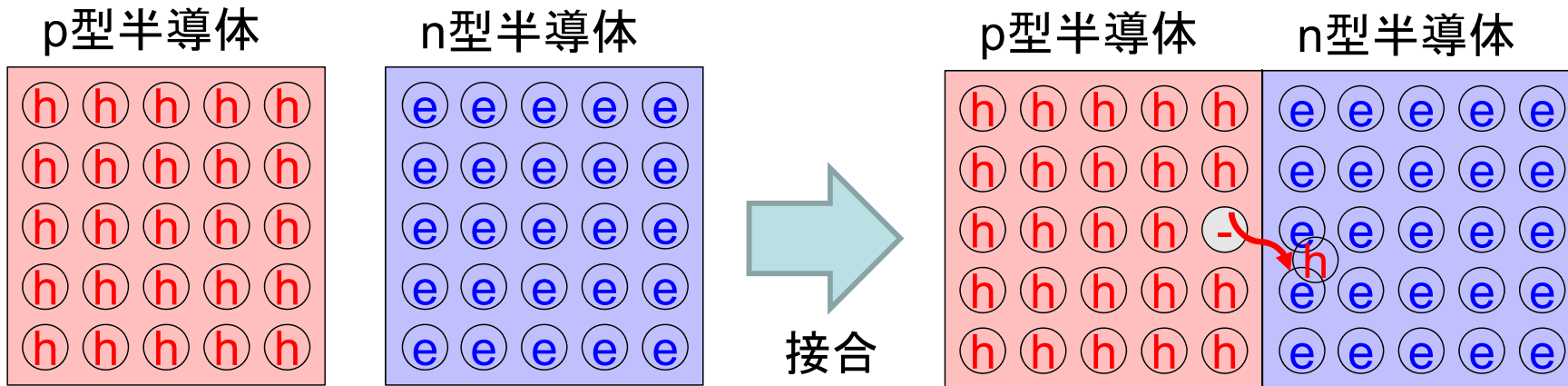
縦型・横型両方製造できる事が、アプリケーション展開に重要

# 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



分離された状態

Ⓜ 正孔, 濃度  $N_A$    Ⓜ 電子, 濃度  $N_D$

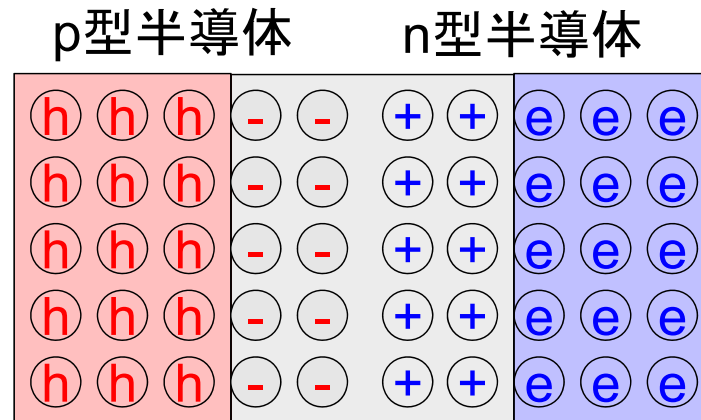
$$N_A > N_D$$

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

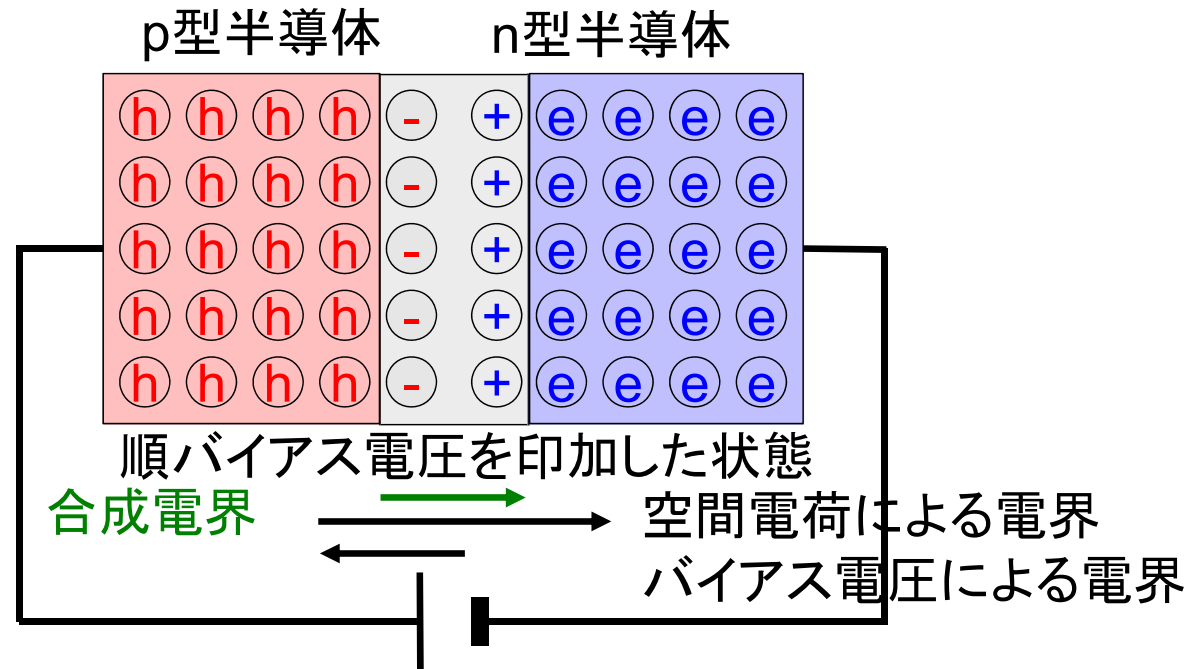
接合界面付近に正負の電荷の層(空乏層,空間電荷層)が形成される

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



# 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,  $\mu_e$ :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

- $p = n$

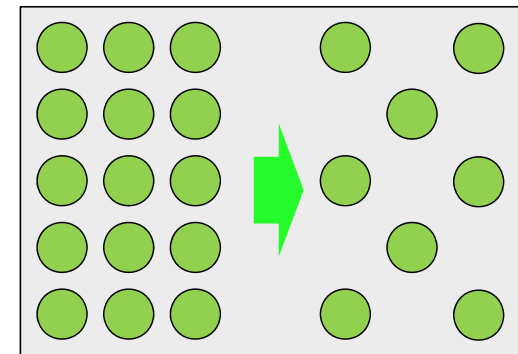
- 真性キャリア密度 $n_i$

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

- 不純物半導体

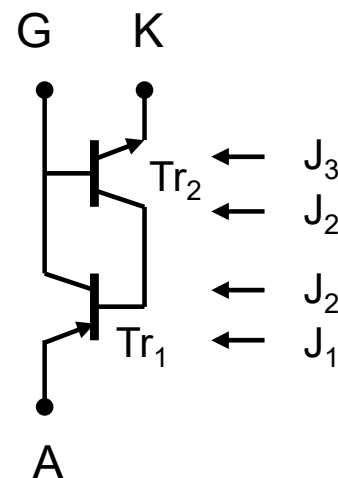
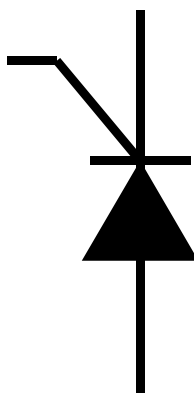
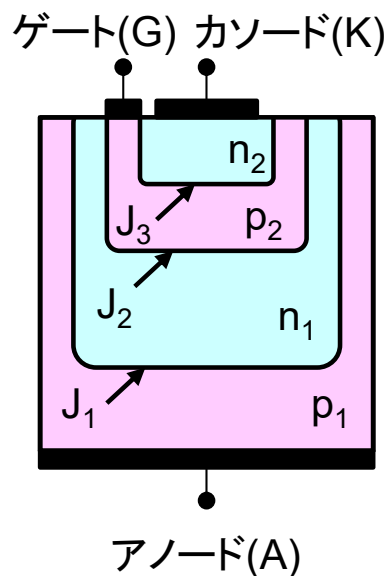
- $p, n \sim 10^{16 \sim 20} \text{cm}^{-3}$

- 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

# サイリスタ



- ターンオン
  - 接合 $J_3$ を順バイアス
    - 注入された電子が、高電界のかかっている $J_2$ 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
  - $J_1, J_3$ 逆バイアス