パワーエレクトロニクス
第二回　パワー半導体デバイス

2026年4月15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

パワーデバイスの種類と構造

- サイリスタ
- GTO
- バイポーラトランジスタ
- パワーMOSFET
- IGBT

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_2O_3
  - 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

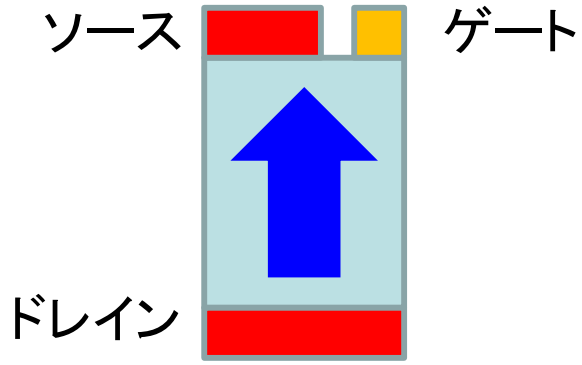
- バイポーラ系
  - 少数キャリアで導電
    - N形半導体に注入された正孔
    - P形半導体に注入された電子
  - 代表的デバイス
    - PNダイオード
    - トランジスタ
      - NPN,PNP,IGBT含
    - サイリスタ
      - GTO,GCT含
- ユニポーラ系
  - 多数キャリアで導電
    - N形半導体の電子
    - P形半導体の正孔
  - 代表的デバイス
    - ショットキーバリアダイオード
    - FET
      - MOSFET
      - JFET

パワー半導体デバイスの分類
分け方その②

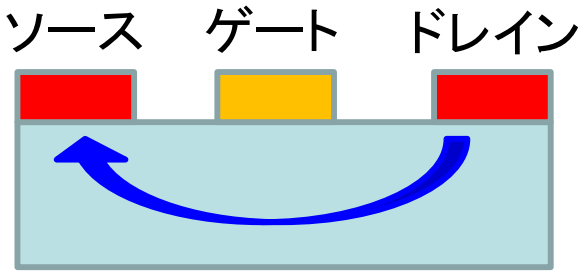
- 自然消弧素子
  - ターンオフ
    - 非可制御
      - 外的要因により決まる
  - ターンオン動作
    - 非可制御
      - ダイオード
    - 可制御
      - サリイスタ, トライアック
- 自己消弧素子
  - ゲート駆動
    - ターンオン
    - ターンオフ
  - ゲート駆動方式
    - 電流制御型
      - バイポーラトランジスタ
      - GTO, GCT
    - 電圧制御型
      - MOSFET
      - IGBT

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



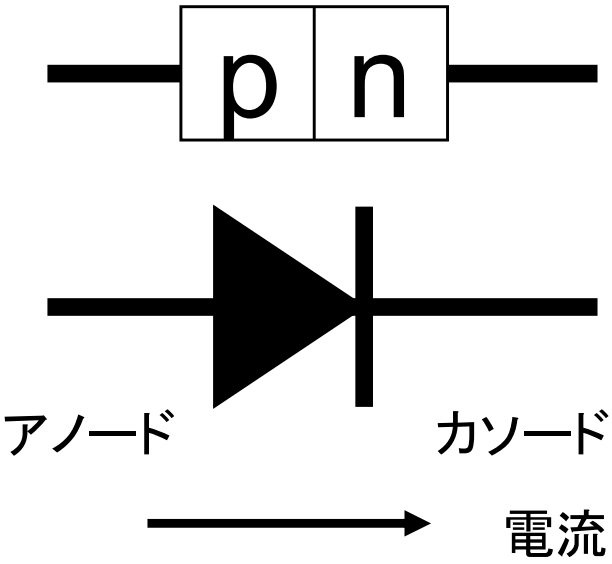
- 横型デバイス
  - ゲート駆動回路，保護回路等との集積化が可能

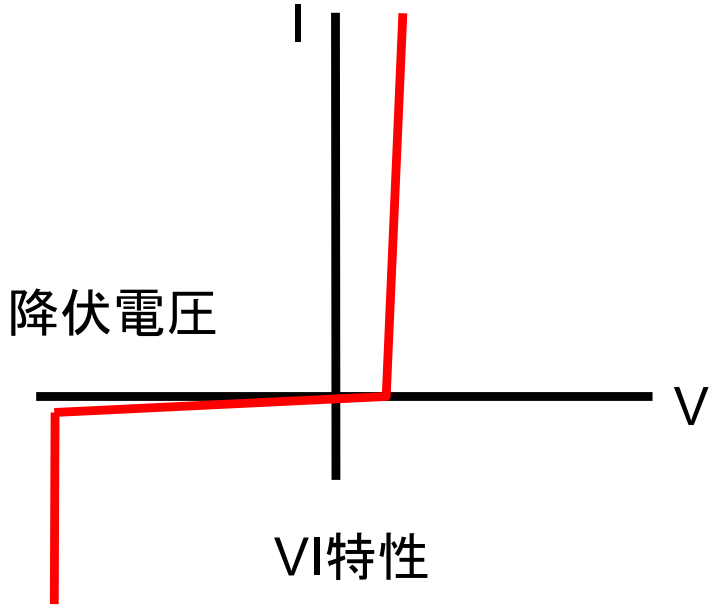


縦型・横型両方製造できる事が，アプリケーション展開に重要

pn接合ダイオード

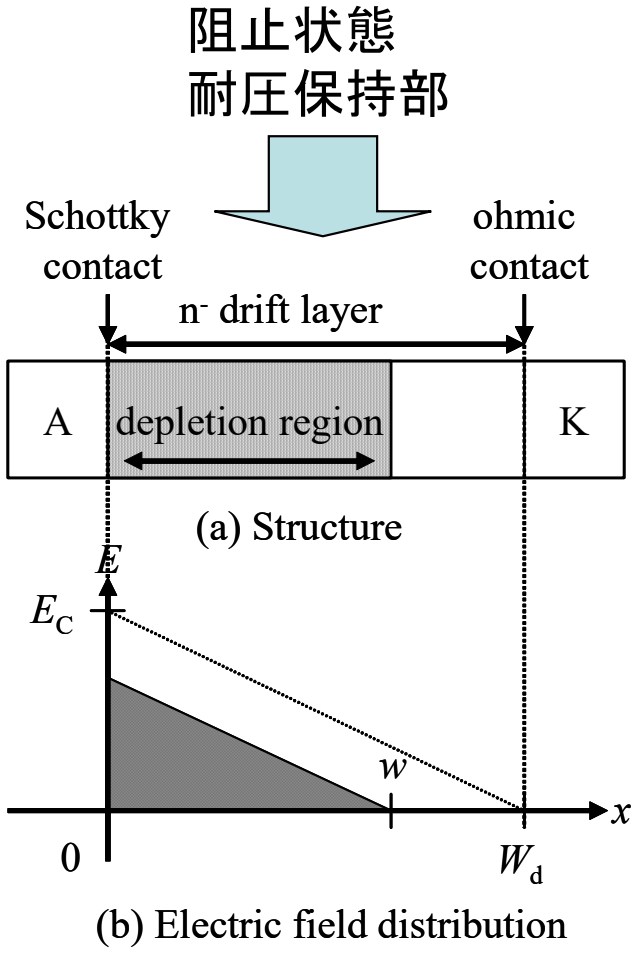
- p形半導体とn形半導体を接合した2端子素子
  - 点接触形，接合形などがある
  - 整流，検波に用いる





半導体デバイスの高耐圧化と抵抗

例　ショットキバリアダイオード



通常構造

- 電界と電荷分布
  - ポアソンの式

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2}=\frac{dE(x)}{dx}=-\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s}$$

  - 一様な不純物濃度分布

$$\rho(x)=const=-eN_d$$

  - 電圧分布

$$V(x)=-\frac{eN_d}{2\varepsilon_s}(x-w)^2$$

$$w=\sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{eN_d}}\sqrt{V_{ka}}$$

半導体デバイスの高耐圧化と抵抗

- 耐圧と絶縁破壊電界

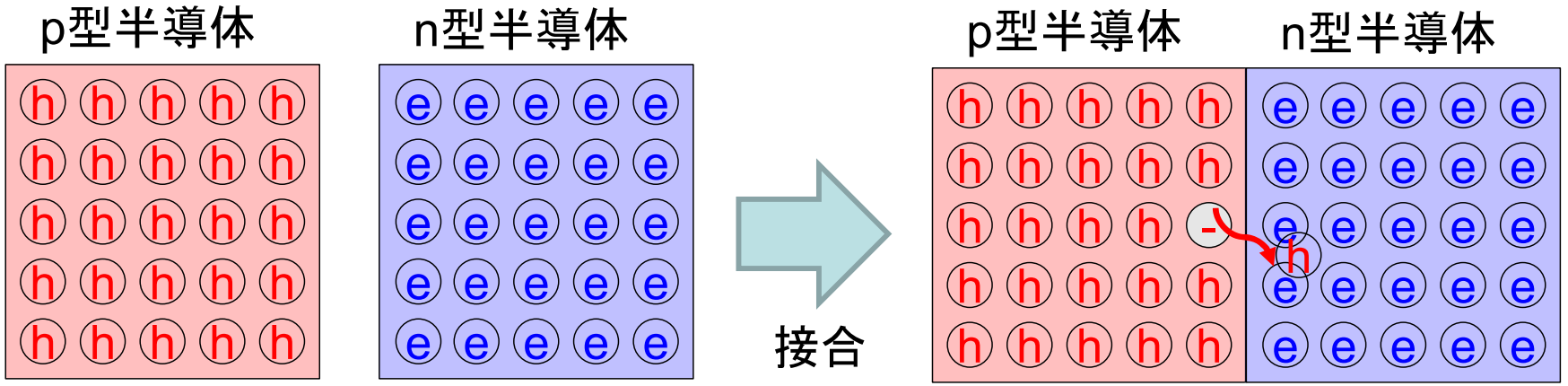
$$V_{bd} = \frac{eN_d}{2\varepsilon_s} W_d^{\,2} = \frac{\varepsilon_s}{2eN_d} E_C^{\,2}$$

- 耐圧とオン抵抗
  - 耐圧の二乗に比例

$$R_d = \frac{W_d}{\mu e N_d A} = \frac{4V_{bd}^{\,2}}{\mu \varepsilon_s A E_C^{\,3}}$$

  - 耐圧と抵抗のトレードオフ
    - 不純物濃度減少 → 耐圧上昇 → 抵抗増大
    - 抵抗減少 → 不純物濃度上昇 → 耐圧低下

pn接合の動作

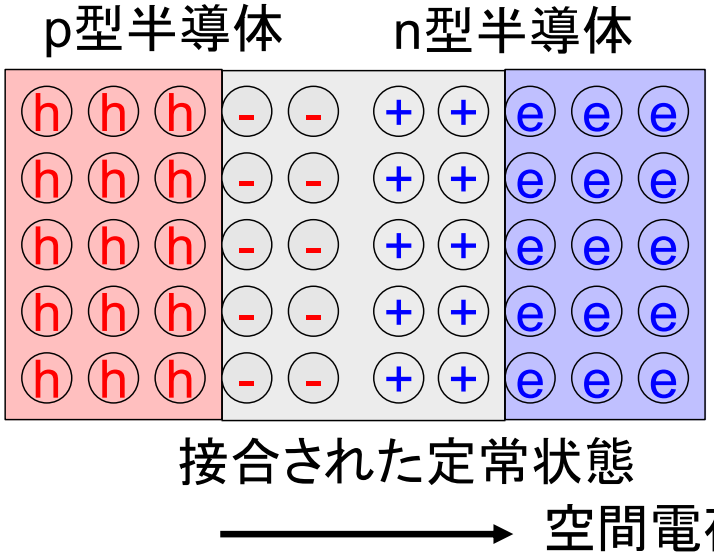


ⓗ 正孔,濃度N_A　ⓔ 電子, 濃度N_D

$N_A > N_D$

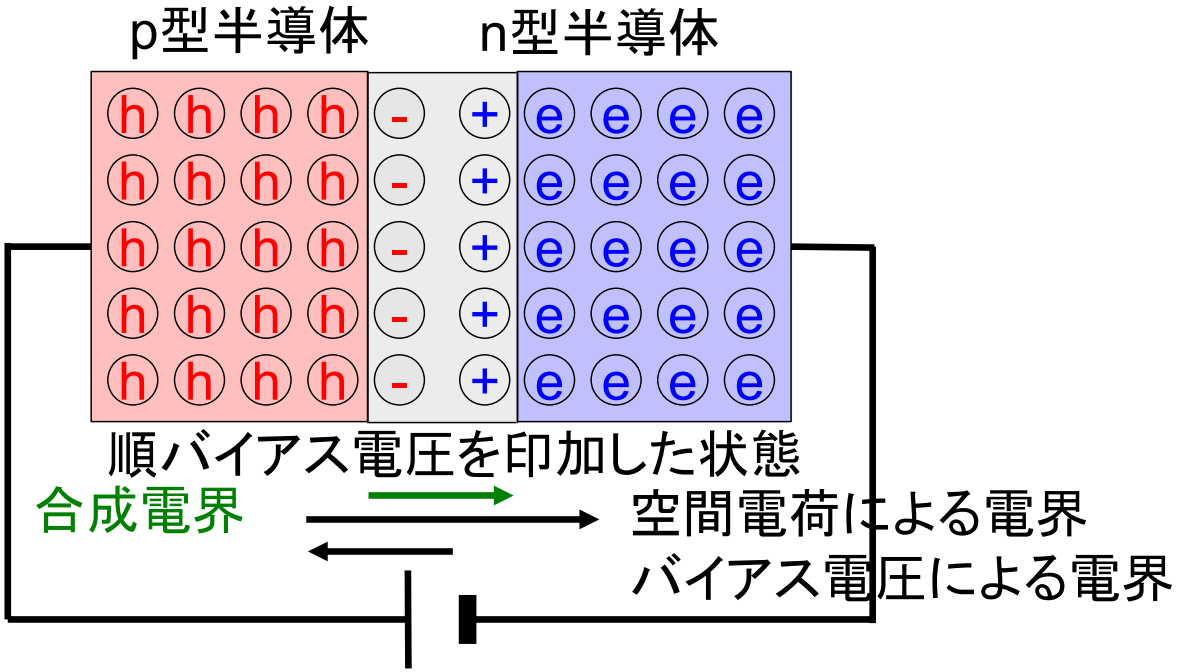
不純物濃度の濃いp型半導体の正孔が,
不純物濃度の低いn型半導体に拡散
正孔がなくなった不純物(アクセプタ)は負の固定電荷となる
n型半導体に拡散した正孔は電子と再結合する
電子がなくなった不純物(ドナー)は正の固定電荷となる

pn接合の動作



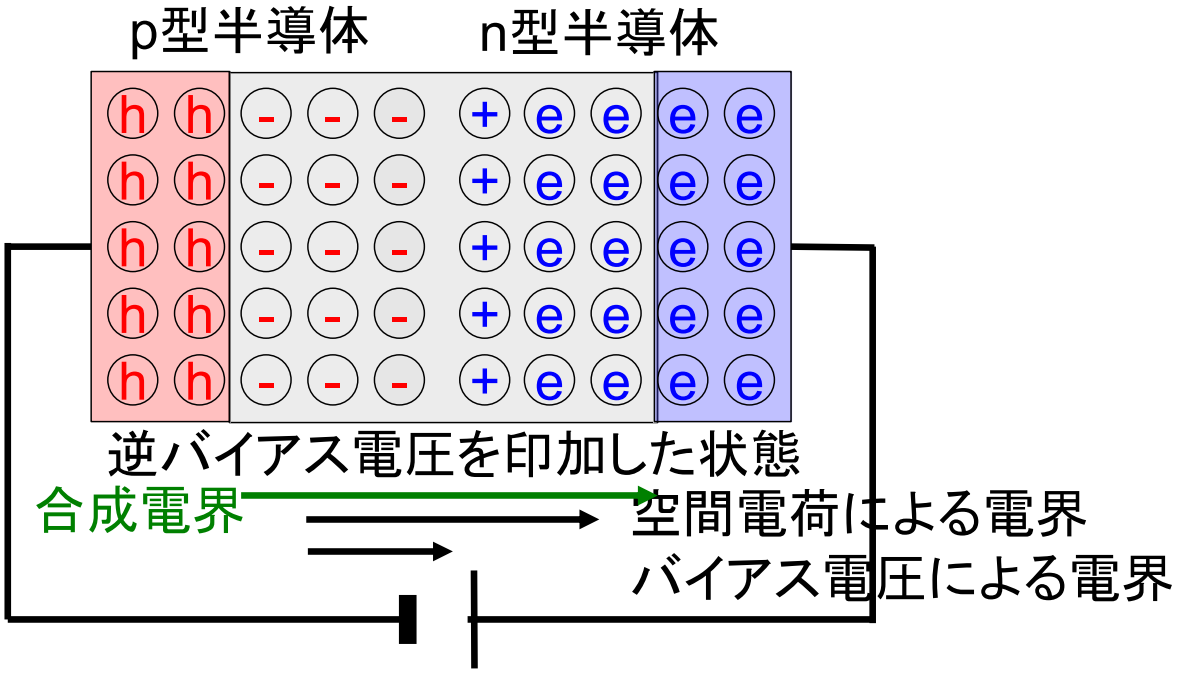
接合界面付近に正負の電荷の層(空乏層,空間電荷層)が形成される
正の電荷から負の電荷に向かって電界が発生
生じた電界が拡散を妨げる
拡散電位，ビルトインポテンシャル:空乏層の端から端までの電界による電位差

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

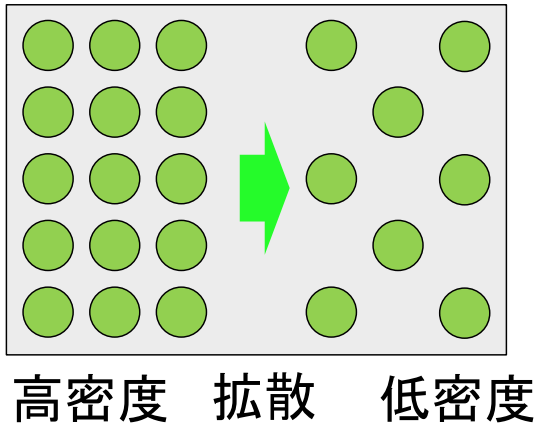
- 半導体を流れる電流
  - ドリフト電流と拡散電流の和
    - ドリフト電流
      - 電界によりキャリアが運ばれる
    - 拡散電流
      - キャリアの濃度勾配が平衡するよう拡散する
  - ドリフト現象と拡散現象の関係
    - アインシュタインの関係

ドリフト電流

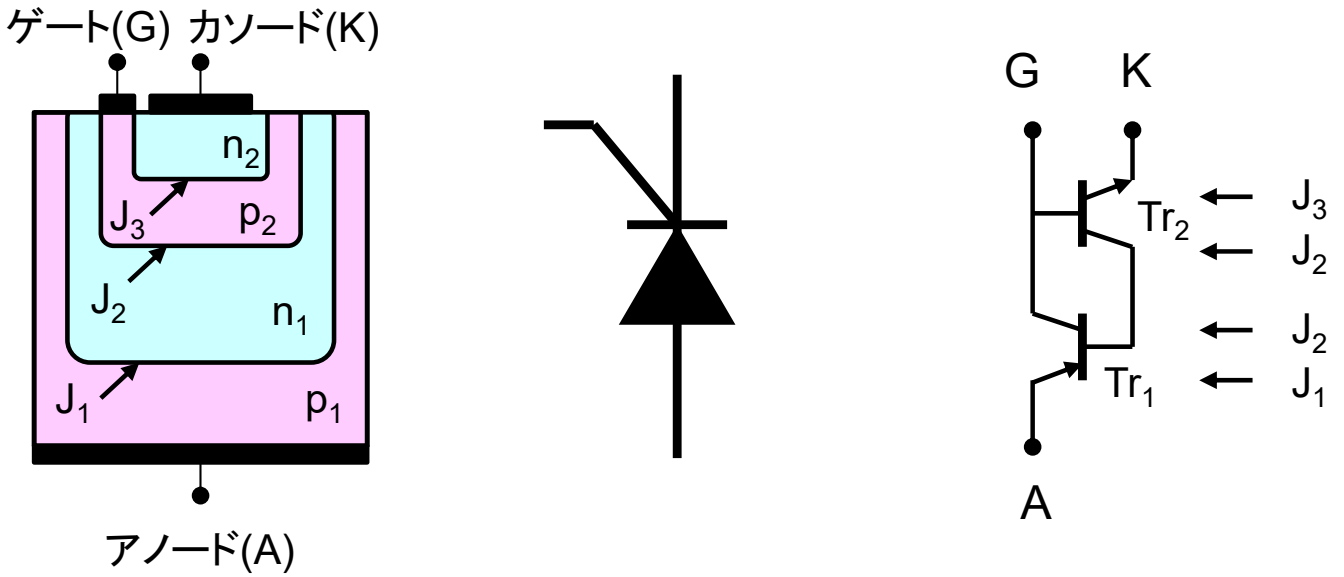
- n型半導体中の電子電流密度J_e
  - $J_e = qnv = qn\mu_e E$
- p型半導体中の正孔電流密度J_h
  - $J_h = qpv = qn\mu_h E$
  - q:単位電荷, v:キャリアの速度,n:電子密度, μ_e:電子移動度, p:正孔密度, μ_h:正孔移動度, E:電界強度
  - 低電界において$v = \mu E$が成り立つ
    - 高電界下では速度飽和が発生$v \neq \mu E$

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
    - ${n_i}^2 = pn \sim 10^{10}\mathrm{cm}^{-3}$
- 不純物半導体
  - $p, n \sim 10^{16\sim20}\mathrm{cm}^{-3}$
  - 密度が高いほうから低いほうへキャリアが拡散

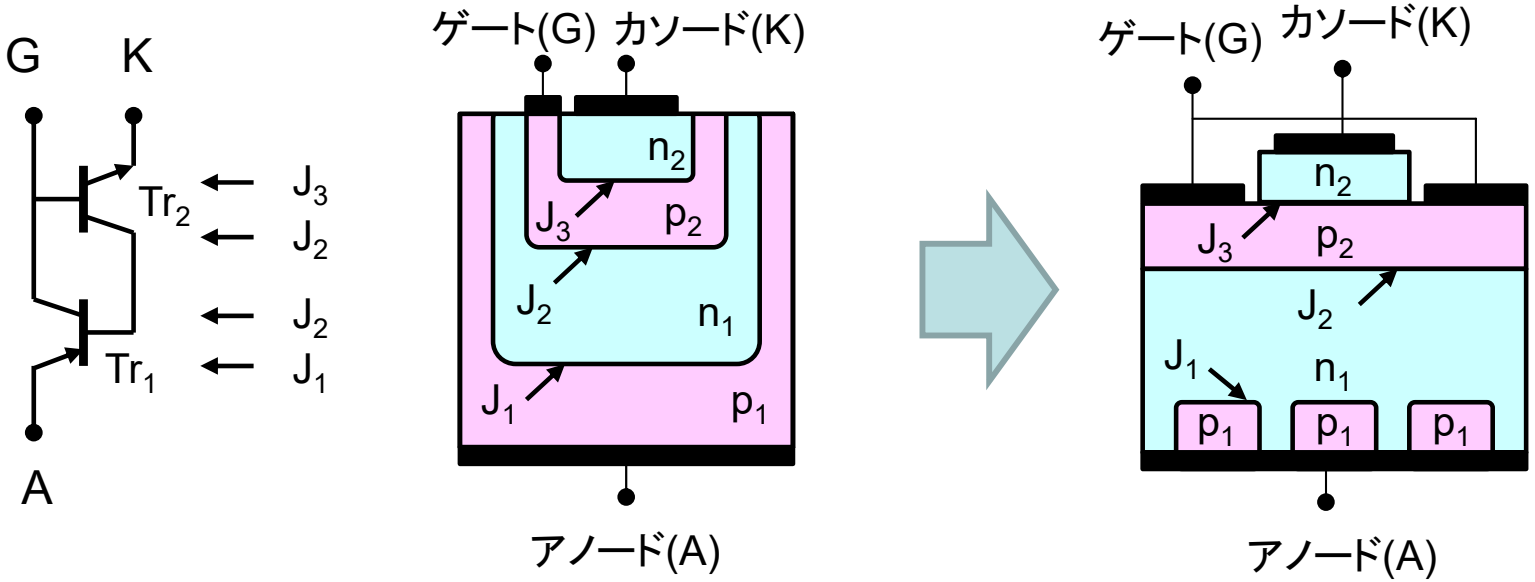


サイリスタ



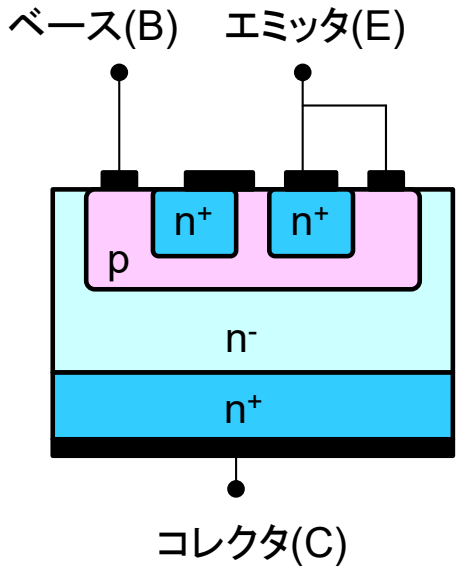
- ターンオン
  - 接合J_3を順バイアス
    - 注入された電子が，高電界のかかっているJ2で加速，なだれ破壊
  - 光直接点弧有
- ターンオフ
  - AK間電圧を小さくする，電圧の極性を反転
  - J1,J3逆バイアス

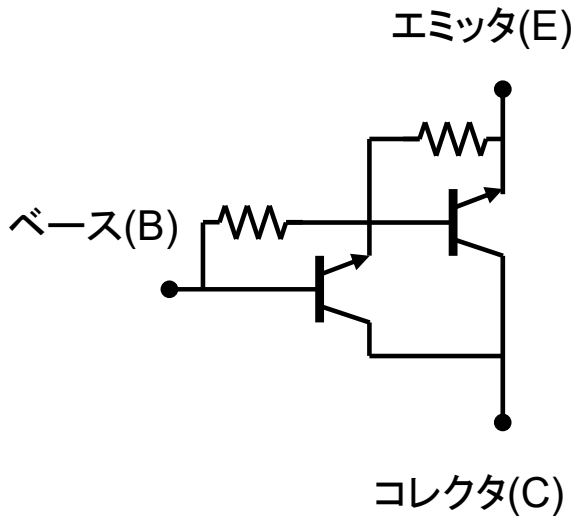
GTO



- 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

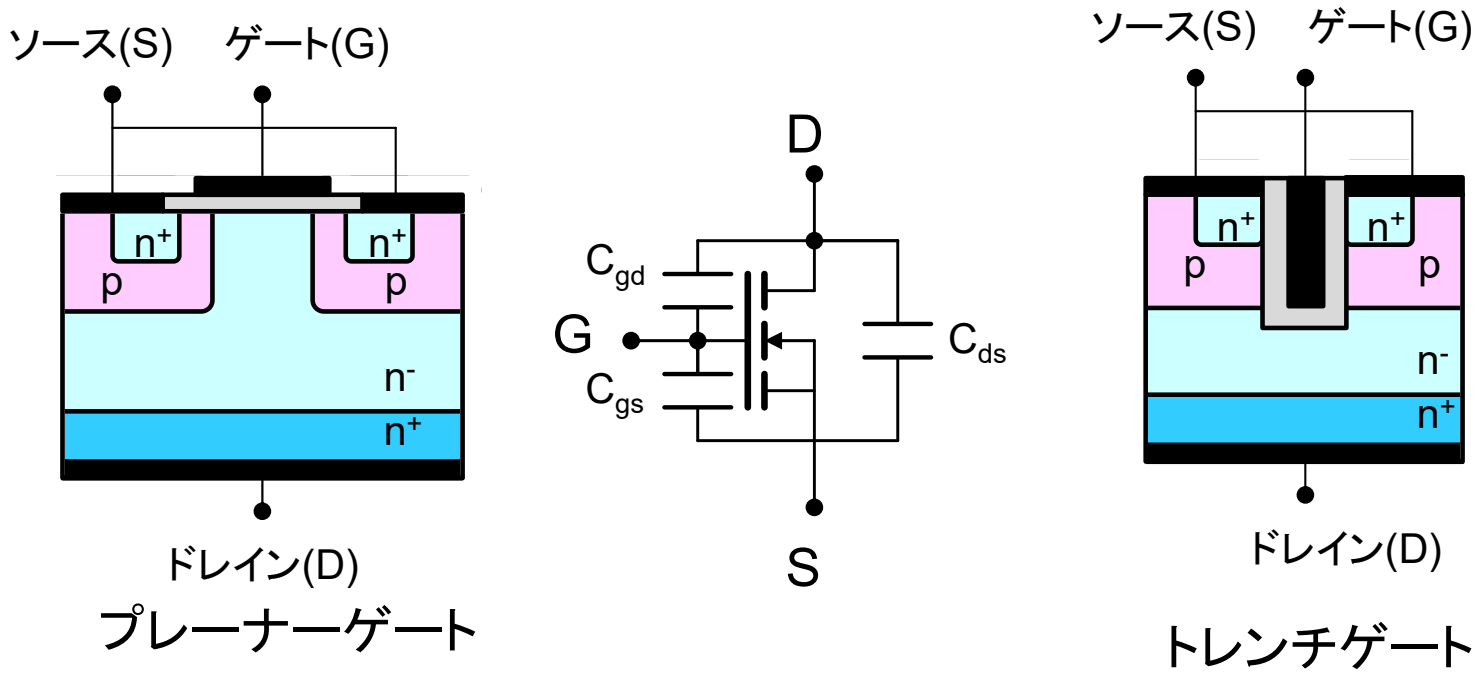
パワーバイポーラトランジスタ





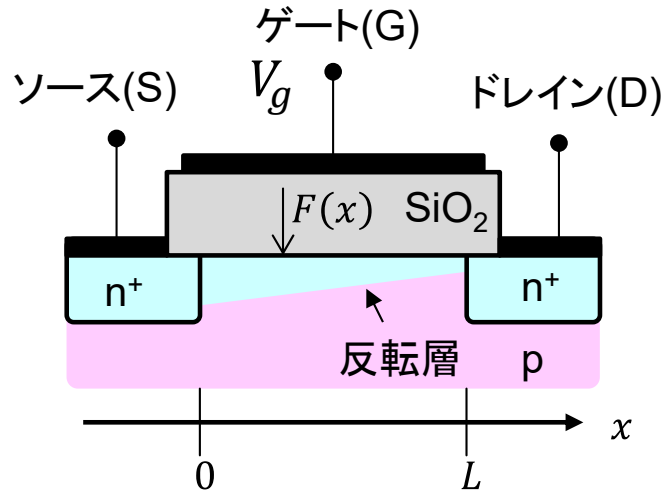
- パワー用として耐圧，電流容量，放熱を向上
  - コレクタ領域不純物濃度を下げ耐圧向上
    - N+層を作りできるだけ低抵抗化
- ダーリントン接続構造

パワーMOSFET



- 熱暴走しない(バイポーラトランジスタとの比較)
- 短チャネル化で抵抗抑制
  - V-shaped grooved MOSFET
  - 二重拡散(double diffused) MOSFET 電流横向き
  - 縦型(vertical DMOSFET) 電流縦向き，基板全体使用，大電流化
- 寄生(ボディ)ダイオード有

パワーMOSFETの動作



L:チャネル長，W:チャネル幅，d:酸化膜厚，ε:誘電率，μ:移動度
$F(x)$:酸化膜内電界，$V(x)$:界面電位，$Q(x)$:誘起電荷(単位面積当たり)

ガウスの法則　$$F(x) = \frac{Q(x)}{\varepsilon} = \frac{V_g - V(x)}{d}$$

チャネル電流(ドリフト)　$$I_d = Q(x)\mu \frac{dV(x)}{dx} W = \frac{\mu W \varepsilon}{d}\{V_g - V(x)\}\frac{dV(x)}{dx}$$

パワーMOSFETの動作

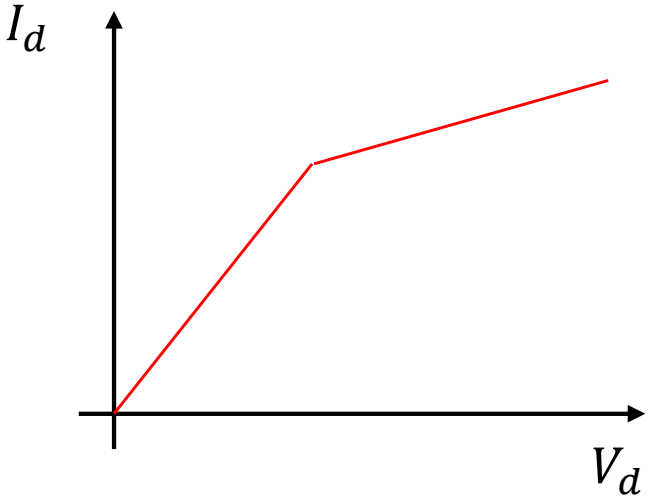
- 電流連続の条件(I_dは任意のxで一定)
  - $\int_0^L I_d dx = I_d L$
  - $$\int_0^L I_d dx = \int_0^L \frac{\mu W \varepsilon}{d}\{V_g - V(x)\}\frac{dV(x)}{dx}dx$$
    $$= \frac{\mu W \varepsilon}{d}\int_0^{V_d}\{V_g - V(x)\}dV(x)$$
    - $V(0) = 0, V(L) = V_d$
  - $$I_d = \frac{\mu W \varepsilon}{Ld}V_d\left(V_g - \frac{V_d}{2}\right) = \frac{\mu W C_g}{L}V_d\left(V_g - \frac{V_d}{2}\right)$$
    - C_g:単位面積当たり絶縁層静電容量

パワーMOSFETの動作

- V_{th}:ゲート閾値電圧を考慮
  - $I_d = \frac{\mu W C_g}{L} V_d \left(V_g - V_{th} - \frac{V_d}{2} \right)$
- ピンチオフ条件(線形→飽和)
  - $\frac{dI_d}{dV_d} = 0$
    - $\frac{dI_d}{dV_d} = \frac{\mu W C_g}{L} \left\{ \left(V_g - V_{th} - \frac{V_d}{2} \right) - \frac{V_d}{2} \right\} = 0$
    - $V_d = V_g - V_{th}$
  - ${I_d}^{sat}$:飽和電流
    - ${I_d}^{sat} = \frac{\mu W C_g}{2L} \left(V_g - V_{th} \right)^2$

パワーMOSFETの動作

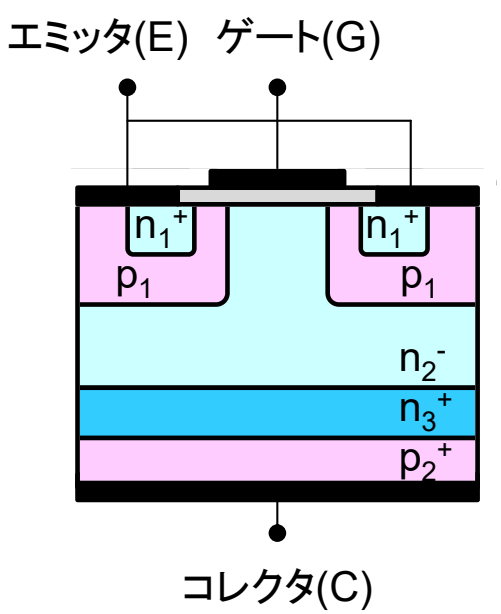
- V_{th}:ゲート閾値電圧
- 線形領域
  - $I_d = \frac{\mu W C_g}{L} V_d \left(V_g - V_{th} - \frac{V_d}{2} \right)$
- ${I_d}^{sat}$:飽和電流
  - ${I_d}^{sat} = \frac{\mu W C_g}{2L} \left(V_g - V_{th} \right)^2$

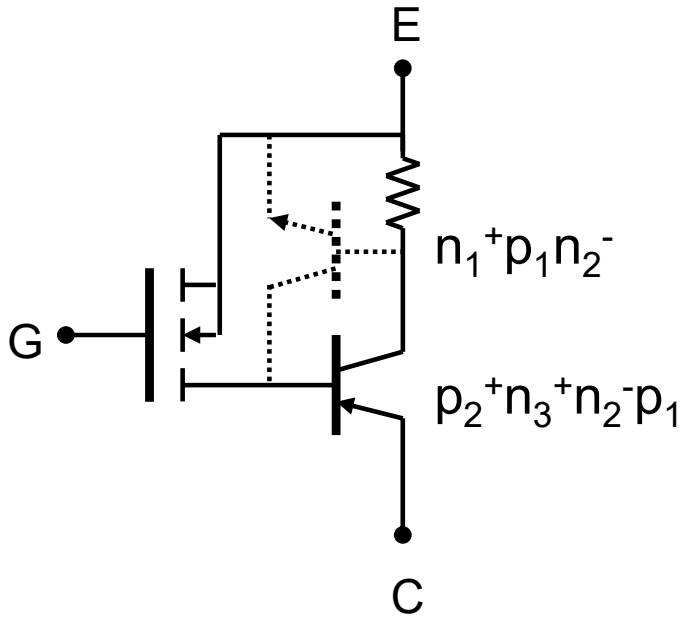


パワーMOSFETの動作

- $g_m = \frac{dI_d}{dV_g}$:相互コンダクタンス
  - 線形領域　$g_m = \frac{\mu W C_g}{L} V_d$
  - 飽和領域　$g_m = \frac{\mu W C_g}{L}\left(V_g - V_{th}\right)$
- パワエレでは線形領域(導通)と遮断領域を主として使用

IGBT





- VDMOSFETのドレインn+と，ドレインの金属電極間にp+領域を形成
- NチャネルMOSFETがバイポーラトランジスタp2+(n3+n2-)p1をオン
  - 少数キャリア注入による抵抗低減
- p2+(n3+n2-)p1n1+に寄生サイリスタ構造を持つ
  - ラッチアップ動作　危険
- 寄生(ボディ)ダイオード無

課題

- 理想ダイオードと実際のダイオードについて静特性および動特性の違いを述べよ
- IGBTとMOSFETの違いについて述べよ
- MOSFETのスイッチング動作過程について述べよ