

パワーエレクトロニクス
第二回 パワエレ基礎
パワー半導体デバイス

平成31年4月17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

非線形回路で生じる高調波と電力

- 印加電圧: 振幅 V_1 [V], 角周波数 ω [rad/sec], 位相初期値 θ_1 [rad]
 - $v(t) = V_1 \sin(\omega t + \theta_1)$
- 正弦波電圧を印加した場合に生じる歪電流: I_i : i 次成分電流
振幅, ϕ_i : 位相初期値

- $i(t) = \sum_{i=0}^{\infty} I_i \sin(i\omega t + \phi_i)$

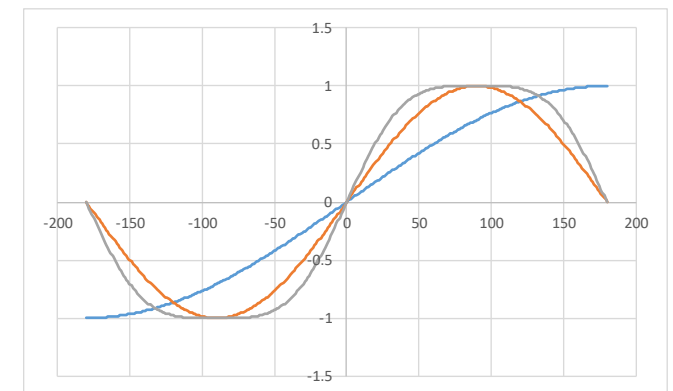
- 平均電力

- $P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T V_1 \sin(\omega t + \theta_1) \left[\sum_{j=0}^{\infty} I_j \sin(j\omega t + \phi_j) \right] dt$$

$$= \frac{1}{2} V_1 I_1 \cos(\theta_1 - \phi_1)$$

- 平均電力 P [W] は印加した電圧の周波数成分のみで生じる



歪波に対する諸量

- 電流実効値 I_{rms}

$$\bullet I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=0}^{\infty} I_{i,rms}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{\infty} I_i^2}{2}}$$

- 負荷力率 pf

$$\begin{aligned} \bullet pf &= \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}} = \frac{V_{1,rms} I_{1,rms} \cos(\theta_1 - \phi_1)}{V_{1,rms} I_{rms}} \\ &= \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}} \cos(\theta_1 - \phi_1) \end{aligned}$$

- 平均電力 P [W] は変わらない
- 基本波成分のみに比べて力率 pf が $\frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$ 倍される

歪波に対する諸量

- 歪率 DF : 電流波形の歪の程度

- $DF = \frac{I_{1,rms}}{I_{rms}}$

- 実効値に対する基本波の比

- 歪力率 pf_d

- $pf_d = DF \cos(\theta_1 - \phi_1)$

- 総合歪率 THD

- $THD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0, \neq 1}^{\infty} I_i^2}{I_{1,rms}^2}} = \sqrt{\frac{I_{rms}^2 - I_{1,rms}^2}{I_{1,rms}^2}} = \sqrt{\frac{1}{DF^2} - 1}$

歪波に対する諸量

- 歪電流に対する無効電力 Q [VAr]
 - $Q = \frac{1}{2} V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \phi_1)$
 - 基本波成分に対する成分で表される
- 基本波以外の電流成分に対する歪電力 D
 - $D = V_{rms} \sqrt{\sum_{i=0, \neq 1}^{\infty} I_{i,rms}^2}$
- 皮相電力 S [VA], 有効電力 P [W], 無効電力 Q [VAr]の関係
 - $S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$

歪波に対する諸量

- 歪電流波形の平均値 I_{avg}
- 歪電流波形の尖頭値 I_{peak}
- 波形率 FF (Form Factor)
 - $FF = \frac{I_{rms}}{I_{avg}}$
- 波高率 CF (Crest Factor)
 - $CF = \frac{I_{peak}}{I_{rms}}$

パワーデバイスの変遷

- 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
 - ダイヤモンド……

パワーデバイスの分類

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

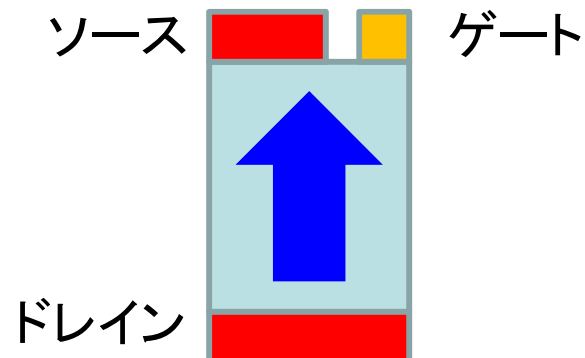
- 自然消弧素子
 - ターンオフ
 - 非可制御
 - 外的要因により決まる
 - ターンオン動作
 - 非可制御
 - ダイオード
 - 可制御
 - サリスタ, トライアック
- 自己消弧素子
 - ゲート駆動
 - ターンオン
 - ターンオフ
 - ゲート駆動方式
 - 電流制御型
 - バイポーラトランジスタ
 - GTO, GCT
 - 電圧制御型
 - MOSFET
 - IGBT

パワーデバイスの分類

分け方その③

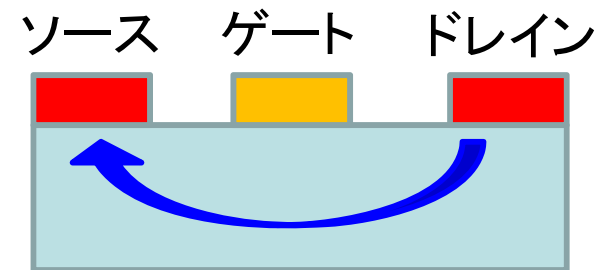
縦型デバイス

- 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

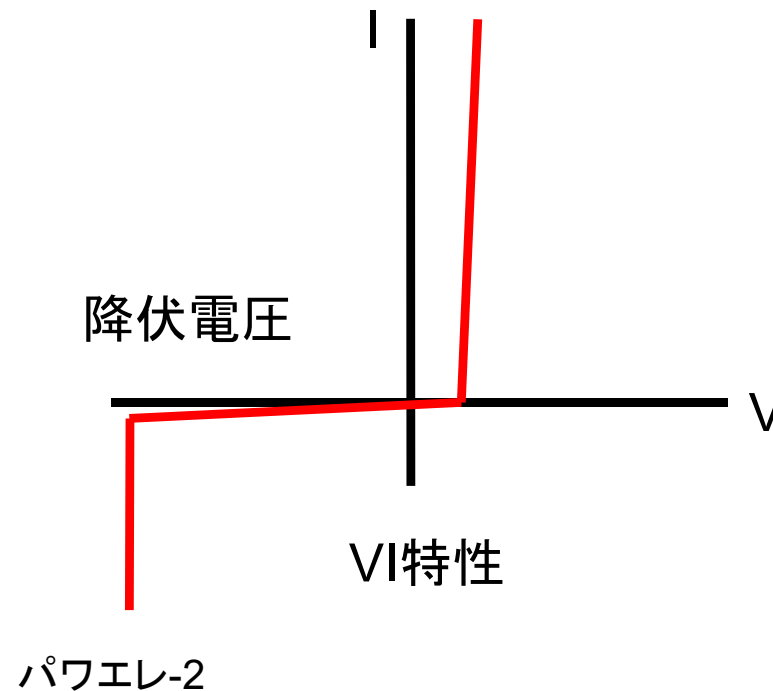
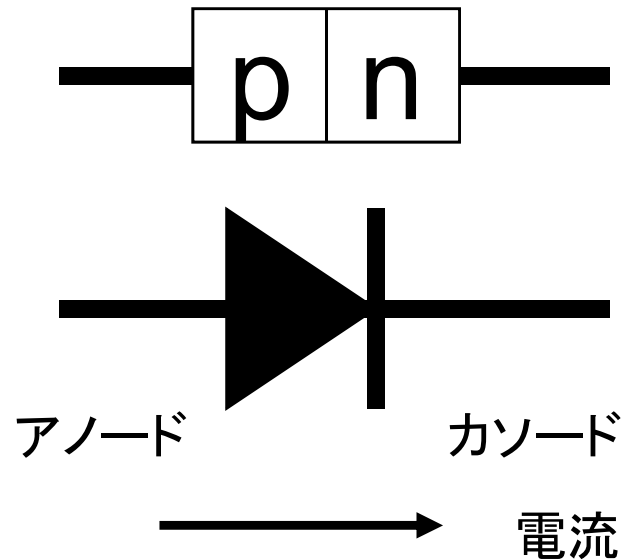
- ゲート駆動回路, 保護回路等との集積化が可能



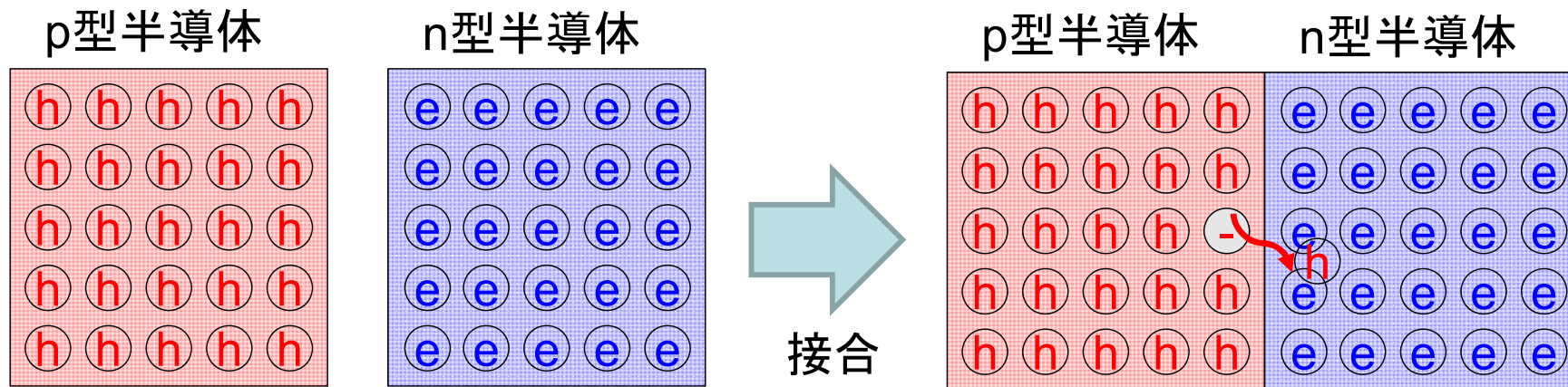
縦型・横型両方製造できる事が、アプリケーション展開に重要

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

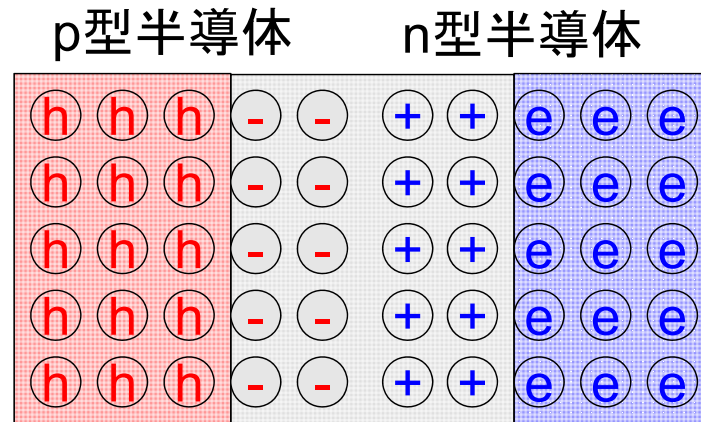
Ⓜ 正孔, 濃度 N_A Ⓜ 電子, 濃度 N_D

$$N_A > N_D$$

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

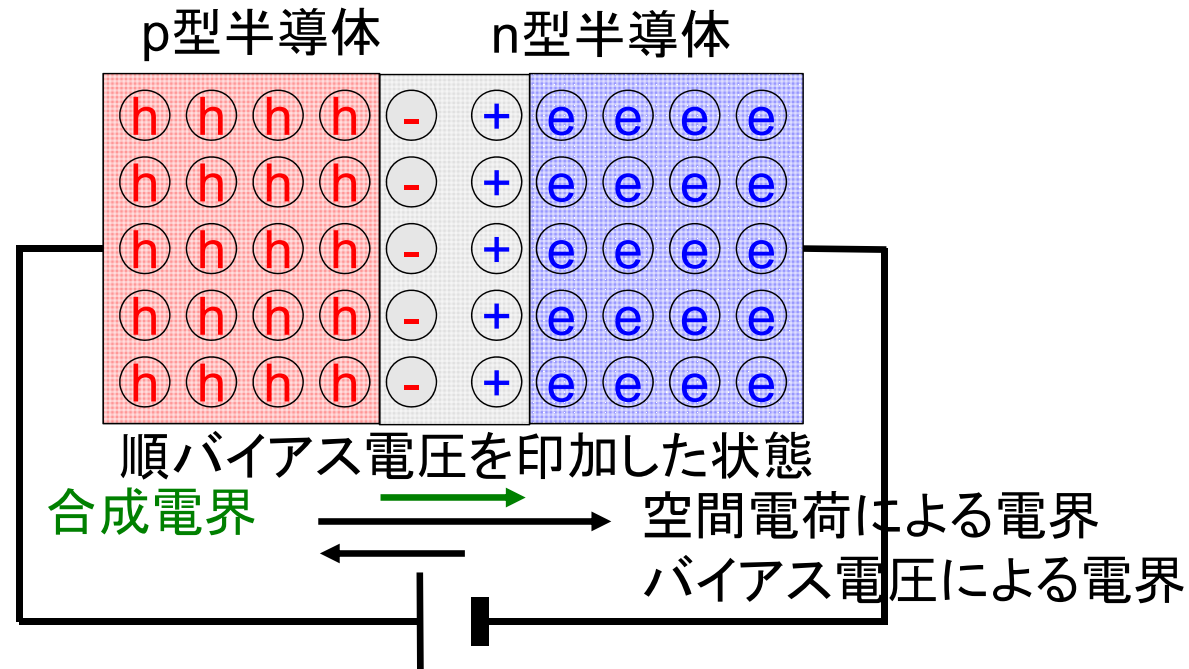
接合界面付近に正負の電荷の層(空乏層,空間電荷層)が形成される

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

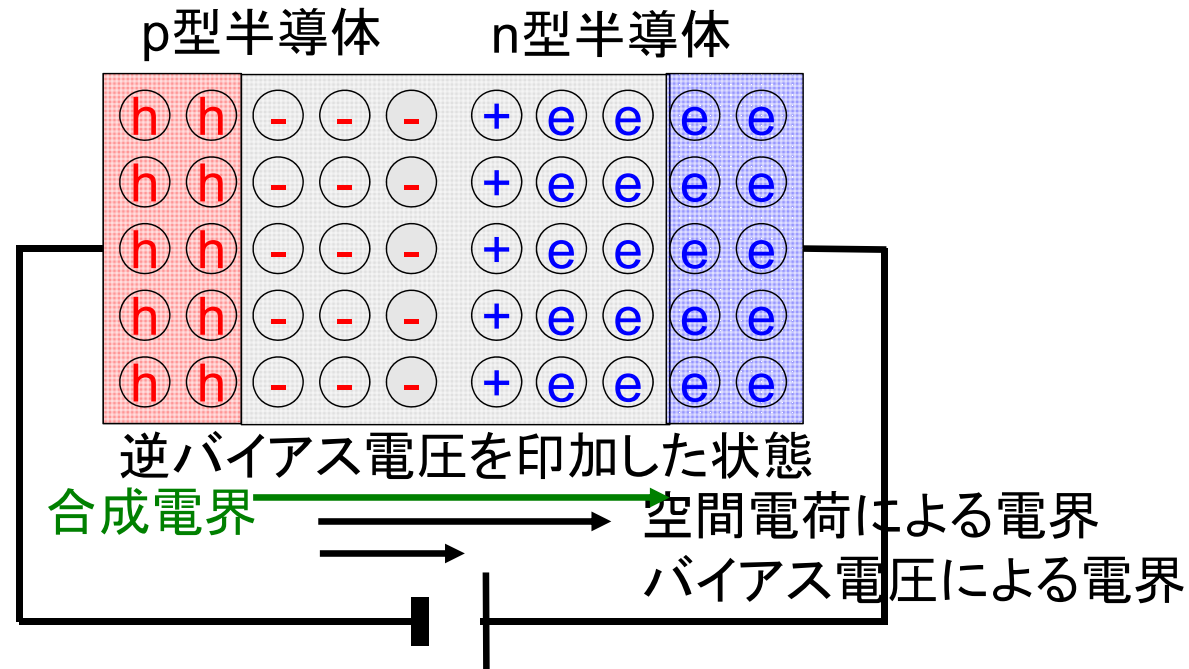
拡散電位, ビルトインポテンシャル:空乏層の端から端までの電界による電位差

pn接合の動作



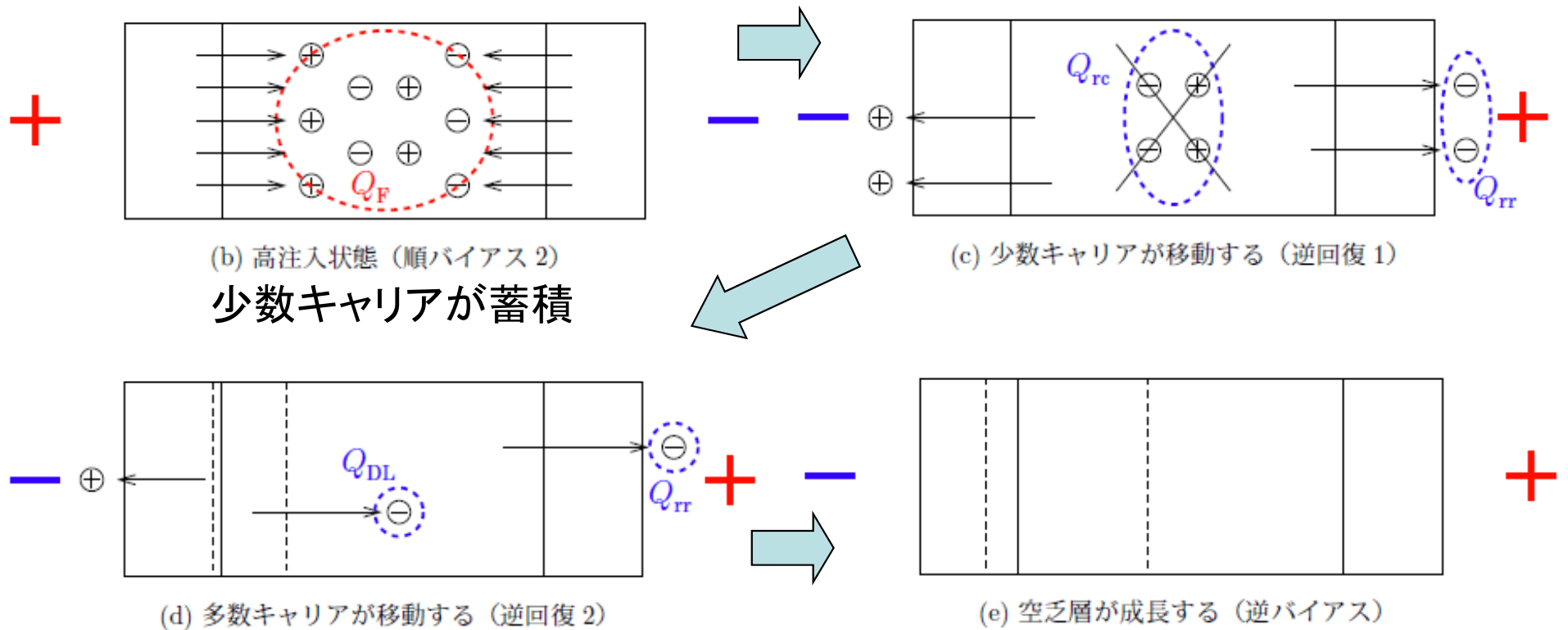
p型半導体に正，n型半導体に負となる極性で外部から順バイアス電圧を印加
バイアス電圧による電界が空間電荷による電界を弱める
正孔がp型層からn型層に拡散，電子がn型層からp型層に拡散し拡散電流となる
電界により正孔，電子が運ばれドリフト電流となる

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