2004.10.14　OKM

ダイオードの非線形特性

❑ 理想ダイオード特性

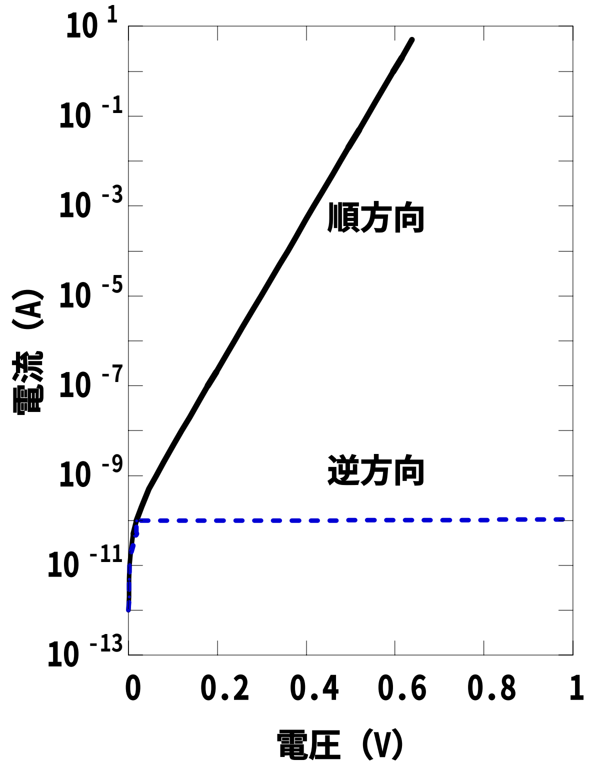
$$I = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{V}{kT/q} \right) - 1 \right]$$

- kT/q = 25mV (at R.T.)：熱電圧
- $V > +0.1$ V（順）, $V < -0.1$ V（逆）

❑ 逆方向飽和電流

$$I_S = S \cdot q \left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_n} \right)$$

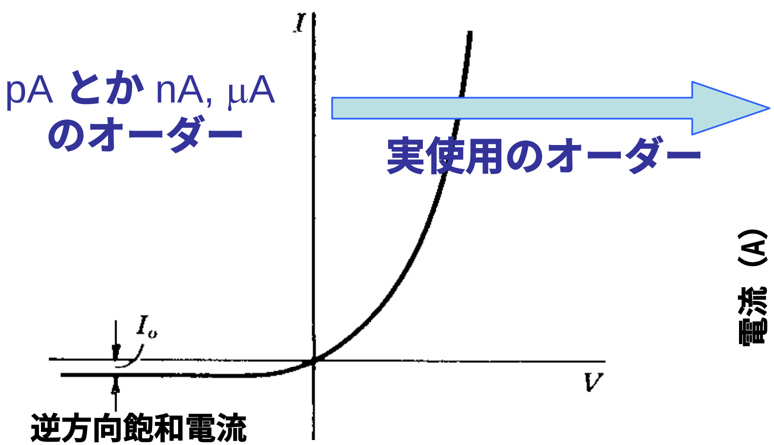
semi-log plot



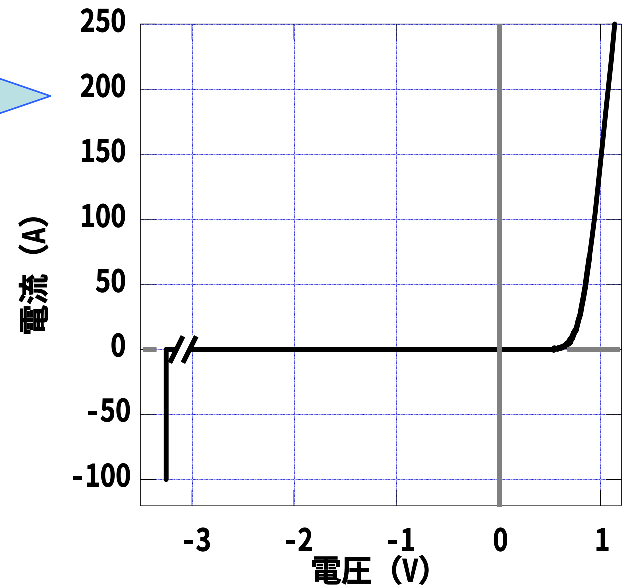
リニアプロット

- 指数関数特性はダイオードスイッチの理解に有用？

デバイスの教科書によく描かれている図

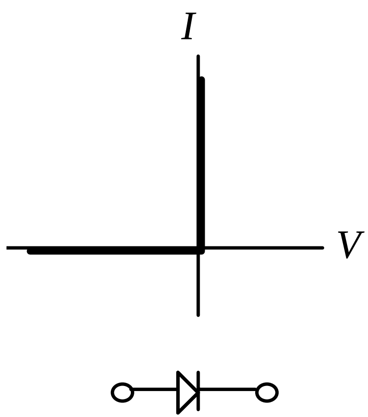


大振幅用途を考えたときの図

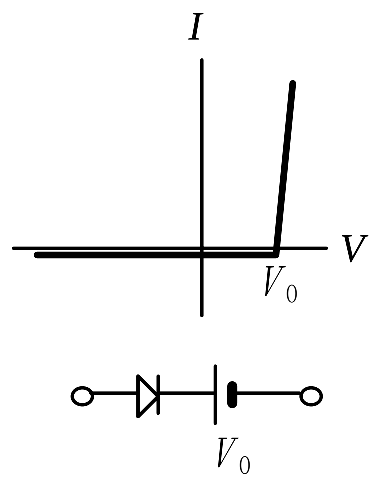


オフセット電圧

スイッチとしてのダイオード特性

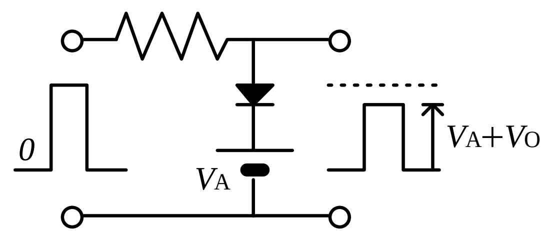


理想ダイオードスイッチ

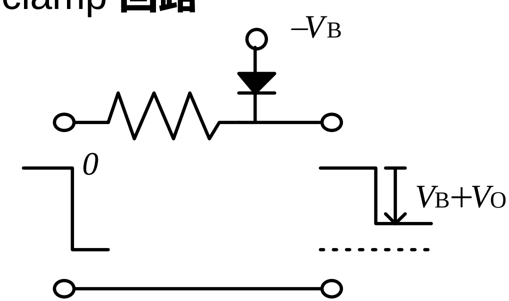


現実のダイオードスイッチ

clip 回路



clamp 回路



ON/OFF **の切り替わりが** 0.7 V offset **している**

2004.10.14　OKM

理想ダイオード特性（再）

$$I = I_S \cdot \left[\boxed{\exp\left(\frac{qV}{kT}\right)} - 1 \right]$$

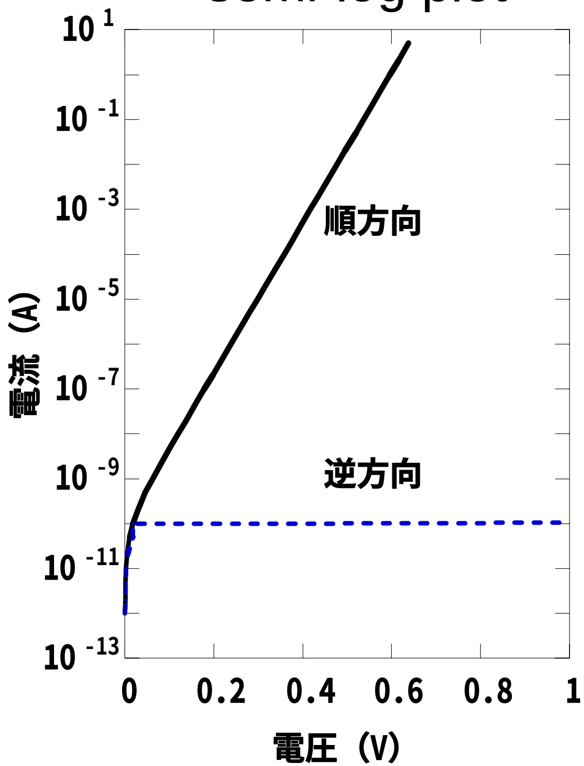
Boltzmann **因子**

$$I_S = S \cdot q\left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p p_{n0}}{L_p}\right)$$

拡散

少数キャリア

semi-log plot



ダイオード電流の温度依存性

$$I_S = S\cdot q\left(\frac{D_n n_{p0}}{L_n}+\frac{D_p p_{n0}}{L_p}\right) = S\cdot q\left(\frac{D_n}{L_n N_A}+\frac{D_p}{L_p N_D}\right)\cdot n_i^2$$

❑ n_{i}^2 の温度依存性

$$I_S = A\cdot T^3\cdot\exp\left(-\frac{E_G}{kT}\right)$$

$$\ln I_S = \ln A + 3\ln T - \frac{E_G}{k}T^{-1} \rightarrow \frac{\Delta I_S}{I_S} = 3\frac{\Delta T}{T}+\frac{E_G}{k}T^{-2}\Delta T$$

$$\frac{\Delta I_S}{I_S} = \left(3+\frac{E_G}{kT}\right)\cdot\frac{\Delta T}{T} \xrightarrow{T=300\,\mathrm{K}} \left(3+\frac{1.12}{0.0259}\right)\cdot\frac{1}{300} \cong 0.15$$

半導体デバイス解析の基本式

- 電流連続の式：

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\nabla\cdot J_n + \boxed{(G_n - R_n)}$$

- ポアソン方程式：

$$\nabla^2 V = -\frac{q}{\varepsilon}(p - n + N_D - N_A)$$

- その他：Maxwell, Schrödinger, SRH etc.

少数キャリアの寿命

$$G_n - R_n = \frac{\mathrm{d}n_p}{\mathrm{d}t} = g - \alpha \cdot n_p \cdot p_p$$

- 熱平衡

$$0 = g - \alpha \cdot n_{p0} \cdot p_{p0} = g - \alpha \cdot n_i^2$$

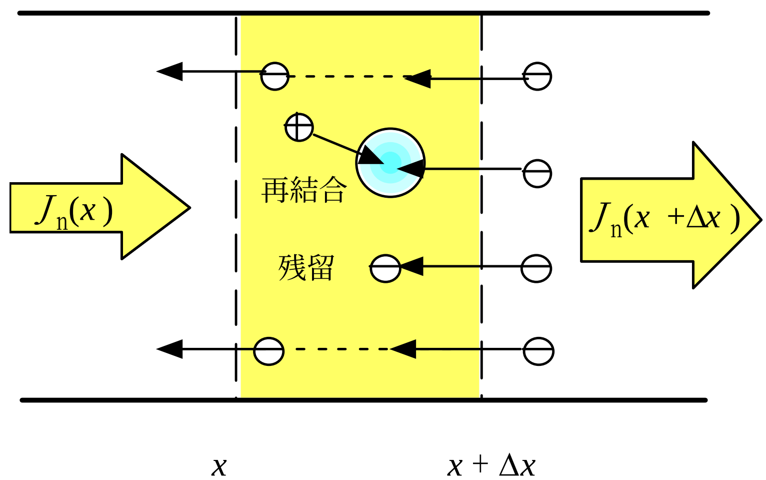
- 非平衡かつ低注入水準　$(n_p << p_{p0})$

$$\frac{\mathrm{d}n_p}{\mathrm{d}t} = \alpha \cdot \left[n_i^2 - \left(n_{p0} + n'_p \right)\left(p_{p0} + n'_p \right) \right]$$

$$\cong -\alpha \cdot n'_p \left(p_{p0} + n_{p0} \right) = -n'_p / \tau_n$$

少数キャリアの電流連続の式

- 流入・流出の差
- 再結合による消滅
  または発生



$$\frac{\partial n_p}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} - \frac{n_p'}{\tau_n}$$

によってキャリアの時間的増減が決まる。

p型中の電子を考えてみよう

- 電流の式（ドリフト＋拡散）

$$J_n = q\left(n_p \mu_n E_x + D_n \frac{\partial n_p}{\partial x} \right)$$

- 連続の式に代入 $\displaystyle \frac{\partial n_{\mathrm{p}}}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_{\mathrm{n}}}{\partial x} - \frac{n_{\mathrm{p}}'}{\tau_{\mathrm{n}}}$

$$\frac{\partial n_{\mathrm{p}}}{\partial t} = n_{\mathrm{p}}\ \mu_{\mathrm{n}}\frac{\partial E_{\mathrm{x}}}{\partial x} + \mu_{\mathrm{n}} E_{\mathrm{x}}\frac{\partial n_{\mathrm{p}}}{\partial x} + D_{\mathrm{n}}\frac{\partial^2 n_{\mathrm{p}}}{\partial x^2} - \frac{n_{\mathrm{p}}'}{\tau_{\mathrm{n}}}$$

⇒ **複雑な微分方程式**

理想ダイオード特性は　どのようにして導かれたか

１．接合領域を３つに分ける
- n 型中性領域、空乏層、p 型中性領域

２．中性領域の抵抗は 0Ωと仮定

３．低注入水準

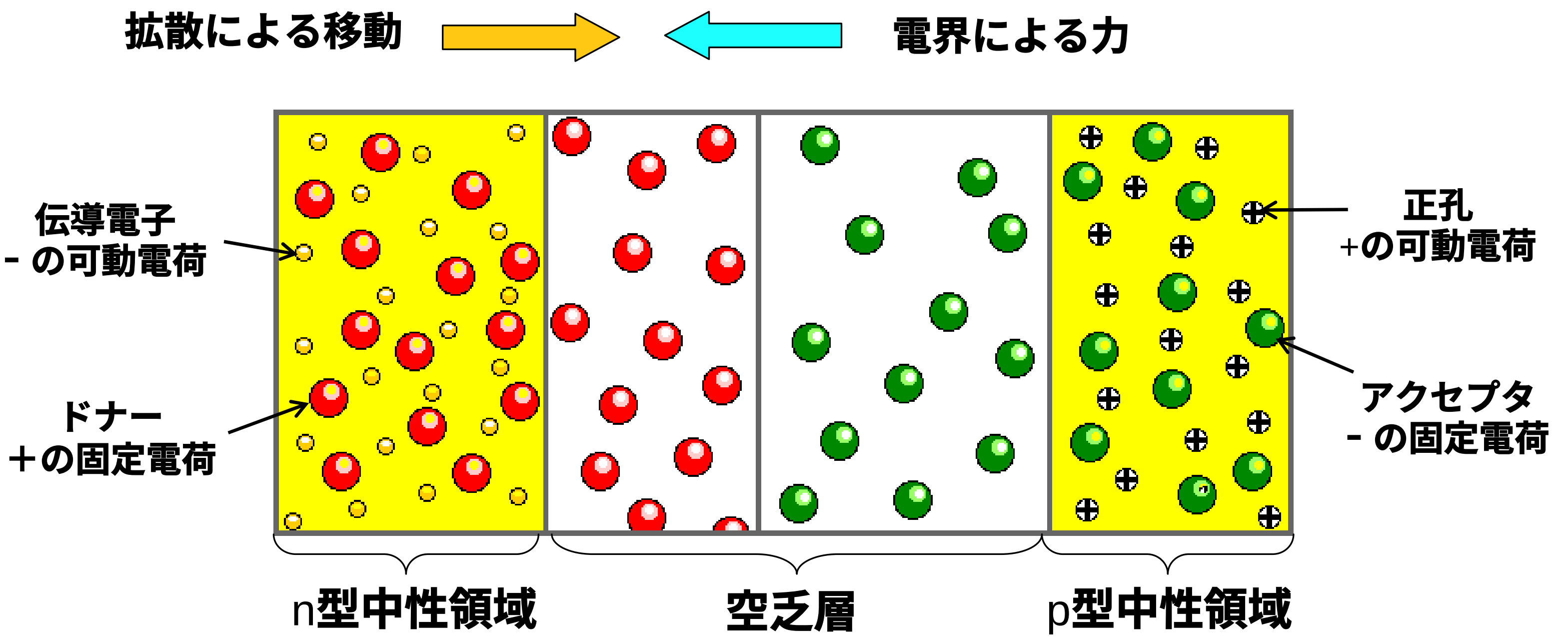
４．空乏層中でのキャリア再結合は無い

５．電圧印加時にもボルツマンの関係が成立

2004.10.14　OKM

pn接合と空乏層

- 電圧は抵抗の大きな空乏層に集中する



電流の運び手が少ない

ダイオードを流れる電流

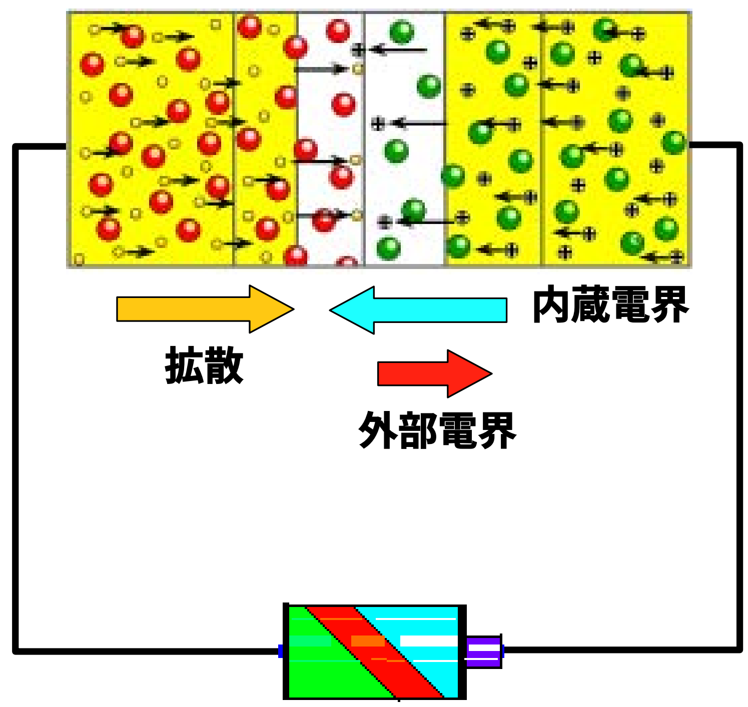
- 熱平衡では
  - 拡散（密度勾配）
  - ドリフト（内蔵電界）

  がバランス。

■ 順バイアスでは

外部電界によって
正味の電界が弱まる

■ 拡散が支配



2004.10.14　OKM

仮定１-３により

- 中性領域での電界強度はゼロ
  1. 接合領域を３つに分ける
  2. 中性領域の抵抗は 0Ωと仮定
  3. 低注入水準

- 中性領域に注目すれば、拡散電流成分のみを考慮すればよい。

$$J_n = q\left(\cancel{n\mu_n \boldsymbol{E}_x} + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right), \quad J_p = q\left(\cancel{p\mu_p \boldsymbol{E}_x} - D_p \frac{\partial p}{\partial x} \right),$$

連続式が解ける形になる

$$\frac{\partial n_\mathrm{p}}{\partial t} = n_\mathrm{p}\cancel{\mu_\mathrm{n}\frac{\partial E_\mathrm{x}}{\partial x}} + \cancel{\mu_\mathrm{n}E_\mathrm{x}\frac{\partial n_\mathrm{p}}{\partial x}} + D_\mathrm{n}\frac{\partial^2 n_\mathrm{p}}{\partial x^2} - \frac{n_\mathrm{p}'}{\tau_\mathrm{n}} \Rightarrow \frac{\partial n_p}{\partial t} = D_n\frac{\partial^2 n_p}{\partial x^2} - \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_n}$$

- **直流特性**　　**過剰少数キャリア：** $n_p' = n_p - n_{p0}$

$$0 = D_n\frac{\partial^2 n_p'}{\partial x^2} - \frac{n_p'}{\tau_n}$$

- **一般解**　　**拡散長：** $L_n = \sqrt{D_n \cdot \tau_n}$

$$n_p'(x) = A \cdot \exp\left(-\frac{x}{L_n}\right) + B \cdot \exp\left(\frac{x}{L_n}\right)$$

時間で変化する系

$$\frac{\partial n'_p}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n'_p}{\partial x^2} - \frac{n'_p}{\tau_n}$$

- 交流定常

$$n'_p(x,t) = n'_{p1}(x) + n'_{p2}(x) \cdot \mathrm{e}^{j\omega t}$$

$$j\omega \cdot n'_{p2}(x) \cdot \mathrm{e}^{j\omega t} = D_n \left[\frac{\partial^2 n'_{p1}(x)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 n'_{p2}(x)}{\partial x^2} \cdot \mathrm{e}^{j\omega t} \right]$$

$$- \frac{n'_{p1}(x) + n'_{p2}(x) \cdot \mathrm{e}^{j\omega t}}{\tau_n}$$

時間で変化する系(cont'd)

- 直流分 $$D_n \frac{\partial^2 n'_{p1}(x)}{\partial x^2} - \frac{n'_{p1}(x)}{\tau_n} = 0$$
- 交流分 $$D_n \frac{\partial^2 n'_{p2}(x)}{\partial x^2} - \frac{n'_{p2}(x)}{\tau_n}(1 + j\omega\tau_n) = 0$$
- 複素拡散長 $$L_n \rightarrow \frac{L_n}{\sqrt{1 + j\omega\tau_n}}$$

時間で変化する系

$$\frac{\partial n_p'}{\partial t} = D_n \frac{\partial^2 n_p'}{\partial x^2} - \frac{n_p'}{\tau_n}$$

- 過渡応答

$$n_p'(x,t) \xrightarrow{L} N_p'(x,s) \quad \text{ラプラス変換}$$

$$s \cdot N_p'(x,s) - n_p'(x,0) = D_n \frac{\partial^2 N_p'(x,s)}{\partial x^2} - \frac{N_p'(x,s)}{\tau_n}$$

- （一般論）$t=0$ の分布が分かっていれば、

  上の式を解いて逆変換すればよい。