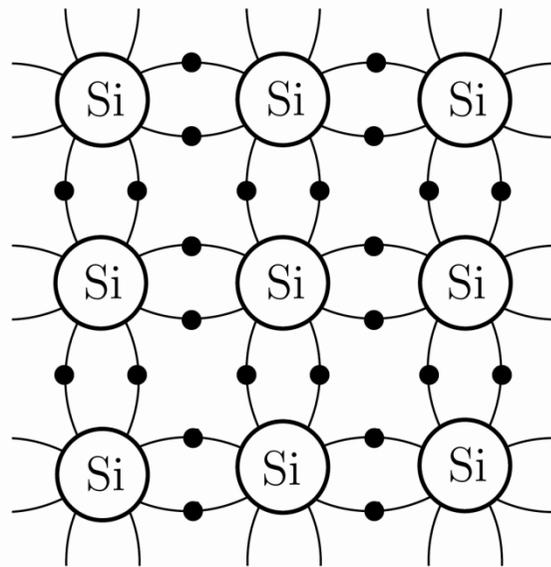


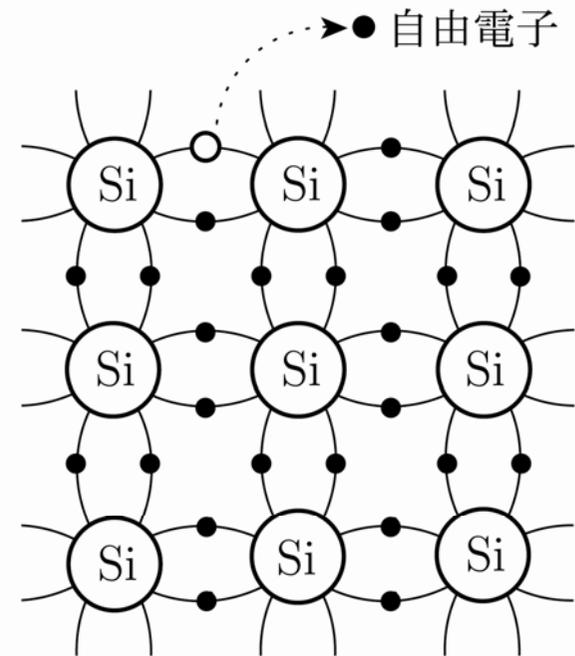
モノリシック集積回路の特徴

半導体とpn接合

半導体の構造



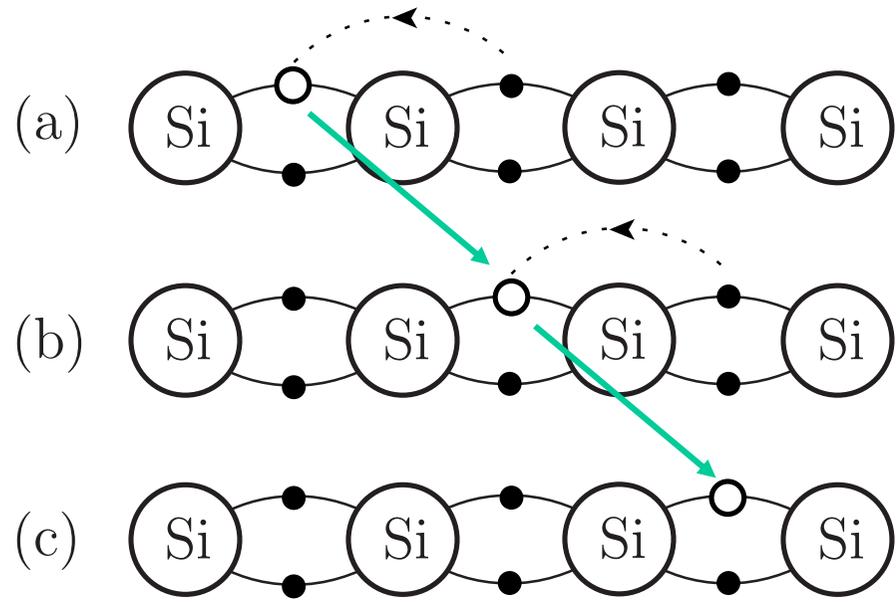
○ Si シリコンの原子核
● 電子



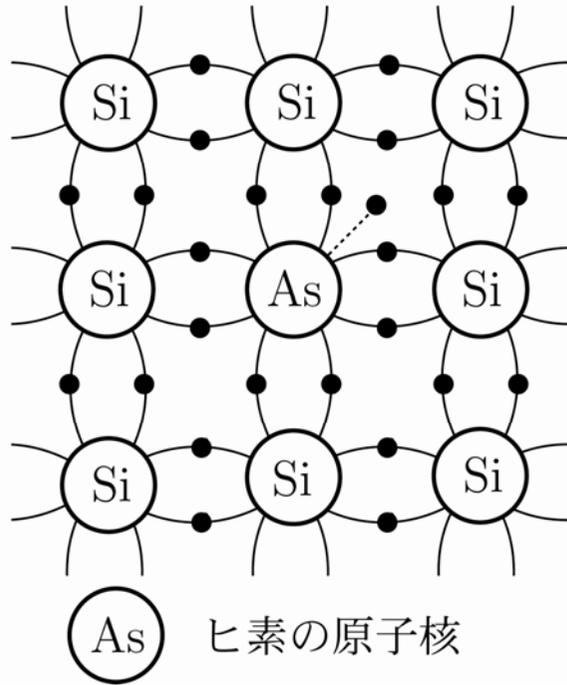
○ ホール

自由電子とホールの発生

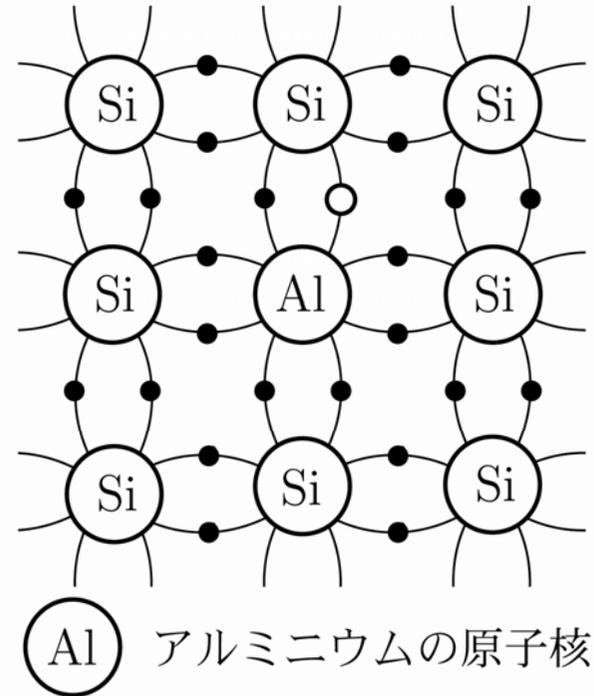
ホールの移動



不純物半導体

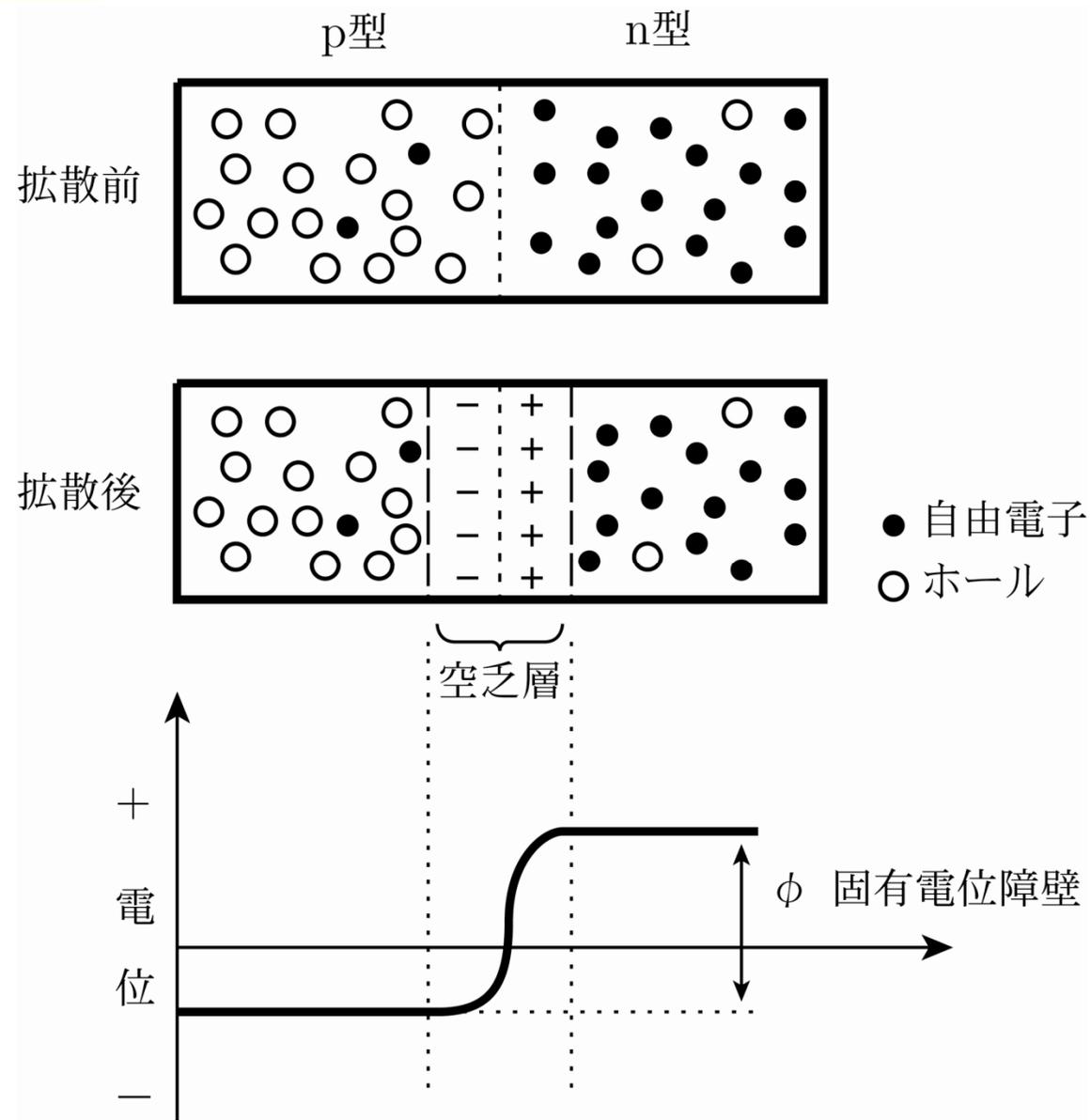


n型半導体

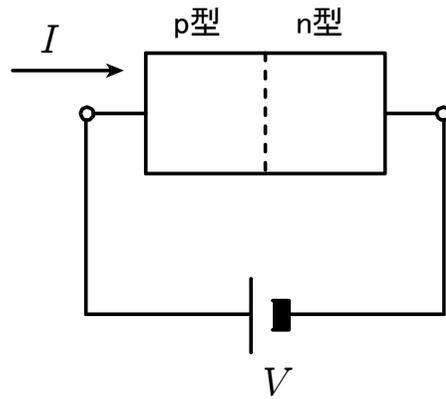


p型半導体

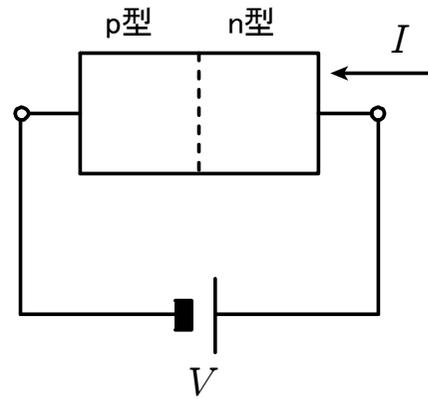
拡散と再結合



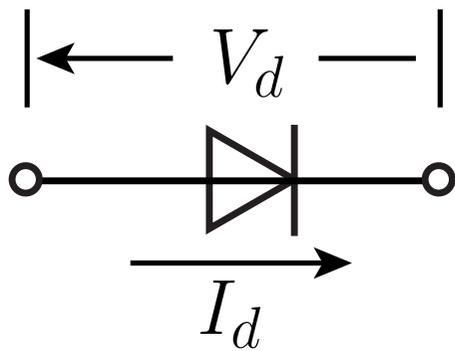
pn接合ダイオードの特性



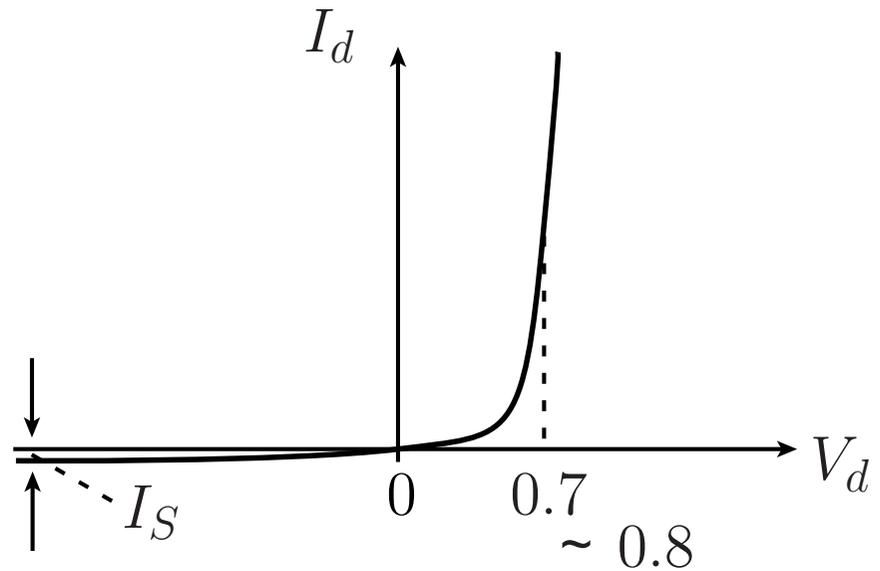
(a) 順方向バイアス



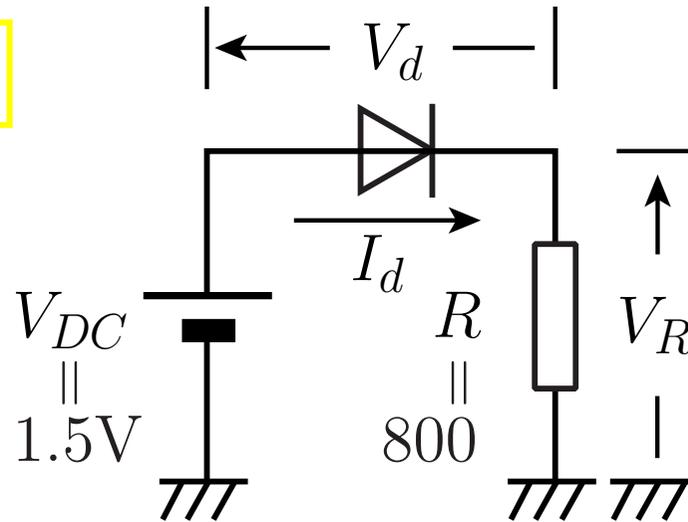
(b) 逆方向バイアス



$$I_d = I_S \left\{ \exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right\}$$



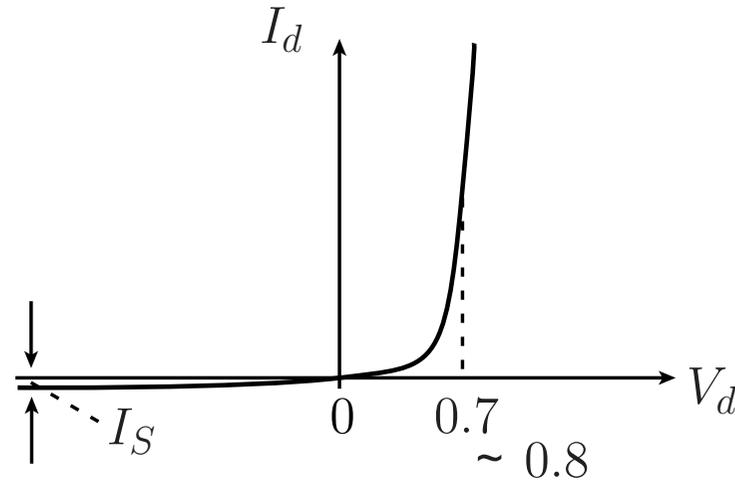
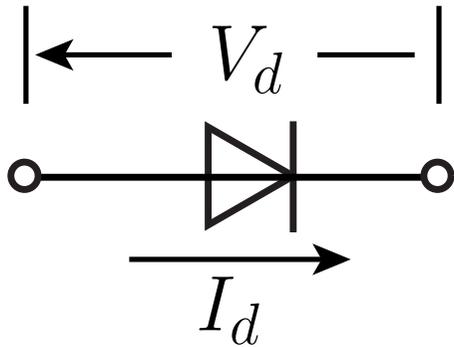
計算ができない？



$$R=800\Omega, I_S=10^{-15} \text{ A}, k=1.38\times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1},$$
$$q=1.6\times 10^{-19} \text{ C}, T=300\text{K}, V_{DC}=1.5\text{V}$$

$$I_d=I_S \left\{ \exp\left(\frac{qV_d}{kT}\right) - 1 \right\} \quad I_d = \frac{V_{DC} - V_d}{R}$$

未知の変数は V_d と I_d の2個で、方程式も2個だが、 V_d や I_d について解くことができない。



実際のpn接合ダイオードの特性

$$I_S = 10^{-15} \text{ A}, \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}, \quad q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad T = 300 \text{ K}$$

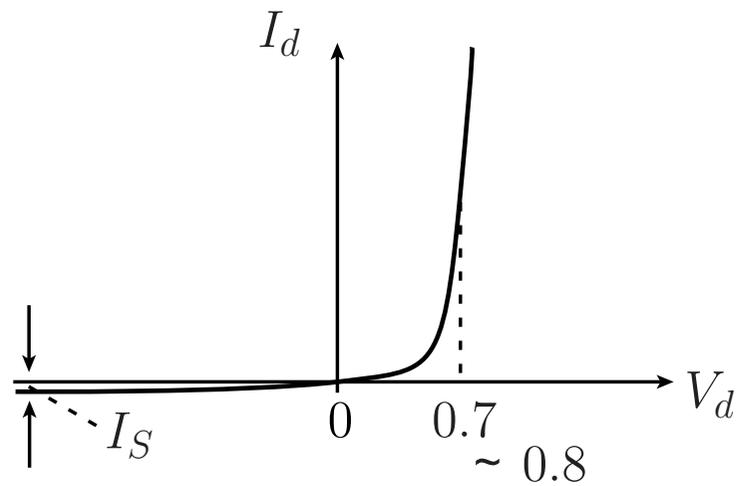
$$I_d = 0.10 \text{ mA} \text{ のとき } V_d = 0.655 \text{ V}$$

$$V_d = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_d}{I_S} + 1\right) \text{ より}$$

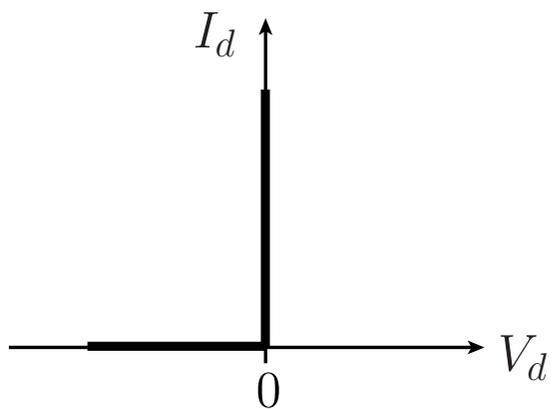
$$I_d = 1.0 \text{ mA} \text{ のとき } V_d = 0.715 \text{ V}$$

$$I_d = 10 \text{ mA} \text{ のとき } V_d = 0.775 \text{ V}$$

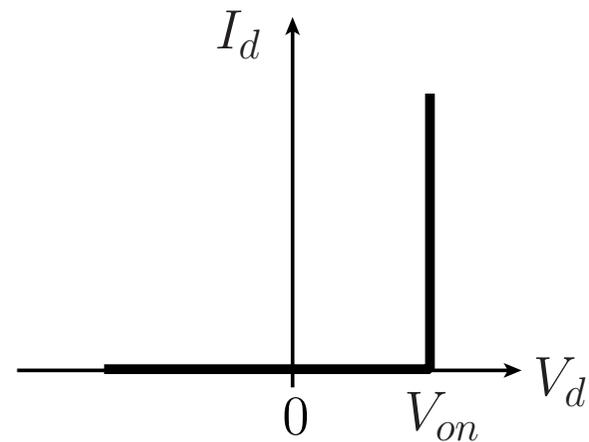
I_d が大きく変化しても V_d はほぼ一定.



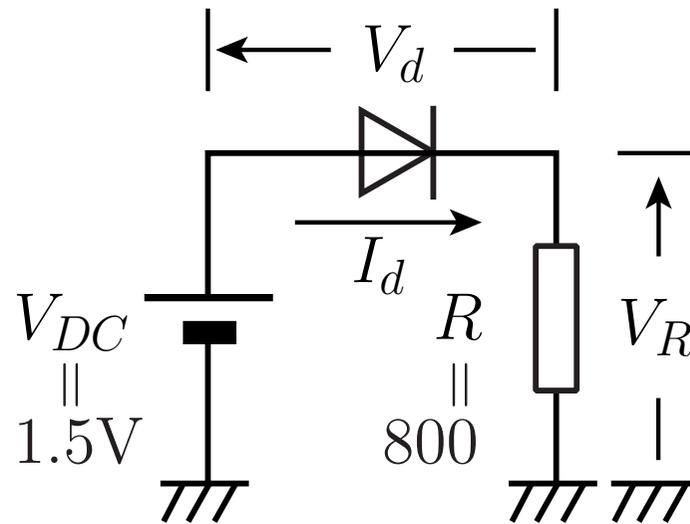
実際のpn接合ダイオードの特性



理想ダイオード特性



近似ダイオード特性



$$R=800\Omega, \quad I_S=10^{-15} \text{ A}, \quad k=1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1},$$

$$q=1.6 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad T=300\text{K}, \quad V_{DC}=1.5\text{V}, \quad \underline{V_d=0.70\text{V}}$$

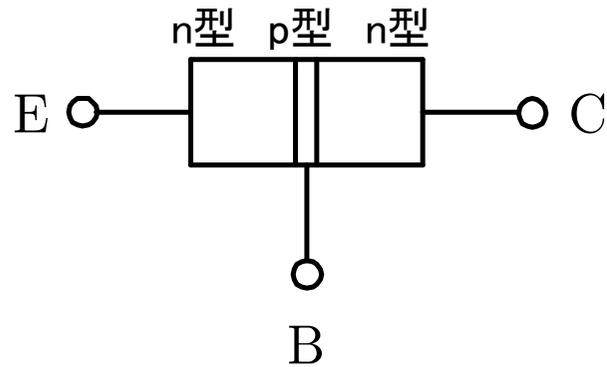
近似計算： $V_d=0.70\text{V}$ $I_d = \frac{V_{DC} - V_d}{R} = 1.0\text{mA}$

問：

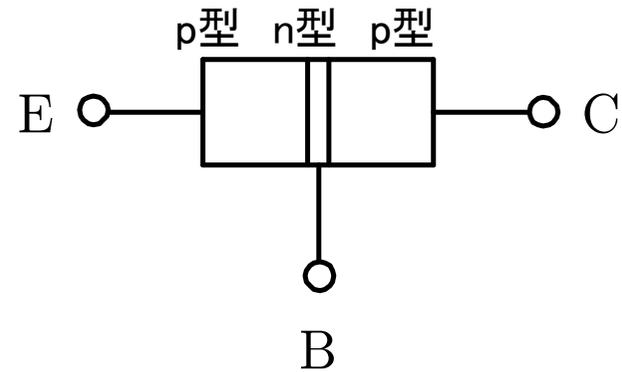
$$I_d^{(n+1)} = \frac{V_{DC} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_d^{(n)}}{I_S} + 1\right)}{R} \text{ という}$$

漸化式を用いて真の I_D 及び V_D を求めよ.

バイポーラトランジスタの特性



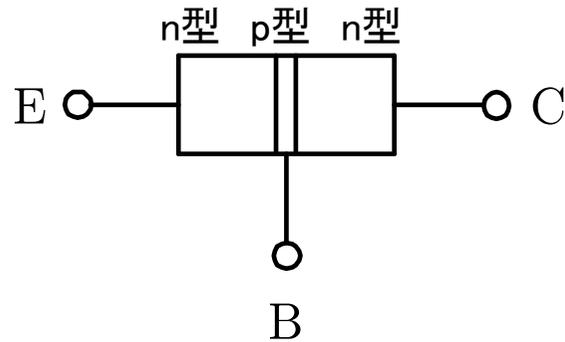
(a) npnトランジスタ



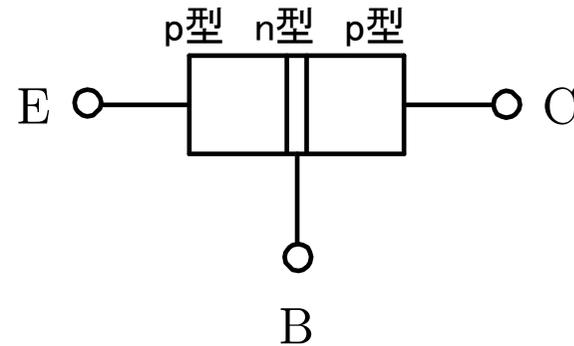
(b) pnpトランジスタ

E: Emitter, エミッタ
B: Base, ベース
C: Collector, コレクタ

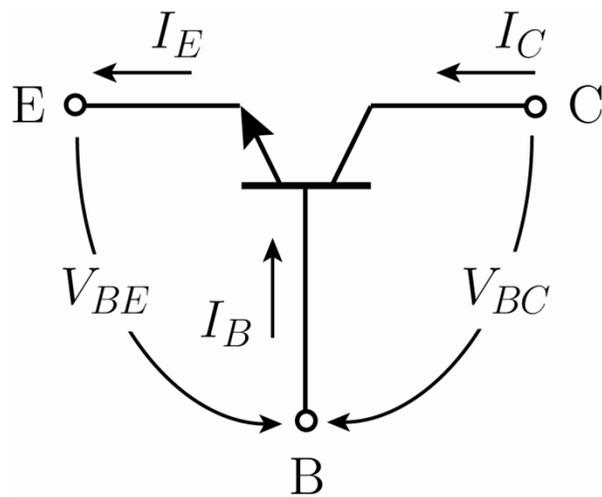
バイポーラトランジスタの記号



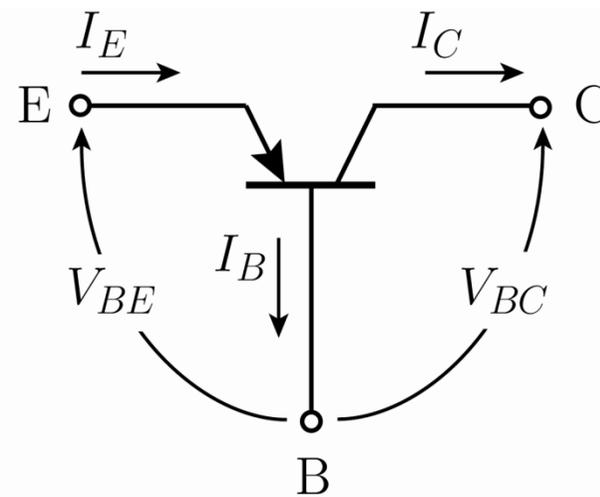
(a) npnトランジスタ



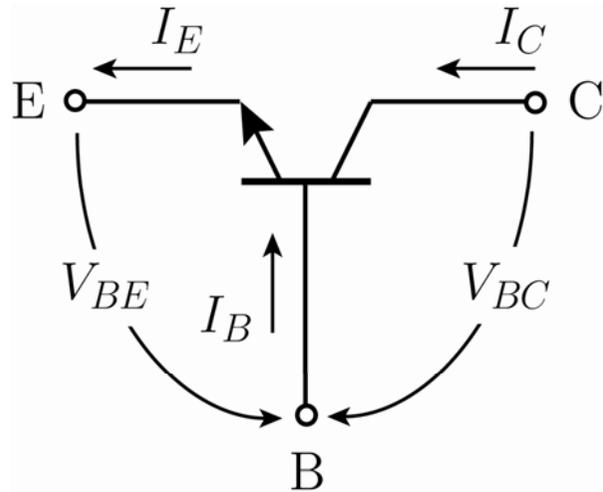
(b) pnpトランジスタ



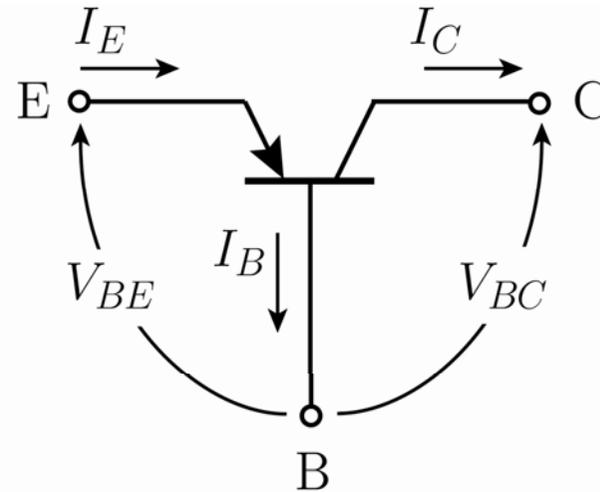
(a) npnトランジスタ



(b) pnpトランジスタ

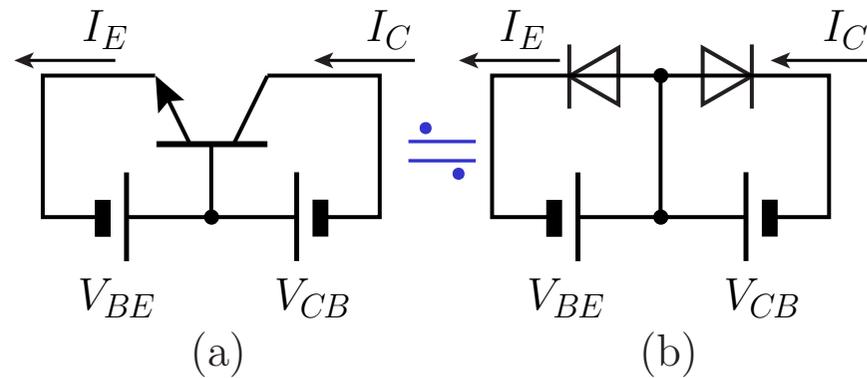
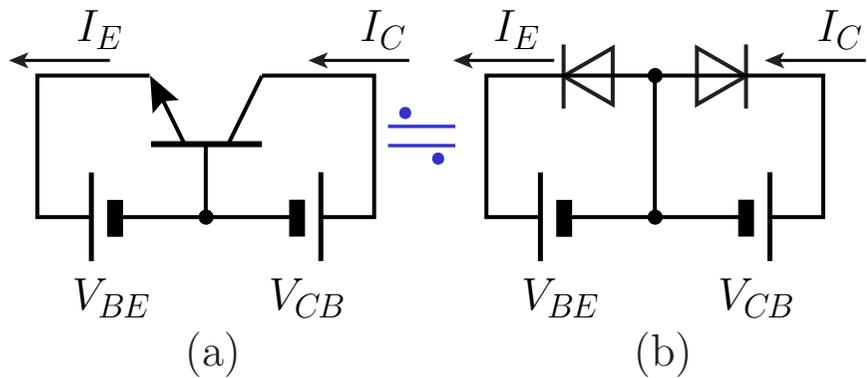


(a) npn トランジスタ



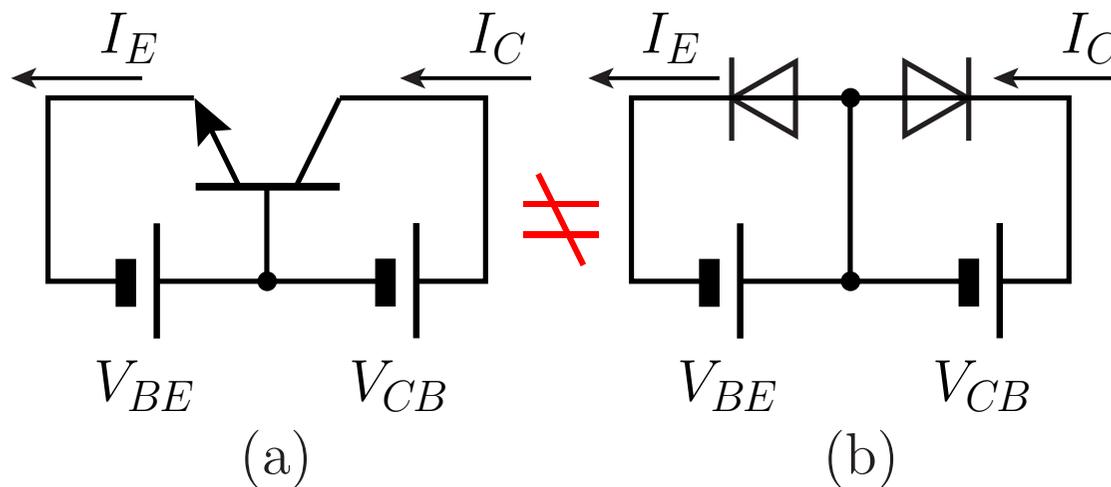
(b) pnp トランジスタ

遮断領域 :	$V_{BE} < 0, V_{BC} < 0$
能動活性領域 :	$V_{BE} > 0, V_{BC} < 0$
飽和領域 :	$V_{BE} > 0, V_{BC} > 0$
逆方向能動活性領域 :	$V_{BE} < 0, V_{BC} > 0$



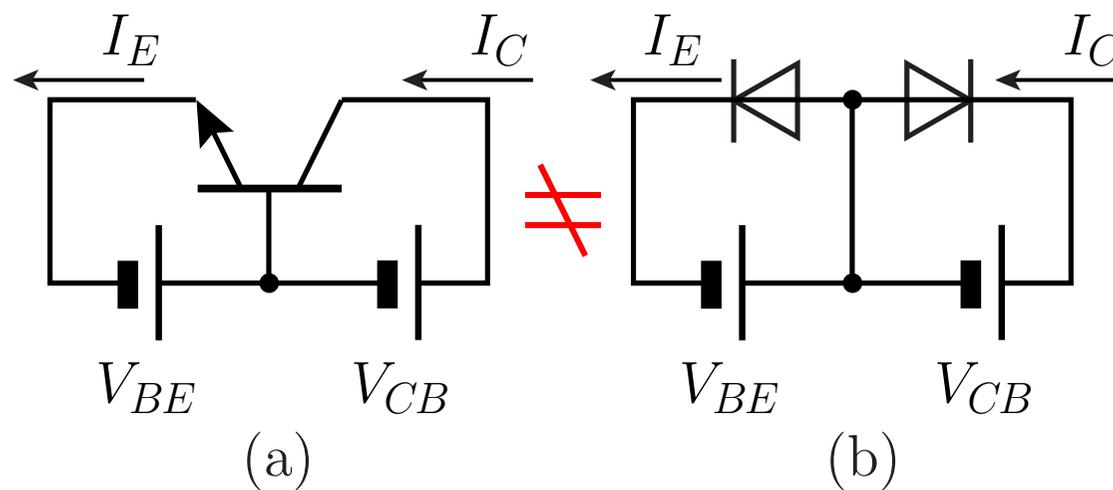
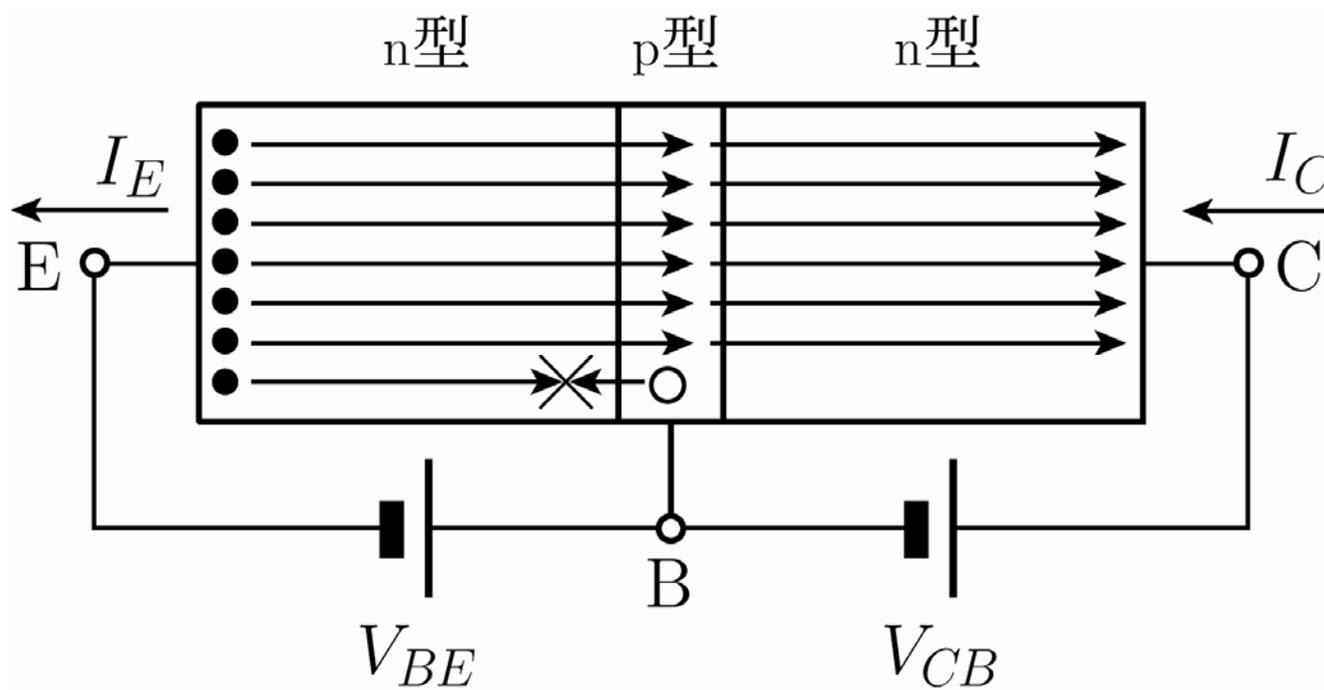
遮断領域： $V_{BE} < 0, V_{BC} < 0$

飽和領域： $V_{BE} > 0, V_{BC} > 0$

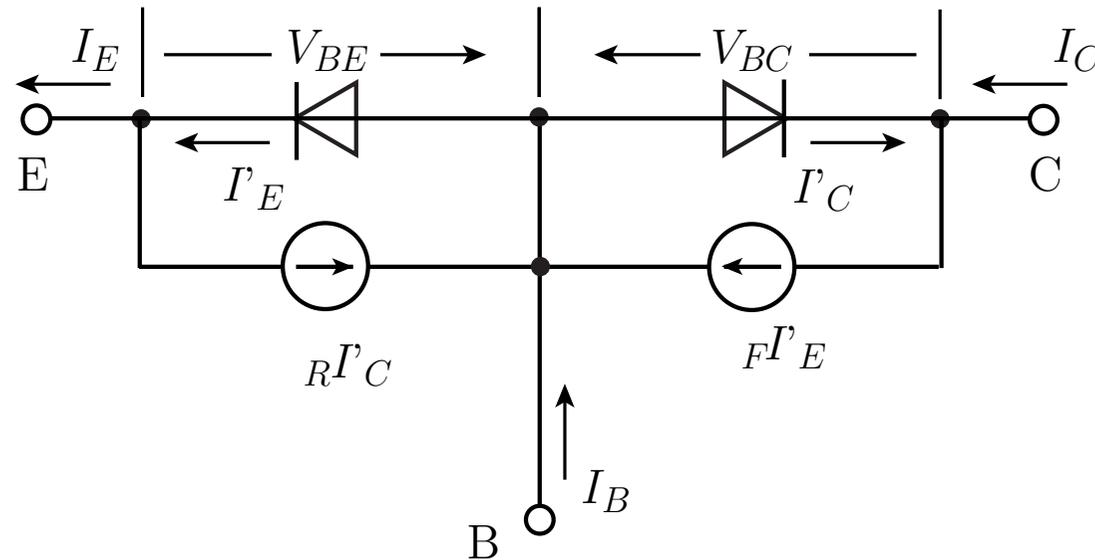


能動活性領域： $V_{BE} > 0, V_{BC} < 0$

能動活性領域

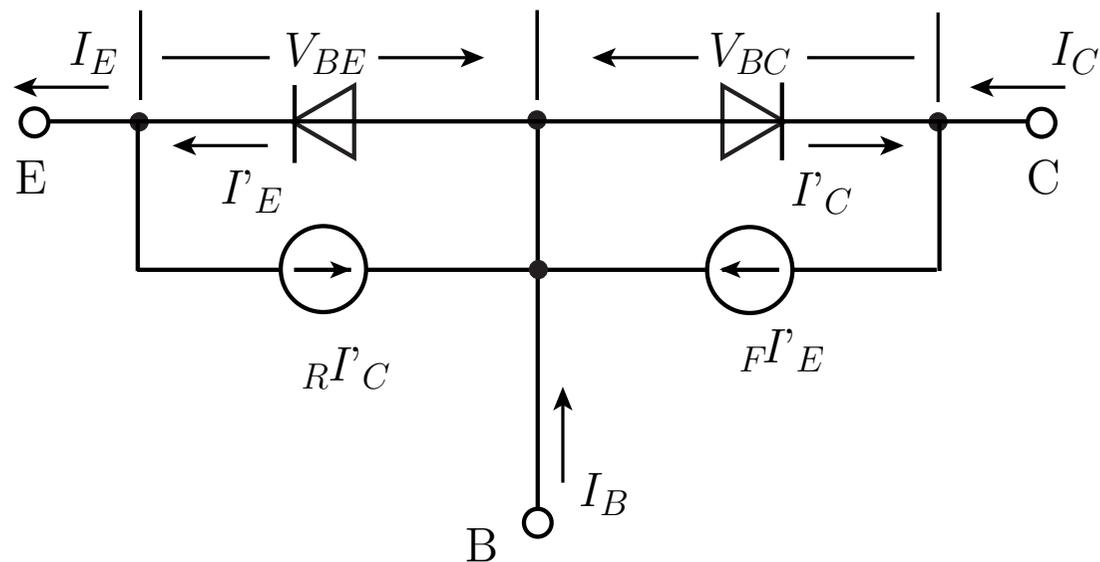


Ebers-Mollモデル



遮断領域 : $V_{BE} < 0, V_{BC} < 0$
能動活性領域 : $V_{BE} > 0, V_{BC} < 0$
飽和領域 : $V_{BE} > 0, V_{BC} > 0$
逆方向能動活性領域 : $V_{BE} < 0, V_{BC} > 0$

Ebers-Mollの方程式モデル



$$\begin{aligned}
 I_C &= \alpha_F I_E' - I_C' \\
 I_E &= I_E' - \alpha_R I_C'
 \end{aligned}$$

$$I_C' = I_{CS} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right\}$$

$$I_E' = I_{ES} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\}$$

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\} - I_{CS} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right\}$$

$$I_E = I_{ES} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) - 1 \right\} - \alpha_R I_{CS} \left\{ \exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) - 1 \right\}$$

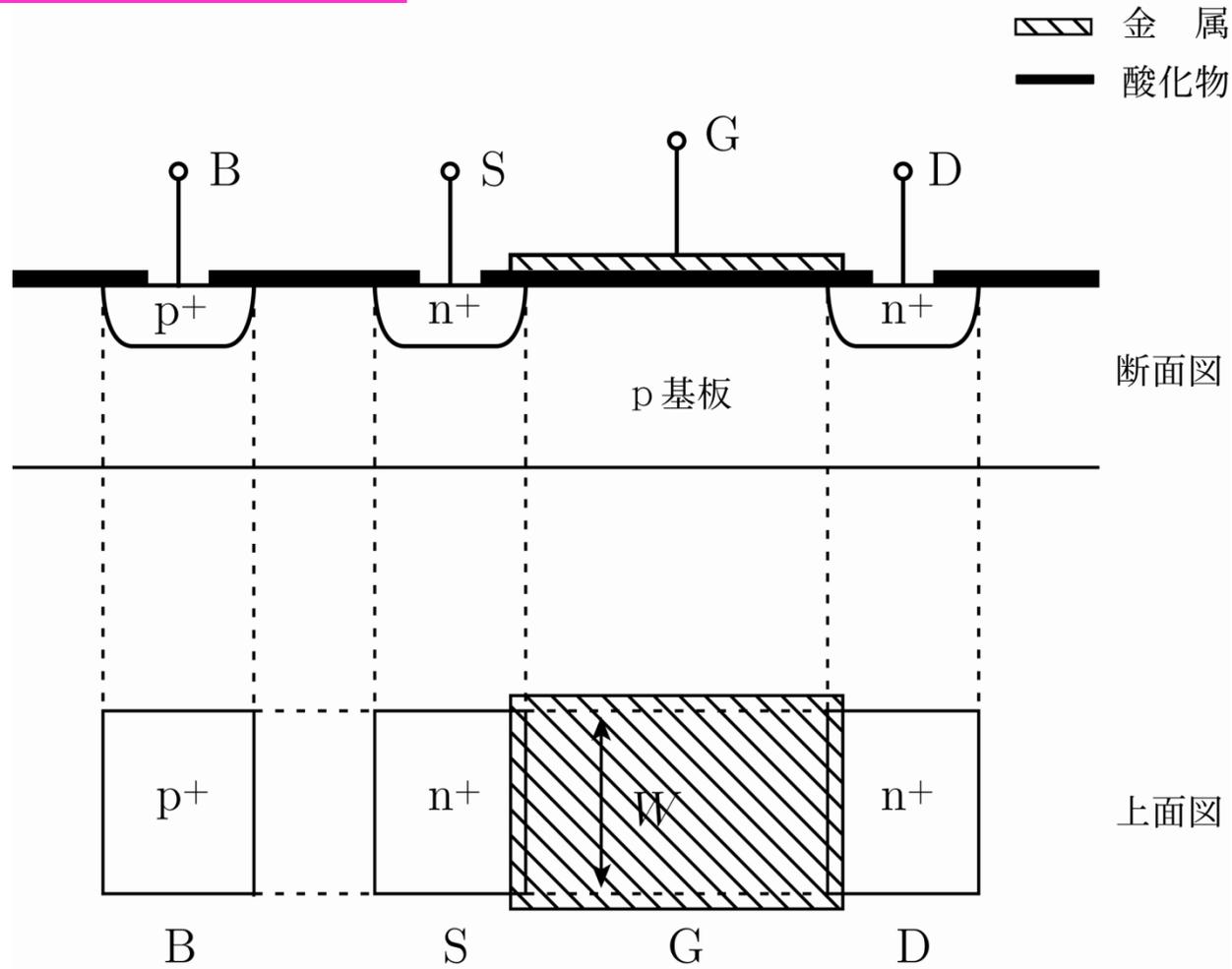
能動活性領域では, $\exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) \gg 1$, $\exp\left(\frac{qV_{BC}}{kT}\right) \ll 1$ と近似

$$I_C = \alpha_F I_{ES} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) + I_{CS}$$

$$I_E = I_{ES} \exp\left(\frac{qV_{BE}}{kT}\right) + \alpha_R I_{CS}$$

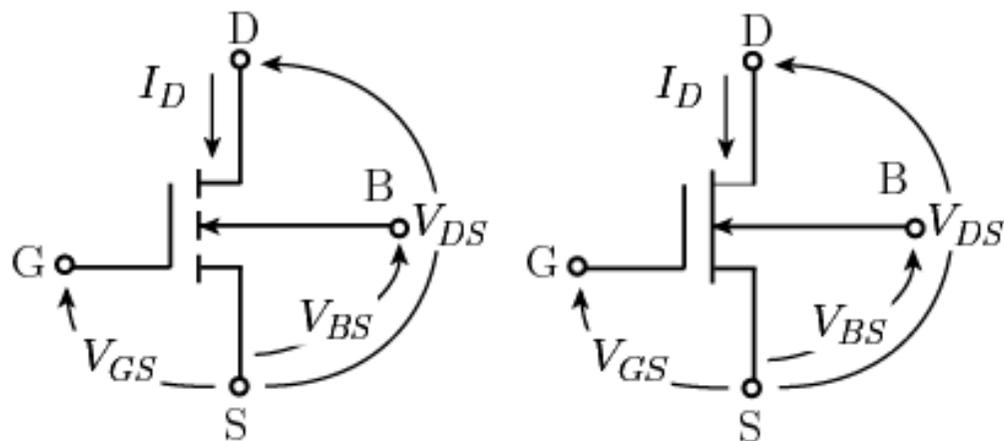
$$I_C = \alpha_F I_E + (1 - \alpha_F \alpha_R) I_{CS} = \alpha_F I_E + I_{CO}$$

MOSTランジスタの特性



B: Bulk, バルク S: Source, ソース
G: Gate, ゲート D: Drain, ドレイン

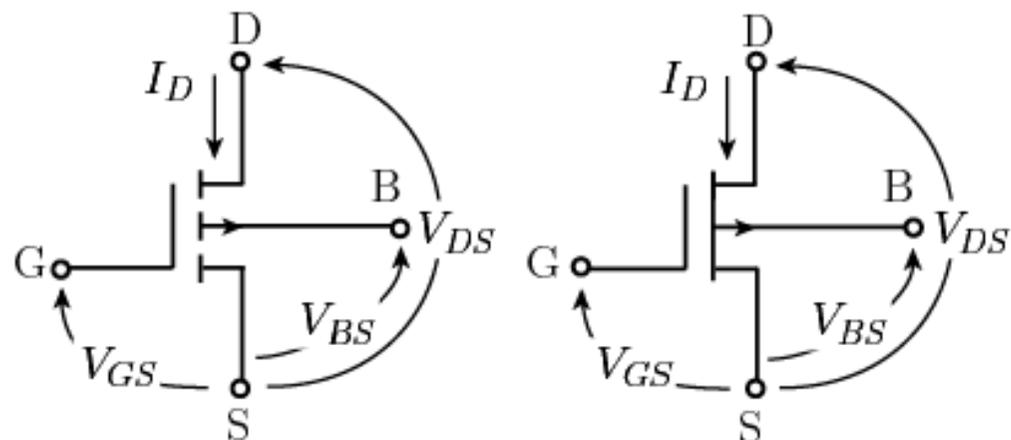
MOSトランジスタの記号



エンハンスメント型

ディプリーション型

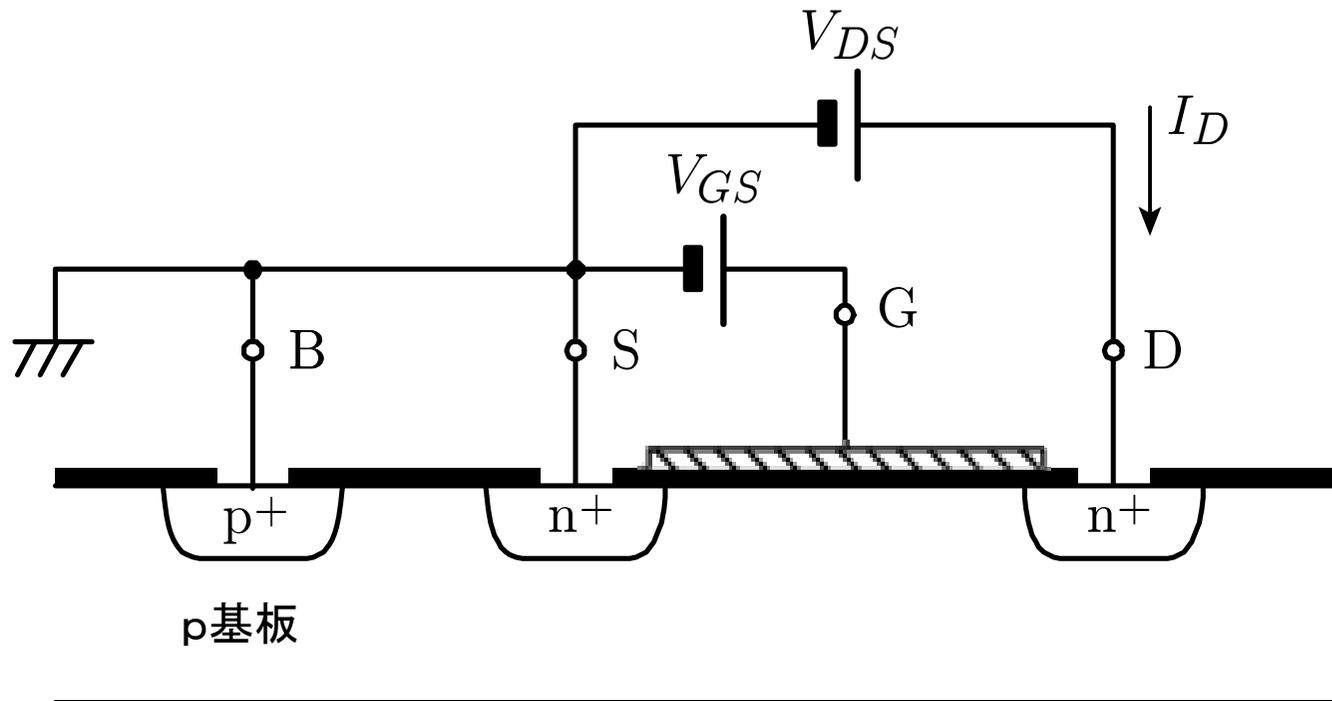
nチャネルMOSトランジスタ



エンハンスメント型

ディプリーション型

pチャネルMOSトランジスタ



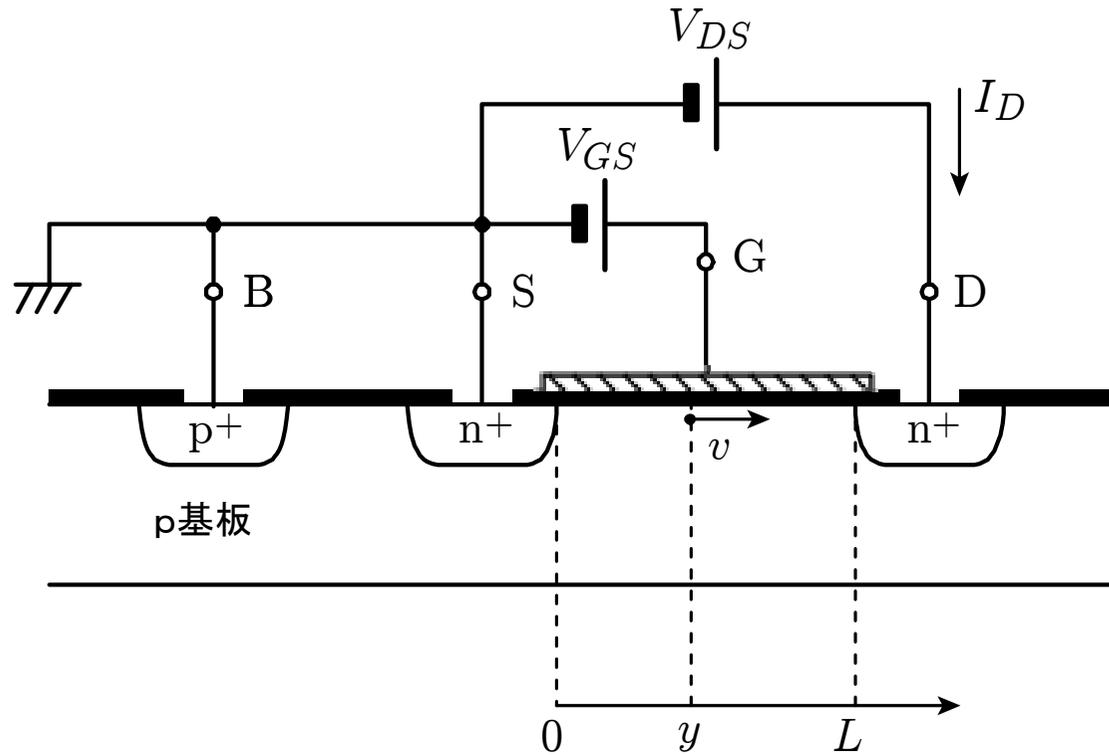
$V_{SB}=0$ と仮定

遮断領域 : $V_T \geq V_{GS}$

非飽和領域 : $V_{GS} - V_T > V_{DS} \geq 0$

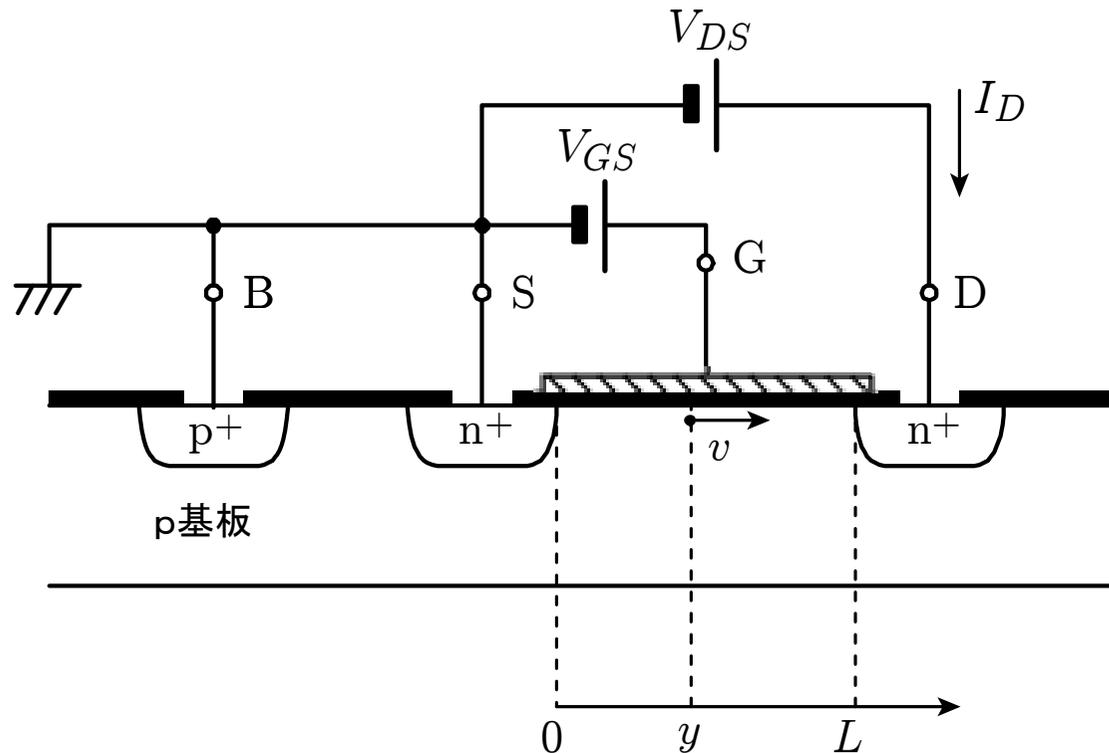
飽和領域 : $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T > 0$

非飽和領域： $V_{GS} - V_T > V_{DS} \geq 0$



地点 y におけるチャネルの電位： $V(y)$

地点 y における単位面積当たりの電荷： $Q(y)$



μ : 移動度

C_{OX} : 単位面積当たりのゲート酸化膜容量

$$Q(y) = -C_{OX} \{V_{GS} - V_T - V(y)\}$$

$$I_D = Q(y) \times W \times (-v)$$

$$Q(y) = -C_{OX} \{V_{GS} - V_T - V(y)\} \quad v = -\mu E$$

$$I_D = Q(y) \times W \times (-v) \quad E = -\frac{dV}{dy}$$

$$I_D = \mu C_{OX} W \{V_{GS} - V_T - V(y)\} \frac{dV}{dy}$$

$$\begin{aligned} \int_0^L I_D dy &= \int_0^L \mu C_{OX} W \{V_{GS} - V_T - V(y)\} \frac{dV}{dy} dy \\ &= \int_0^{V_{DS}} \mu C_{OX} W \{V_{GS} - V_T - V(y)\} dV \\ &= \left[\frac{-1}{2} \mu C_{OX} W \{V_{GS} - V_T - V(y)\}^2 \right]_0^{V_{DS}} \end{aligned}$$

$$I_D L = \mu C_{OX} W \left(V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

$$I_D = \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2}) V_{DS}$$

飽和領域： $V_{DS} \geq V_{GS} - V_T > 0$

$V_{DS} = V_{GS} - V_T$ となったときの I_D から変化しない。

2乗則

$$I_D = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} (V_{GS} - V_T)^2$$

$$\begin{aligned} \text{遮断領域} : & \quad V_T \geq V_{GS} \\ \text{非飽和領域} : & \quad V_{GS} - V_T > V_{DS} \geq 0 \\ \text{飽和領域} : & \quad V_{DS} \geq V_{GS} - V_T > 0 \end{aligned}$$

$$\text{遮断領域} : I_D = 0$$

$$\text{非飽和領域} : I_D = 2K \left(V_{GS} - V_T - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS}$$

$$\text{飽和領域} : I_D = K (V_{GS} - V_T)^2$$

$$K = \frac{1}{2} \mu C_{OX} \frac{W}{L} : \text{トランスコンダクタンスパラメータ}$$

MOSTランジスタにおける2次的効果

基板効果

$$V_T = V_{T0} + \gamma(\sqrt{2\phi_F - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_F})$$

チャネル長変調効果

$$I_D = K(V_{GS} - V_T)^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

回路素子の特徴

- 相対精度が高い(0.1%~1%程度)
- 絶対精度が低い(±数十%程度)
- 抵抗値の範囲: 数百 Ω ~数十k Ω
- 容量値の範囲: 0.1pF程度~100pF程度
- インダクタ: 1GHz以上なら使用可能