

半導体デバイス －第6回－

2019年10月24日

1. 小テスト (6)
2. 半導体の電氣的性質：ドリフト電流（オームの法則）と拡散電流の復習
3. pn接合の形成の復習
4. 小テスト (5) 解説
5. pn接合の電圧-電流特性
6. 金属－半導体接触
7. 金属－酸化物－半導体（MOS）構造：MOSトランジスタの基礎

☆教科書の第6章6.3、第9章、第11章の11.1、11.3.1に対応

ここまでの重要な公式

☆ドリフト・拡散電流 (p型) $J_h = qp\mu_h E - qD_h \frac{dp}{dx}$

☆ドリフト・拡散電流 (n型) $J_e = qn\mu_e E + qD_e \frac{dn}{dx}$

☆導電率 $\sigma = \frac{1}{\rho} = q(n\mu_e + p\mu_h) \quad (5.10) \quad (\text{導電率})$

☆抵抗率 $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{q(n\mu_e + p\mu_h)} \quad (5.10)' \quad (\text{抵抗率})$

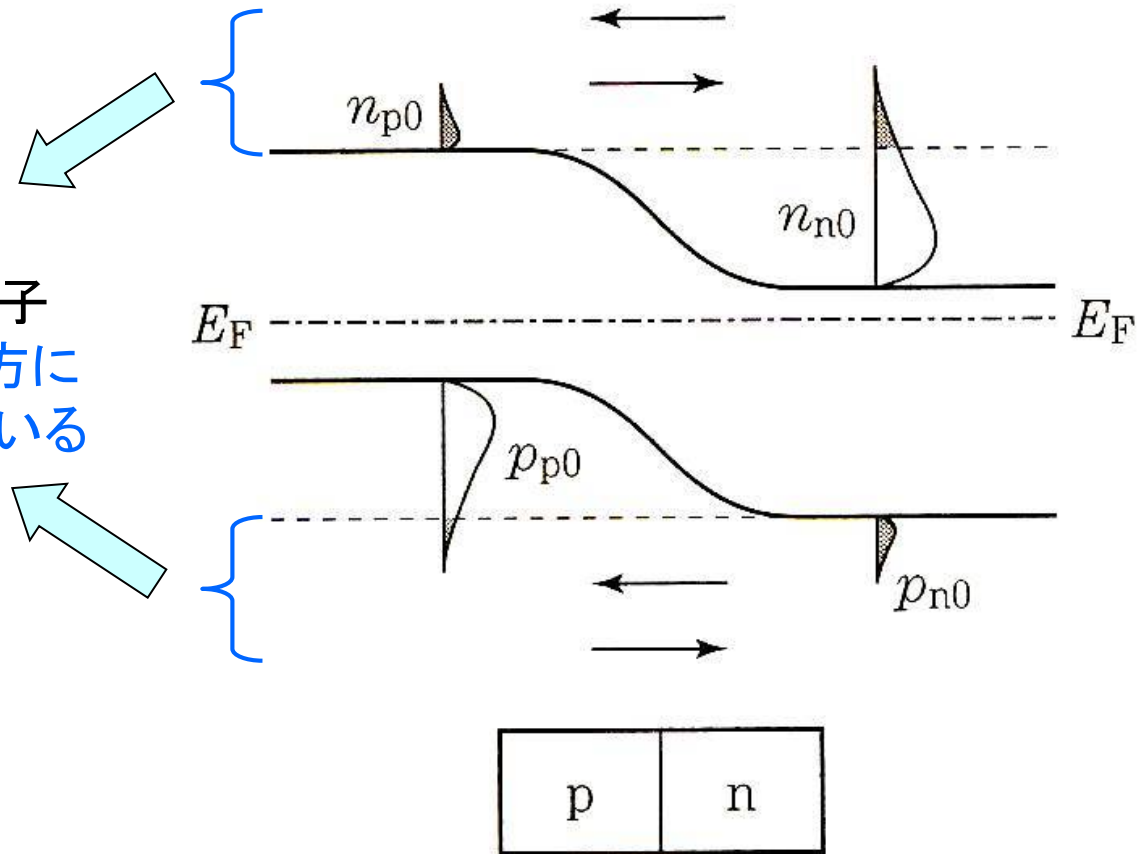
☆アインシュタインの関係式 $D = \frac{k_B T}{q} \mu$

5. pn接合の電圧-電流特性

pn接合の電圧-電流特性 (1)

(a)

破線の上(下)にある電子
(正孔)の数が等しく、**両方に
流れる電流が釣り合っている**



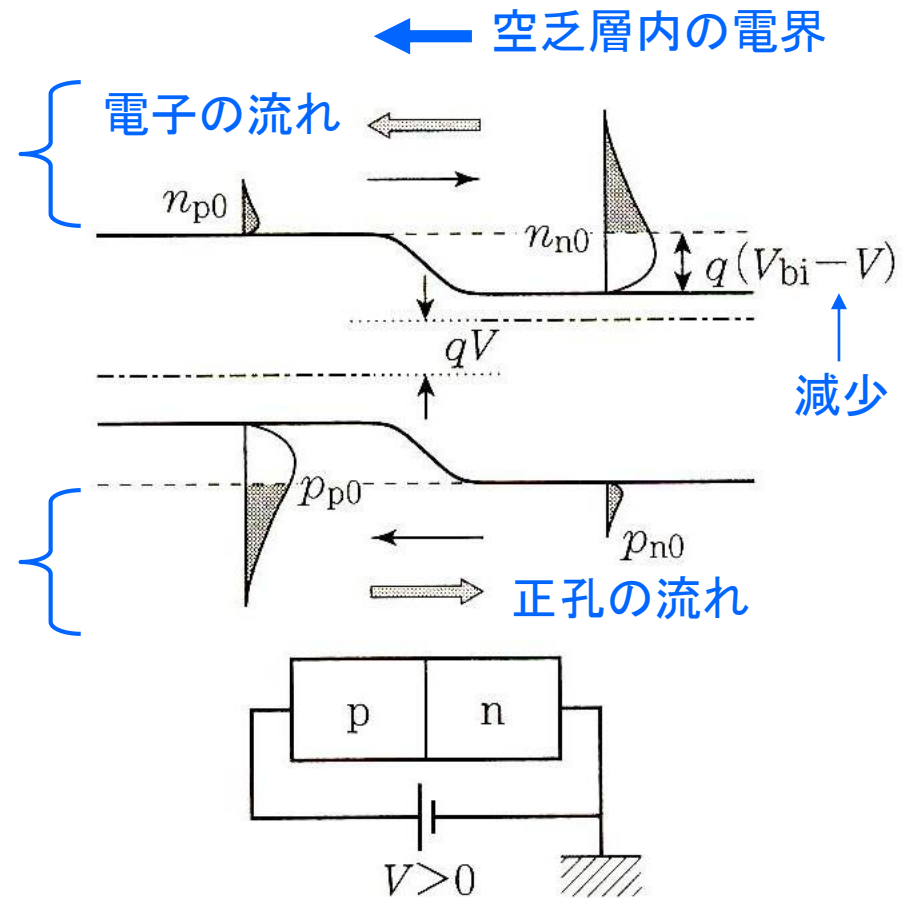
(a) 熱平衡状態

pn接合のエネルギー帯図とキャリア分布

pn接合の電圧-電流特性 (2)

(b)

- 電流量は少なく中性領域での電圧降下は無視でき、空乏層に集中して電圧が印加されると仮定
- p側に正の電圧を印加すると、空乏層内の電界を打ち消す方向になるので、p側のバンドが下がり、熱平衡状態より内蔵電位は小さくなる。
- 破線から上(下)にある多数キャリアの電子(正孔)の数が多くなり多数キャリアが反対方向に流れ込む



(b) 順バイアス状態

pn接合のエネルギー帯図とキャリア分布

pn接合の電圧-電流特性 (3)

順バイアス条件では、等価的に内蔵電位が小さくなると解釈できるので、空乏層中でのキャリアの生成と再結合が無いとすると、前回32ページ(1),(2)式の類推から、反対側に到達するキャリアの量 p_n および n_p は次式で与えられる。

$$p_n = p_{p0} \exp\left\{-\frac{q(V_{bi} - V)}{k_B T}\right\} = p_{n0} \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (6.6) \Rightarrow (6.8)$$

$$n_p = n_{n0} \exp\left\{-\frac{q(V_{bi} - V)}{k_B T}\right\} = n_{p0} \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (6.5) \Rightarrow (6.7)$$

順バイアス状態は熱的に平衡ではないが、以上はほぼ妥当な仮定である。

(6.5),(6.6)式で与えられる正孔と電子は反対側の中性領域においては少数キャリアとなり、多数キャリアとの再結合で消滅する。

この振舞いは(5.21),(5.22)式の定常解($\partial p / \partial t = \partial n / \partial t = 0$)から求める。
ただし、中性領域の電界はゼロなのでドリフト電流は無視できる。

pn接合の電圧-電流特性 (4)

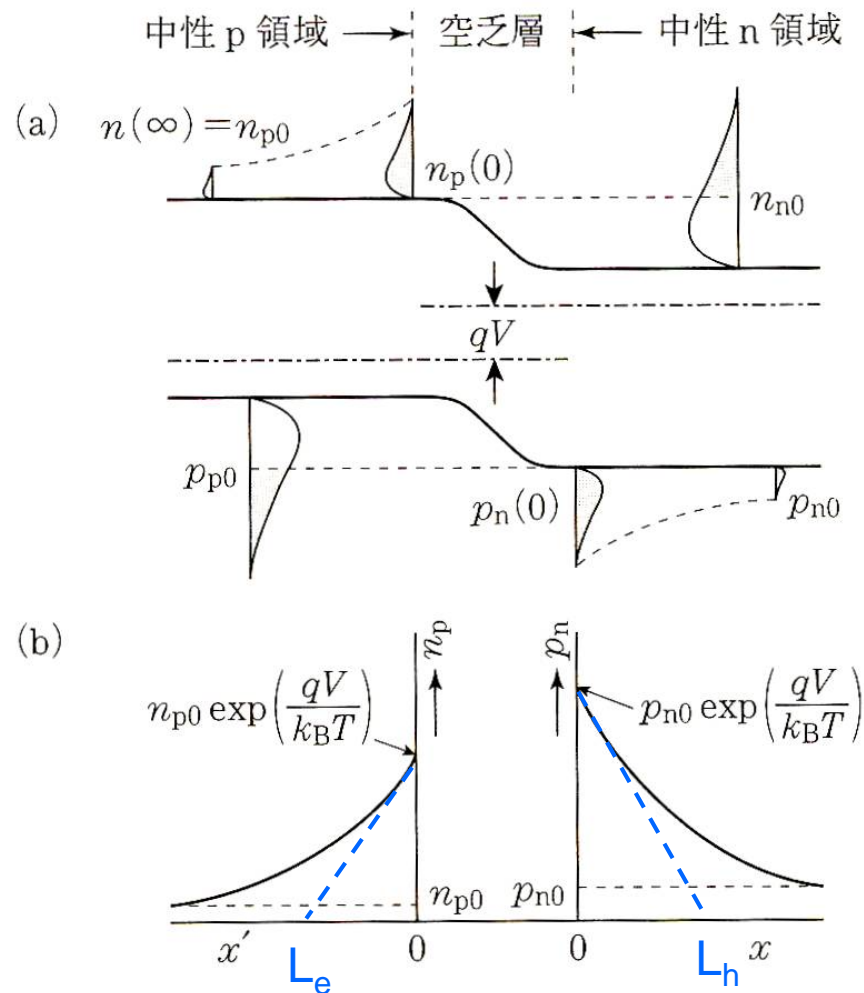
少数キャリアがポイント

最終的には少数キャリアの振舞を表現した、次の拡散方程式に帰着する。座標は図(b)のように定義する。

$$D_h \frac{d^2 p_n}{dx^2} = \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_h}$$

$$D_e \frac{d^2 n_p}{dx'^2} = \frac{n_p - n_{p0}}{\tau_e}$$

一般解は指数関数となる。



(a) バンド図, (b) 少数キャリア濃度

pn接合の電圧-電流特性 (5)

境界条件

- $x \rightarrow \infty$ で $p_n = p_{n0}$, $x' \rightarrow \infty$ で $n_p = n_{p0}$
- $x = x' = 0$ で (6.5), (6.6) 式となる

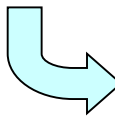
$$p_n(x) = p_{n0} + p_{n0} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_h}\right) \quad (6.16)$$

$$n_p(x') = n_{p0} + n_{p0} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x'}{L_e}\right) \quad (6.15)$$

ここで、 $L_h = \sqrt{D_h \tau_h}$, $L_e = \sqrt{D_e \tau_e}$ を少数キャリアの拡散長という。

電流を求めるには、(6.15)式、(6.16)式を前回9ページの式に代入する。

但し、 $E = 0$ として拡散電流項のみを考える。


$$\left\{ \begin{array}{l} J_h = \cancel{qp\mu_h E} - qD_h \frac{dp}{dx} \\ J_e = \cancel{qn\mu_e E} + qD_e \frac{dn}{dx} \end{array} \right.$$

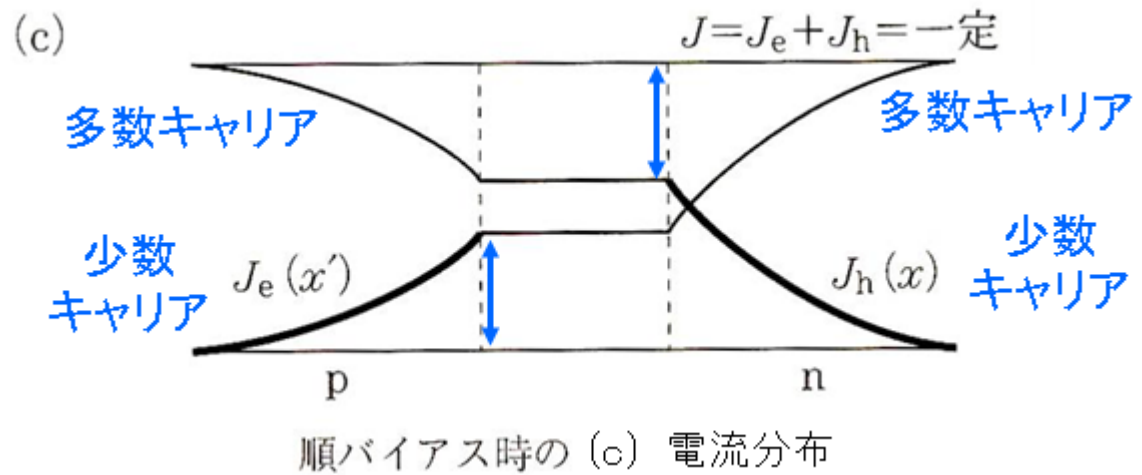
pn接合の電圧-電流特性 (6)

$$J_h(x) = \frac{qp_{no}D_h}{L_h} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x}{L_h}\right) \quad (6.18)$$

$$J_e(x') = -\frac{qn_{po}D_e}{L_e} \left\{ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \exp\left(-\frac{x'}{L_e}\right) \quad (6.17)$$

x と x' の正方向が逆向きであるので、電流はいずれも p 側から n 側へ流れる。

右図の太線が(6.18), (6.17)式で表される少数キャリア電流密度



pn接合の電圧-電流特性 (7)

空乏層中でのキャリアの生成、再結合はないとしているので、空乏層端($x=0, x'=0$)におけるこの2種類の電流の和が、 pn 接合を流れる全電流となる。

$$\begin{aligned} J &= q \left(\frac{D_h}{L_h} p_{no} + \frac{D_e}{L_e} n_{po} \right) \left\{ \exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right\} \\ &\equiv J_s \left\{ \exp \left(\frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right\} \end{aligned} \quad (6.19)'$$

ここで、 J_s を逆方向飽和電流密度という。

(6.17), (6.18)式と(6.19)式から、各中性領域での多数キャリアの電流がわかる。(前のページの図(c)の細線)

→ 接合に近づくにつれて多数キャリアが減少し、
少数キャリアと置き換わる

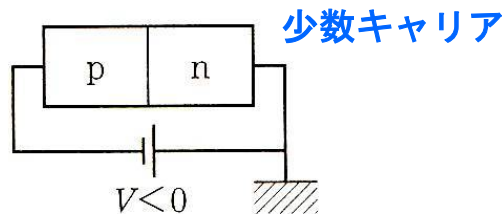
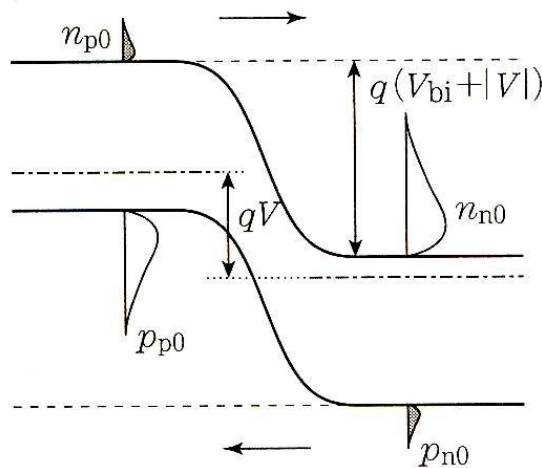
pn接合の電圧-電流特性 (8)

(c)

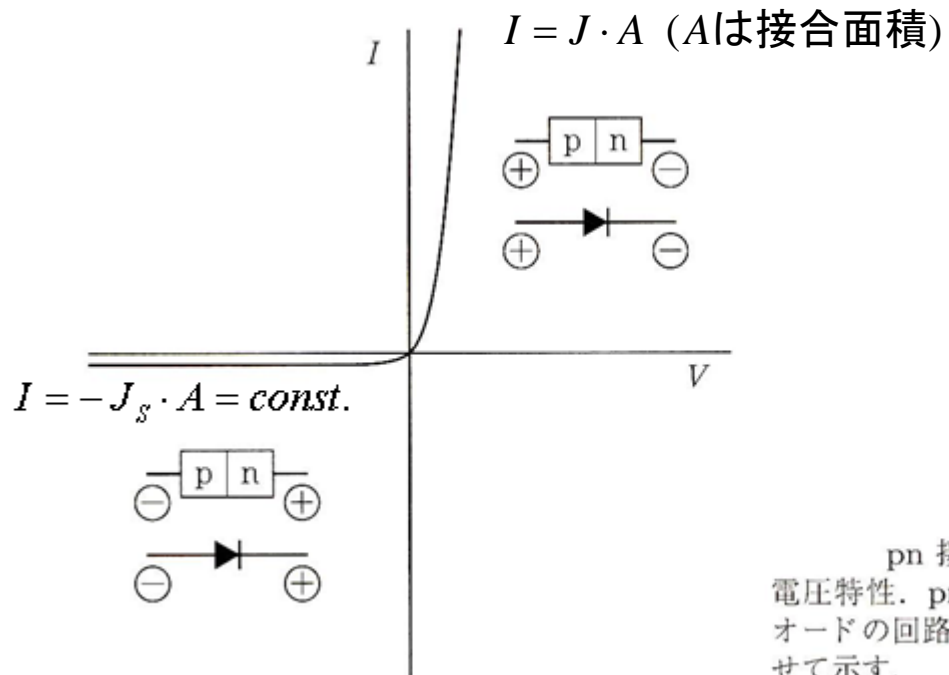
- ・ 多数キャリアは障壁を乗り越えられない。
- ・ 少数キャリアであるp側の電子とn側の正孔がエネルギーの低い方向へ移動し、電圧によらない小さな電流となる。(6.19)式で $V < 0$ で表現可。

少数キャリア

$$\Rightarrow J \approx -J_s$$



(c) 逆バイアス状態



pn 接合の電流-電圧特性. pn 接合ダイオードの回路記号をあわせて示す.

pn接合のエネルギー帯図とキャリア分布

pn接合の電圧-電流特性 (9)

$$J = J_s \left\{ \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right\} \quad (6.19)'$$

常温での大きさを見積もる。

$T = 300K$ のとき

$$\frac{k_B T}{q} = \frac{1.38 \times 10^{-23} \times 300}{1.602 \times 10^{-19}} = 0.0258 \cong 26mV$$

→ 重要な値

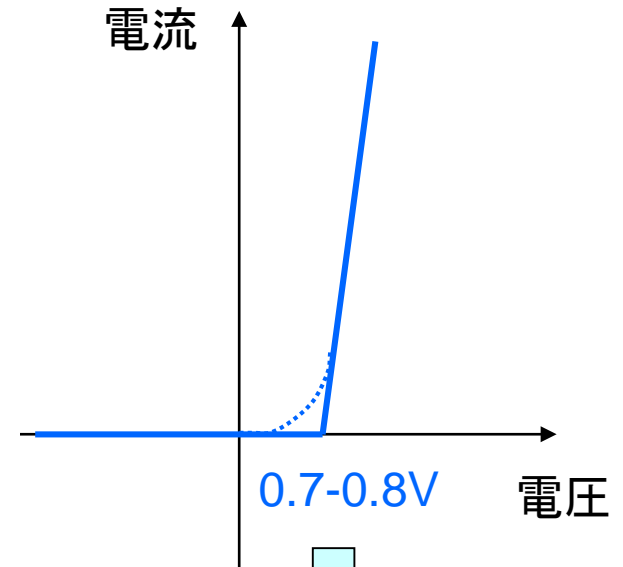
順バイアス方向で $V = 0.7V$ とすると

$$\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) = 6.1 \times 10^{11} \text{ なので、指数関数が支配的。}$$

順方向の電流値は $1mA \sim 10mA$ のオーダー。

一方、逆方向電流は $\mu A \sim pA$ のオーダーで非常に小さい。

ダイオードの簡易モデル

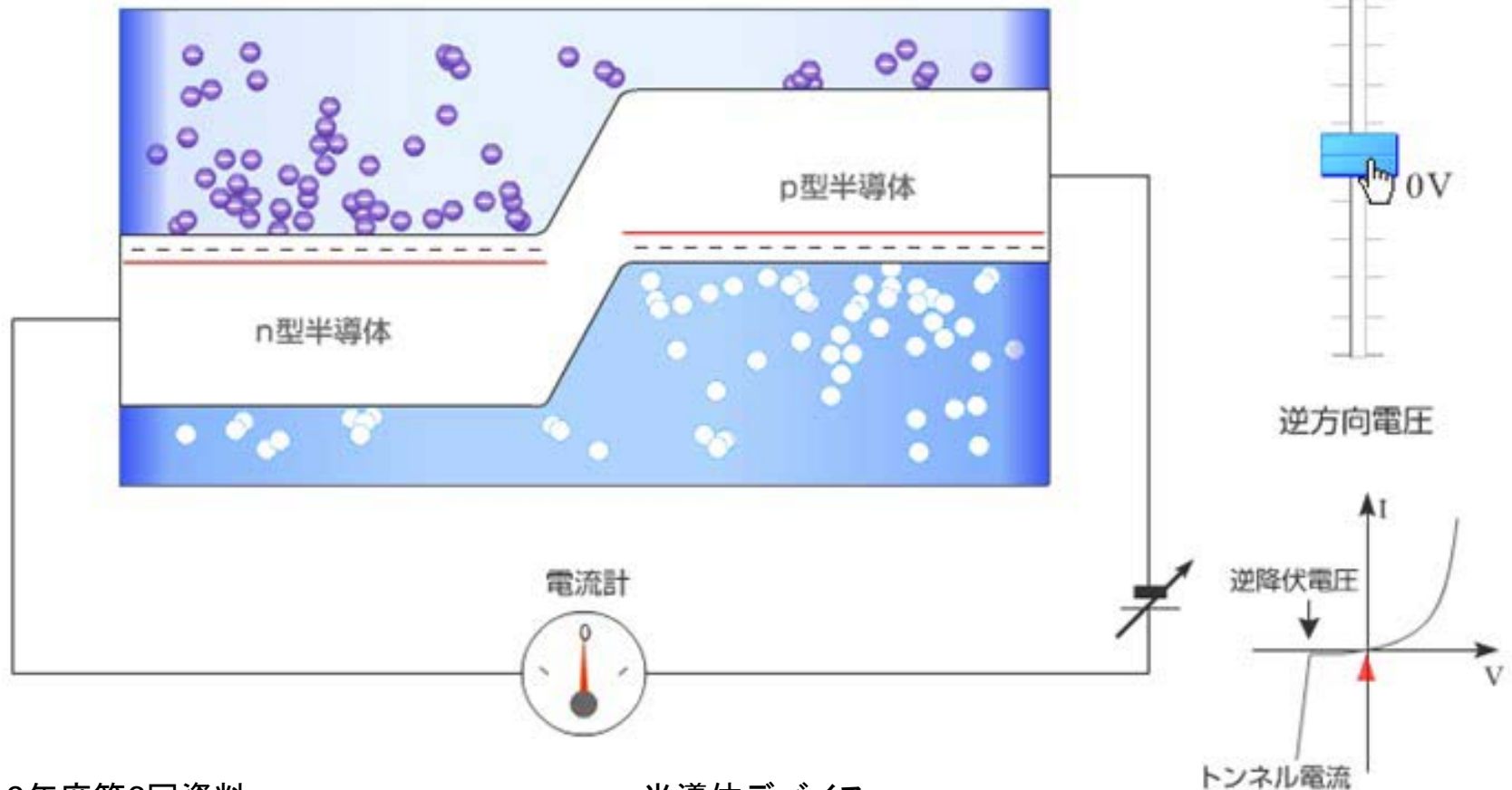


内蔵電位と関連
→ どっと流れ始める

ツェナーダイオード(定電圧ダイオード)

ツェナーダイオード：空乏層幅が通常の半導体よりも極端に狭い → トンネル効果の発現
通常のpn接合：逆方向では電流がながれない。

量子力学 電子はポテンシャル障壁(壁)を通り抜けることができる
スライダーを動かして電子の動き(電流)を見てみよう



6. 金属－半導体接触

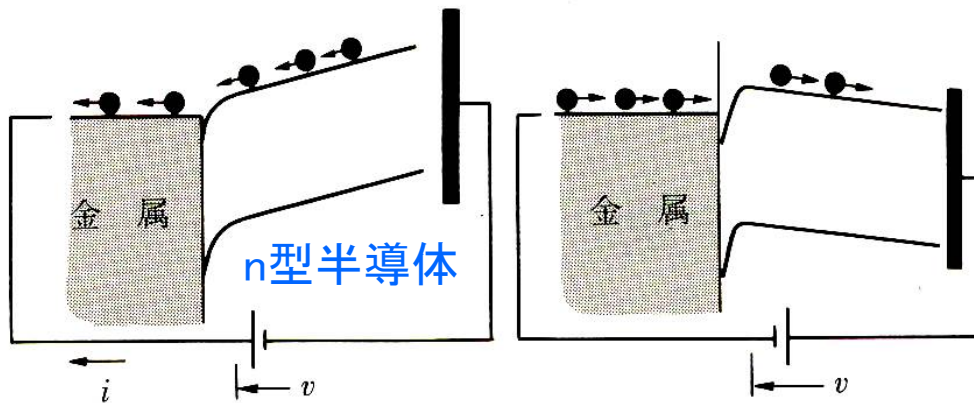
→ 金属の種類により2種類の特性ができる

- : 電極形成
- : ダイオード特性

オーム性接触(オーミックコンタクト)

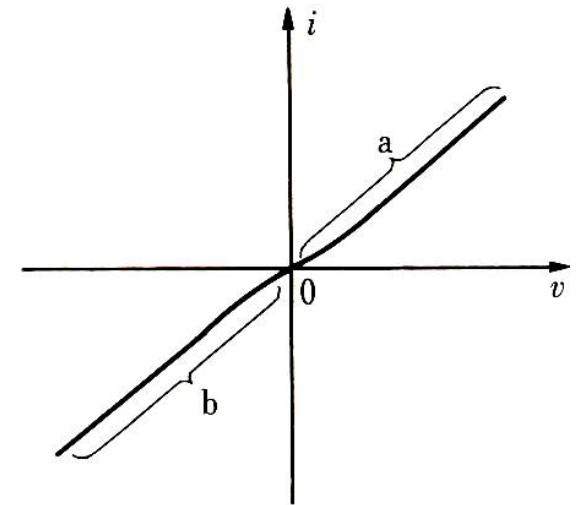
金属と半導体が接触しても、接触面に高いポテンシャルの障壁は無く通常の抵抗のように両方向に電流が流れる条件

→ 半導体デバイスから金属電極を取出すときに重要
実際のデバイスでは不純物の非常に多い領域(n^+ 領域)を金属と n 型半導体の間に設ける



(a) 順バイアス時 (b) 逆バイアス時

バンド構造

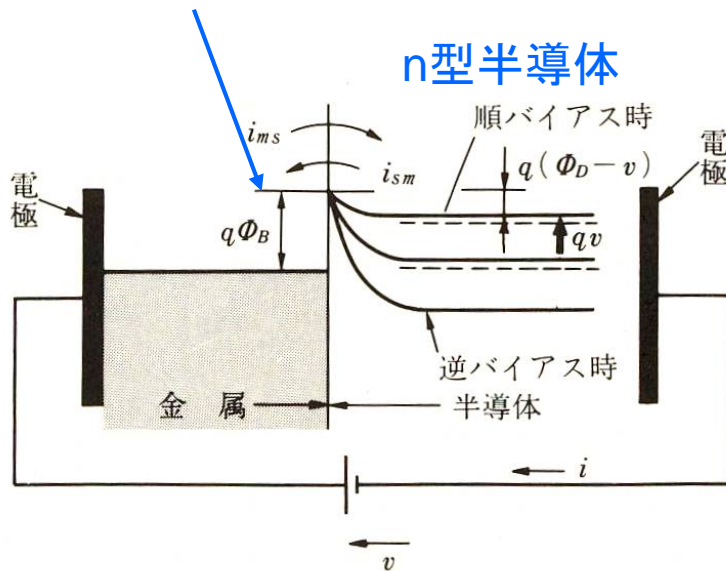


電圧—電流特性

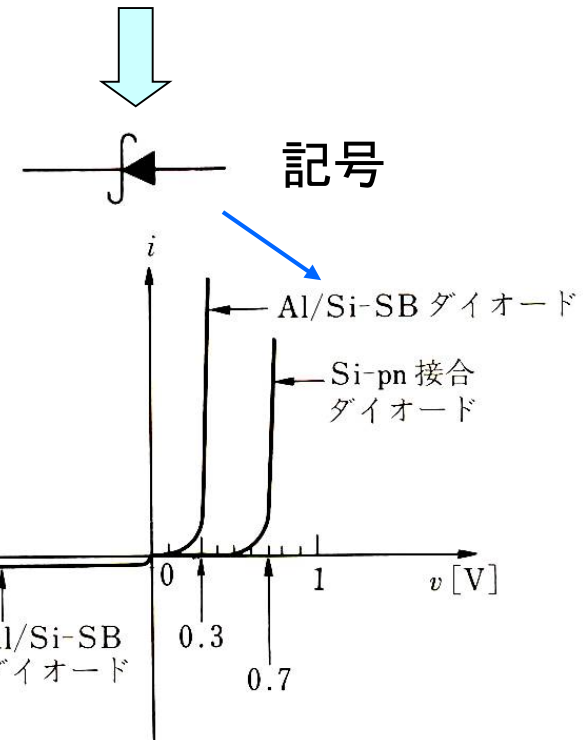
ショットキー障壁接触

金属と半導体の接触面にショットキー障壁という
ポテンシャル障壁が存在しダイオード特性になる条件
→ショットキーバリアダイオード(SBD)という

ショットキー障壁



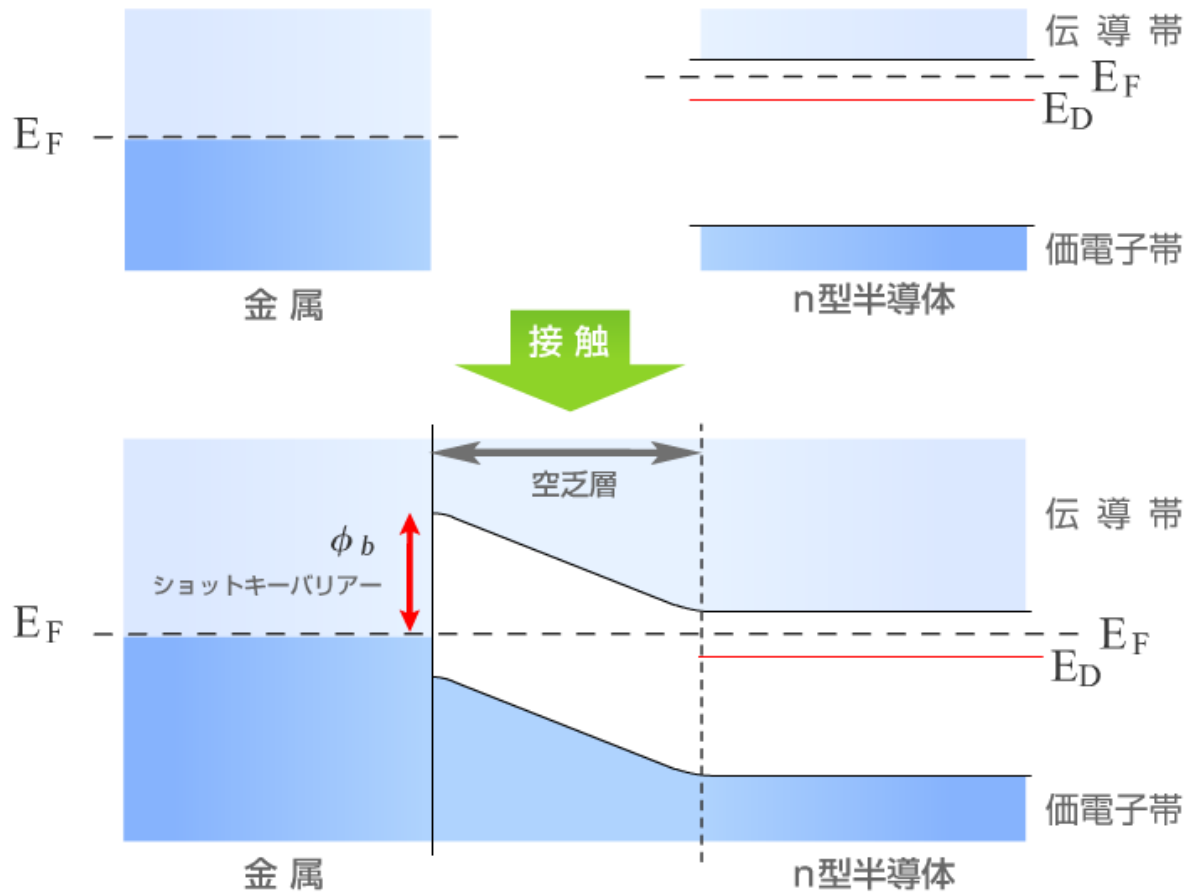
バンド構造



電圧－電流特性

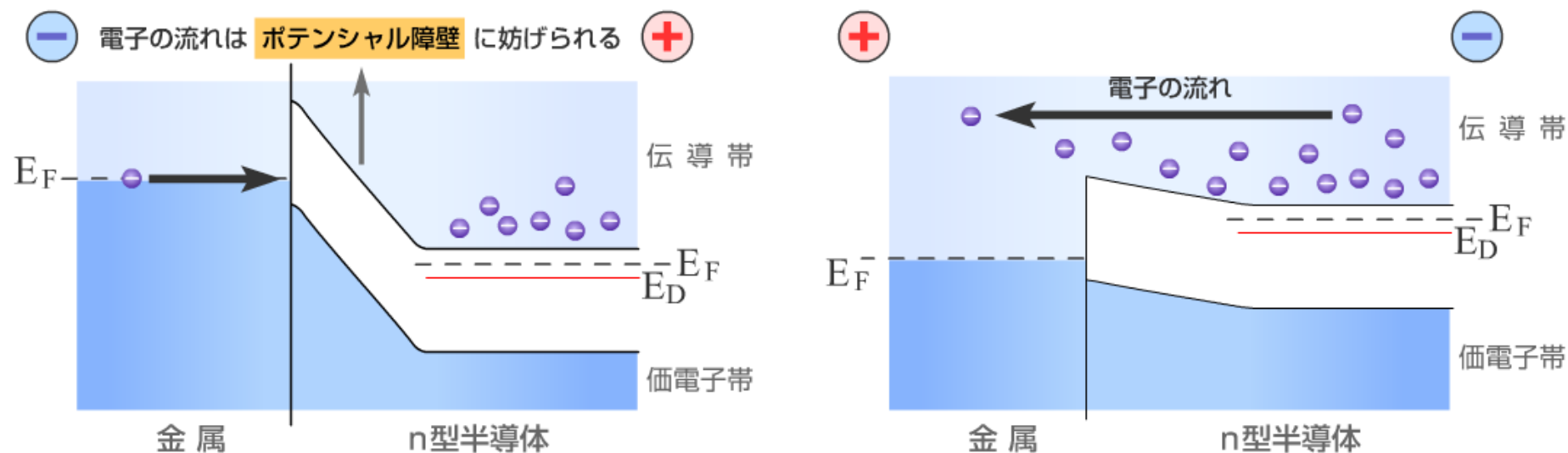
金属・半導体接触

ショットキーバリア・ダイオード

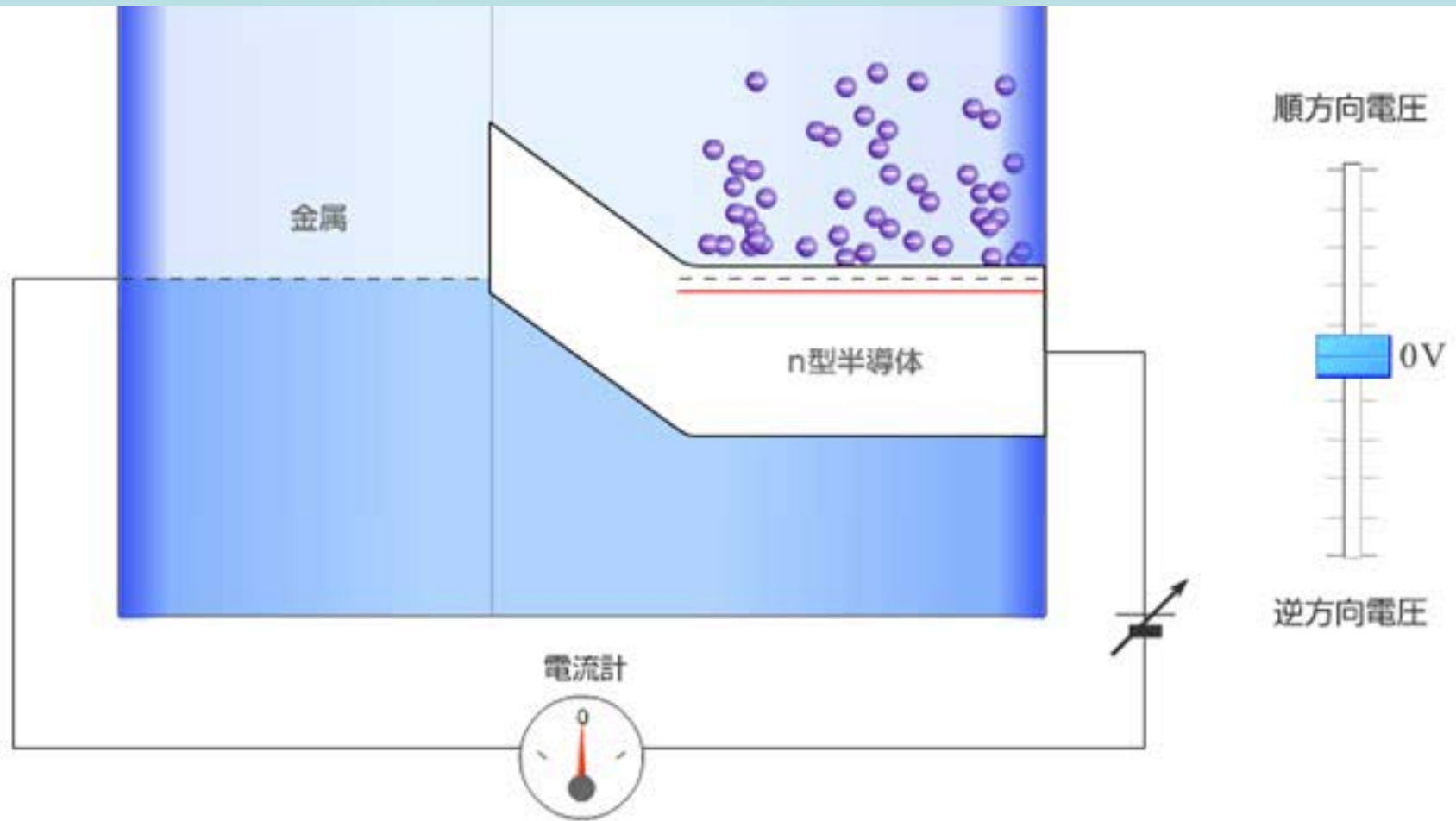


ショットキーバリアダイオードの整流特性

整流特性は基本的に p n 接合型半導体に類似



ショットキーバリアダイオードの整流特性



ダイオードの電流電圧特性

$I = I_s \exp(qV/nkT)$ 電子の分布が室温でボルツマン分布によるため

n : 理想係数 (理想的なショットキーダイオードでは1)

注) このアニメーションでは再結合は考慮されない。

7. 金属－酸化物－半導体(MOS)構造

→MOSTランジスタの基礎構造

11.1、11.2では2端子のMOSダイオードから反転層の概念を導入
11.3以降でMOSTランジスタ(MOSFET)に発展させる

一般的な名称

MIS: Metal-Insulator-Semiconductor

金属－絶縁物－半導体

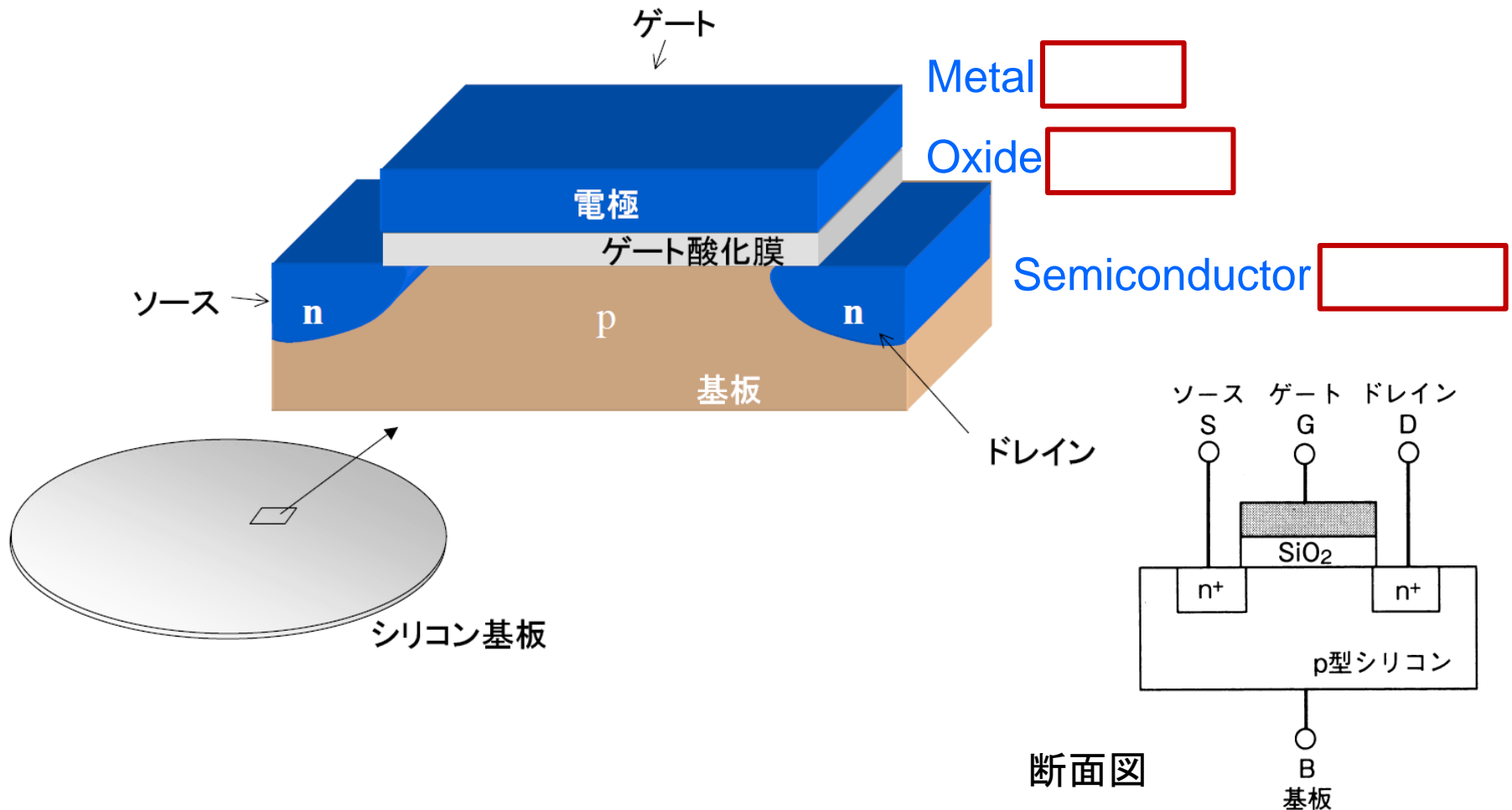
絶縁物が酸化膜(SiO_2 など)の場合

MOS: Metal-Oxide-Semiconductor

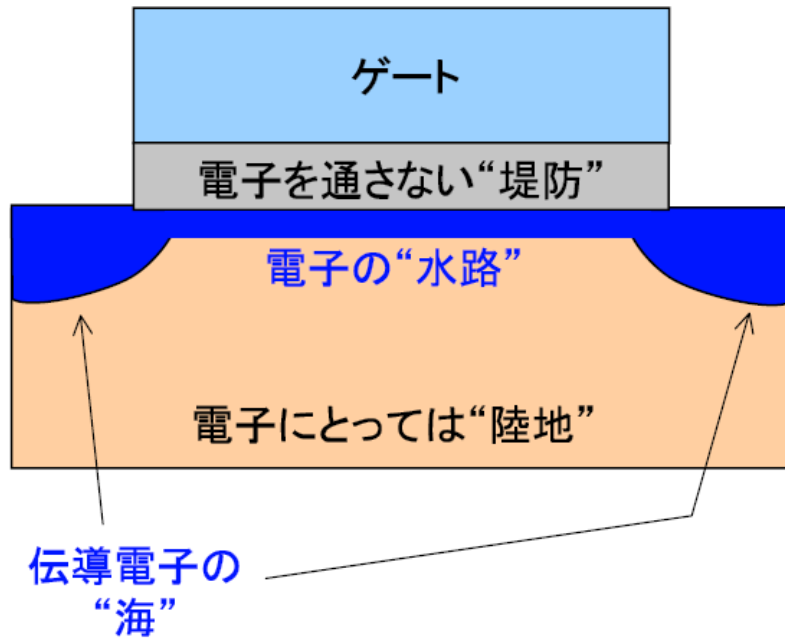
金属－酸化物－半導体

MOSトランジスタ (FET)の構造

FET: Field Effect Transistor, 電界効果トランジスタ



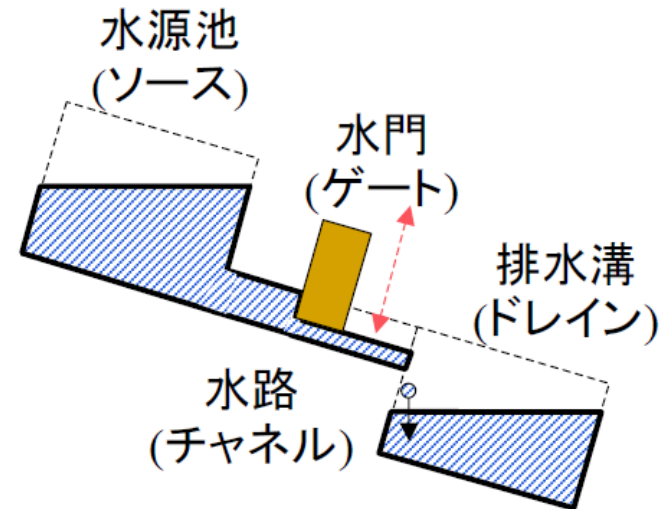
MOSFETの動作イメージ



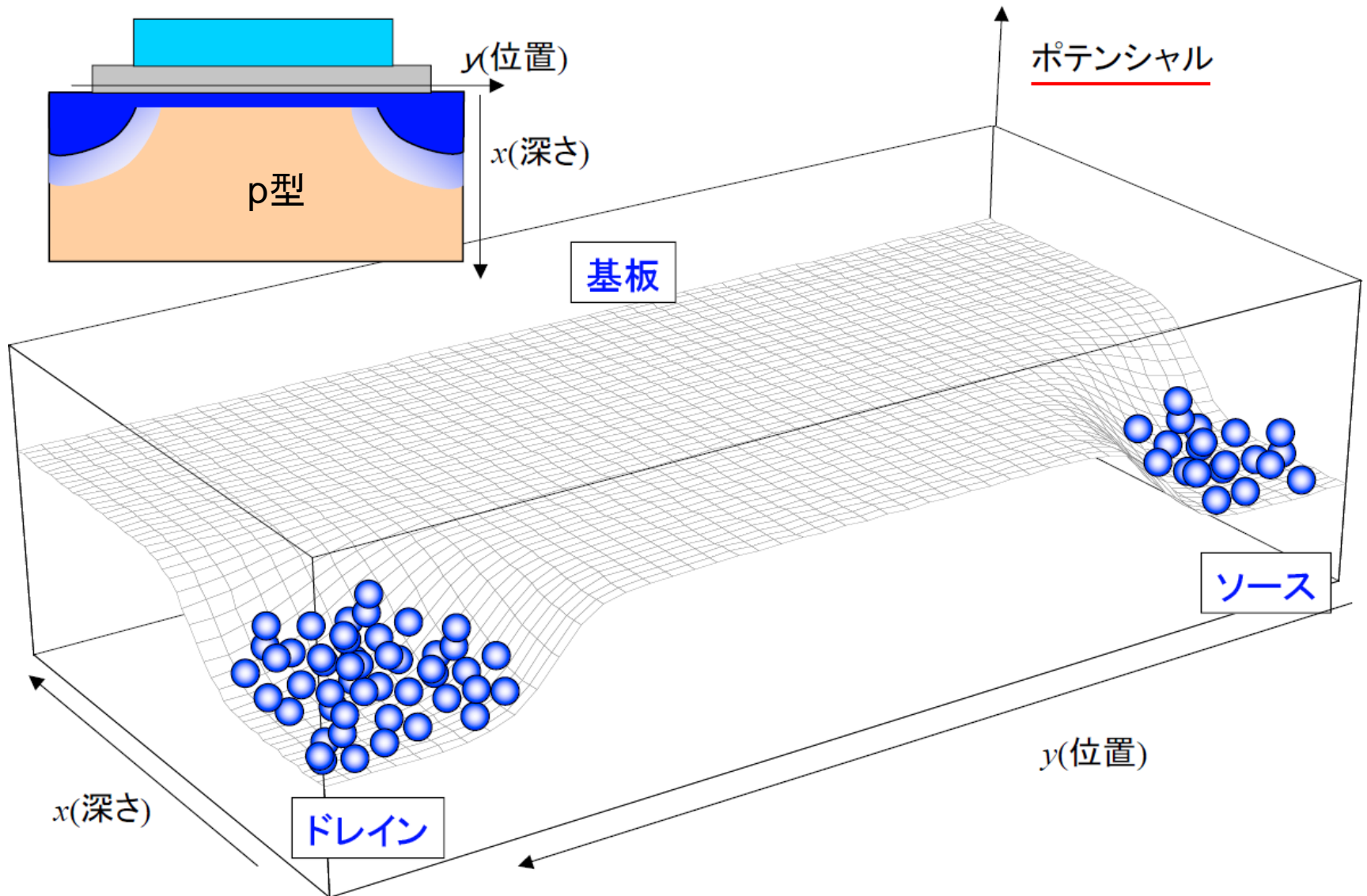
参考: Transistor = trans- + resistor
変換 抵抗

MOSFETはソース・ドレイン間の電流を
ゲート電圧によって制御するデバイス

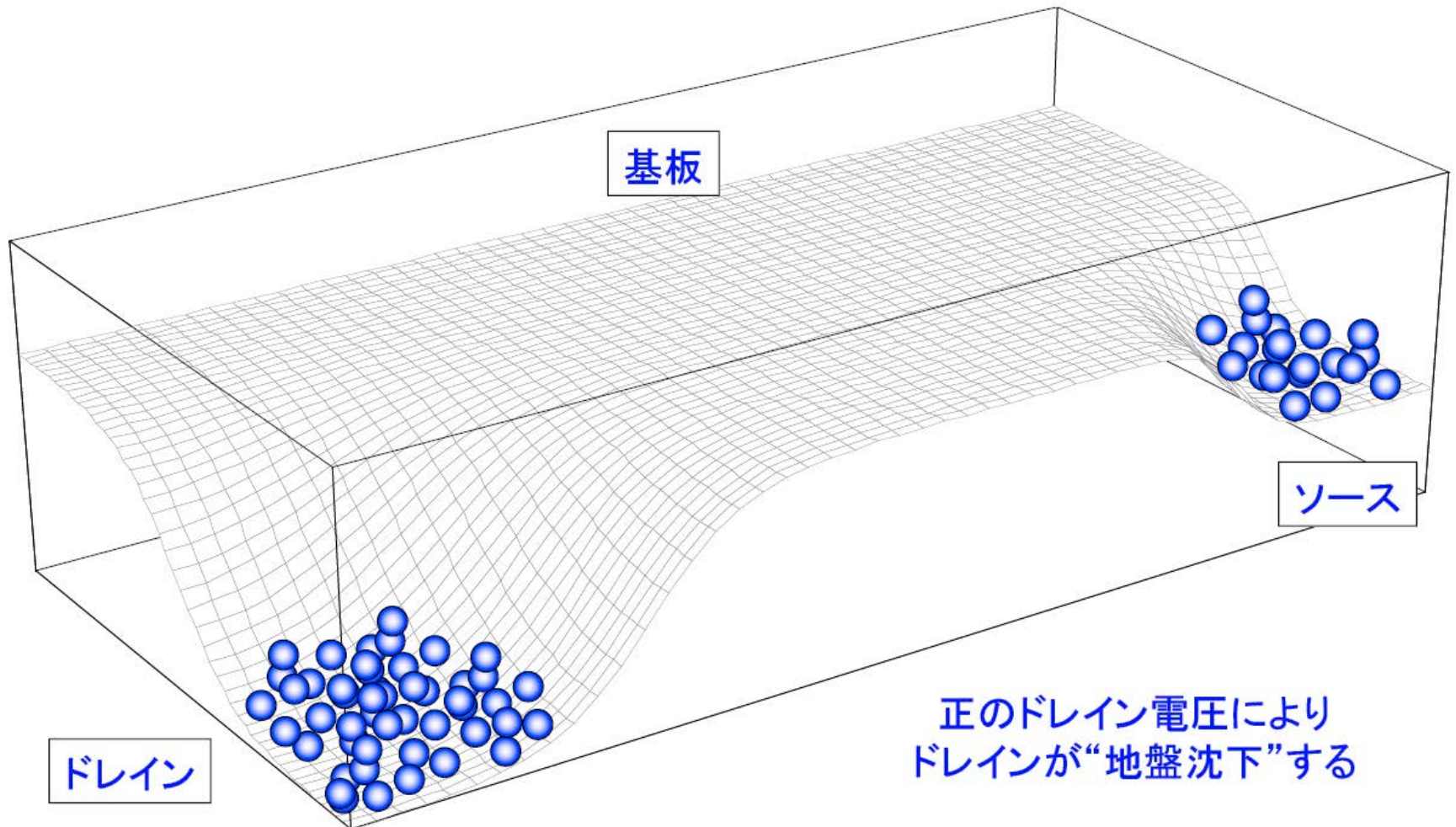
電流量調節装置, スイッチ



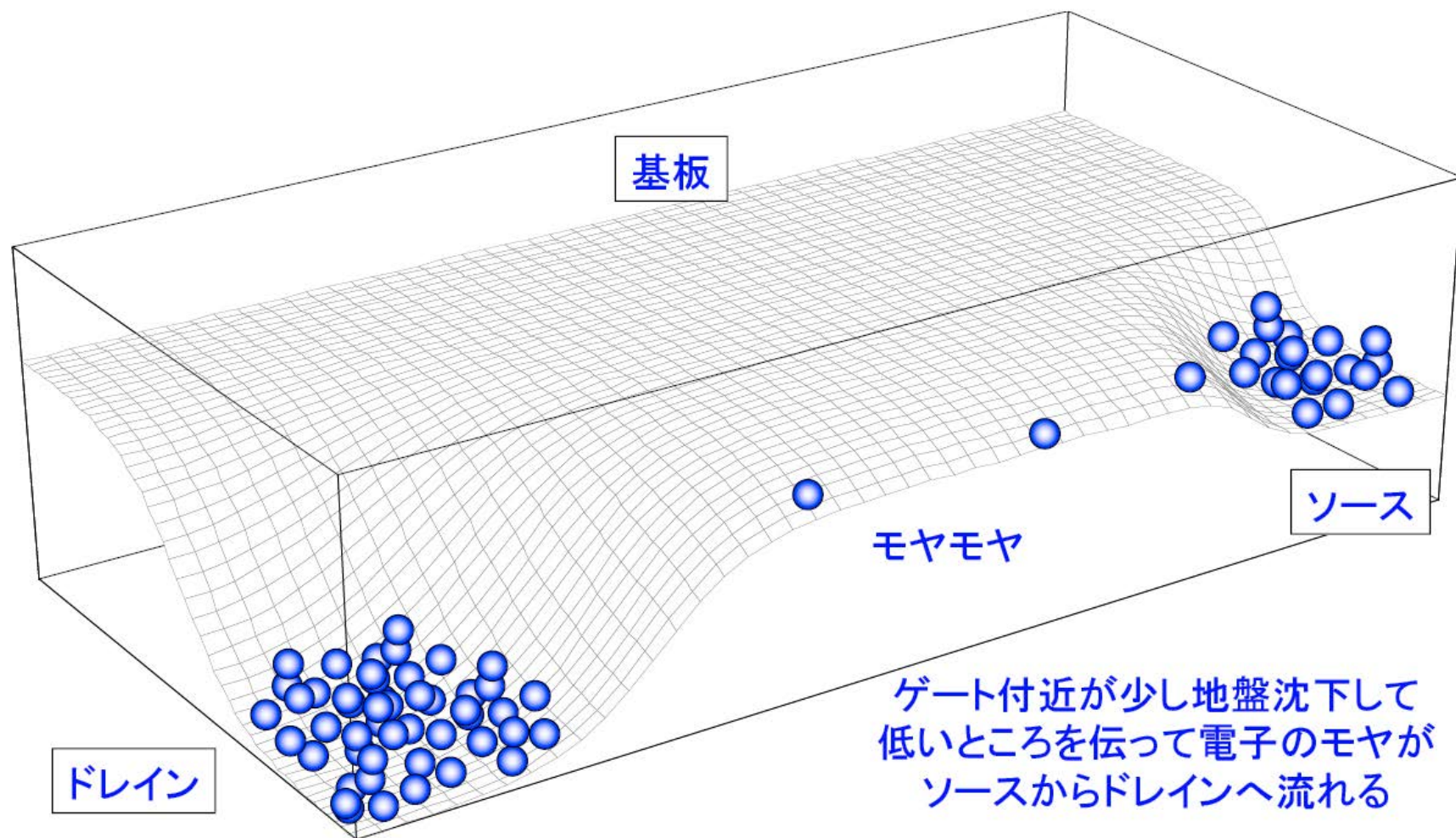
MOSFETでの電子の様子



ドレインに正電圧を加えると



ゲートにも正電圧を加えると



ゲートにさらに高い正電圧を加えると

□ という電子のチャネルができる
→ □ に化ける

