

# 集積回路設計技術・ 次世代集積回路工学特論

松田順一

平成26年度

# 概要

1. はじめに
2. 半導体中の基本特性概要
3. 2端子MOS構造
4. 3端子MOS構造
5. 4端子MOSTランジスタ
6. 微細化による特性への影響
7. QS(Quasi Static)動作
8. 低中間周波動作
9. 高周波動作
10. 集積回路用高耐圧デバイス (EDMOS or LDMOS) : 公開講座

上記 2. ~9. の資料は、以下の本をベースに作られている。

Yannis Tsividis, Operation and Modeling of the MOS Transistor Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1999.

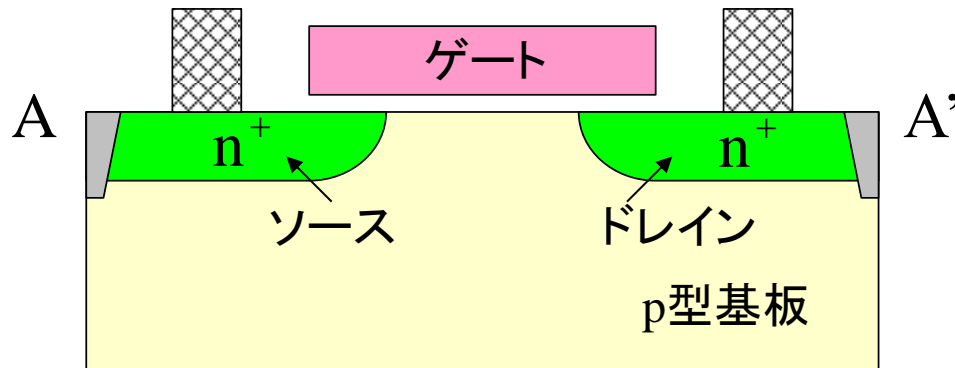
# はじめに

- 集積回路製品の技術開発区分
- MOSFET構造
- CMOSプロセス・フロー概要(別資料)
- 参考文献

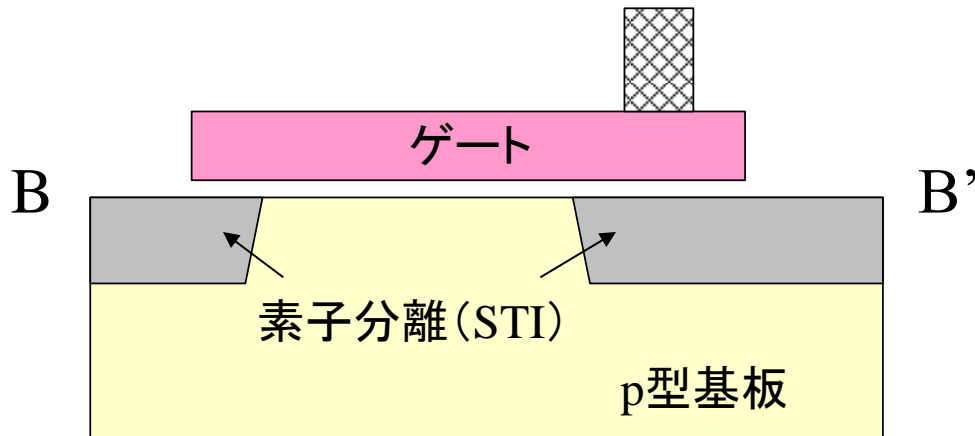
# 集積回路製品の技術開発区分

技術開発・設計	項目	設計・製造 メーカー	ファンダリ メーカー	組立 メーカー	ファブレス メーカー	設計ツール ベンダ	製造装置 メーカー
前工程個別プロセス技術開発	リソグラフィ	○	○	×	×	×	○
	エッチング						
	イオン注入						
	拡散・酸化						
	CVD						
メタライズ							
前工程プロセス・デバイス技術開発	プロセス・インテグレーション	○	○	×	×	×	×
	デバイス・パラメータ抽出						
後工程技術開発	組立・検査	○	×	○	×	×	×
集積回路設計	システム設計	○	×	×	○	×	×
	回路設計						
	レイアウト設計						
EDA技術開発	設計ツール・TCAD	×	×	×	×	○	×

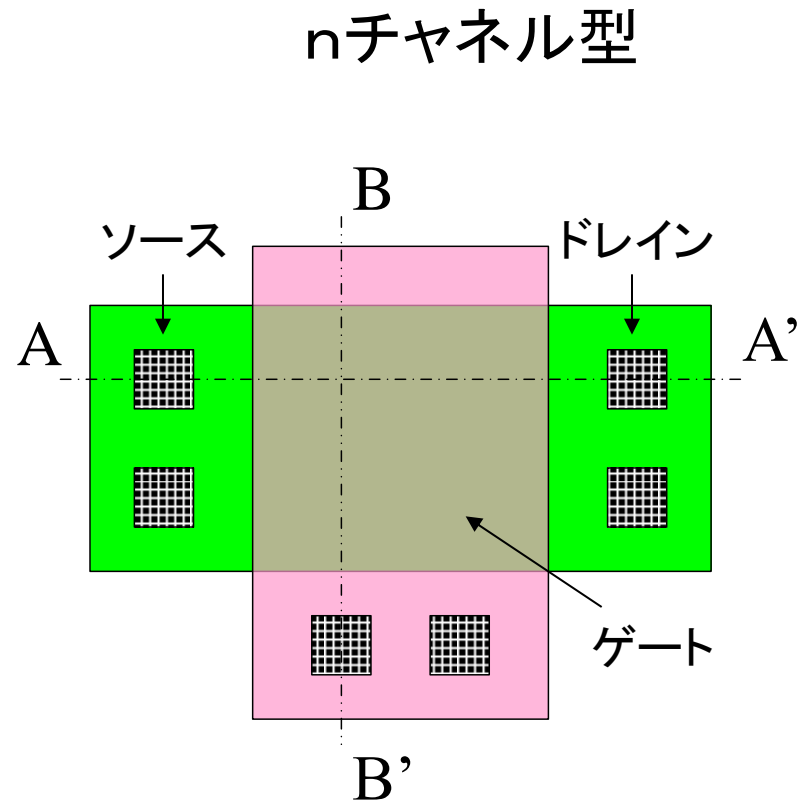
# MOSFET構造



A-A'の断面



B-B'の断面



MOSFETパターン

# 参考文献

## MOS デバイス

- (1) Yannis Tsividis, Operation and Modeling of the MOS Transistor Second Edition, McGraw-Hill, New York, 1999.
- (2) Yannis Tsividis and Colin McAndrew, Operation and Modeling of the MOS Transistor Third Edition, Oxford University Press, New York, 2011.

## MOSとバイポーラ・デバイス

- (3) Yuan Taur and Tak H. Ning, Fundamental of Modern VLSI Devices, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- (4) Yuan Taur and Tak H. Ning, Fundamental of Modern VLSI Devices Second Edition, Cambridge University Press, Cambridge, 2013.

## パワー・デバイス

- (5) J. Jayant Baliga, Fundamentals of Power Semiconductor Devices, Springer, New York, 2008.
- (6) J. Jayant Baliga, Advanced Power MOSFET Concept, Springer, New York, 2010.

## アナログ回路

- (7) 谷口研二, CMOSアナログ回路入門, CQ出版社, 2005.
- (8) Behzad Razavi, Design of Analog CMOS Integrated Circuits, McGraw-Hill, New York, 2001.

## 電源回路

- (9) 原田耕介, 二宮保、顧文建、スイッチングコンバータの基礎、コロナ社、1992.
- (10) Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics Second Edition, Springer, New York, 2001.

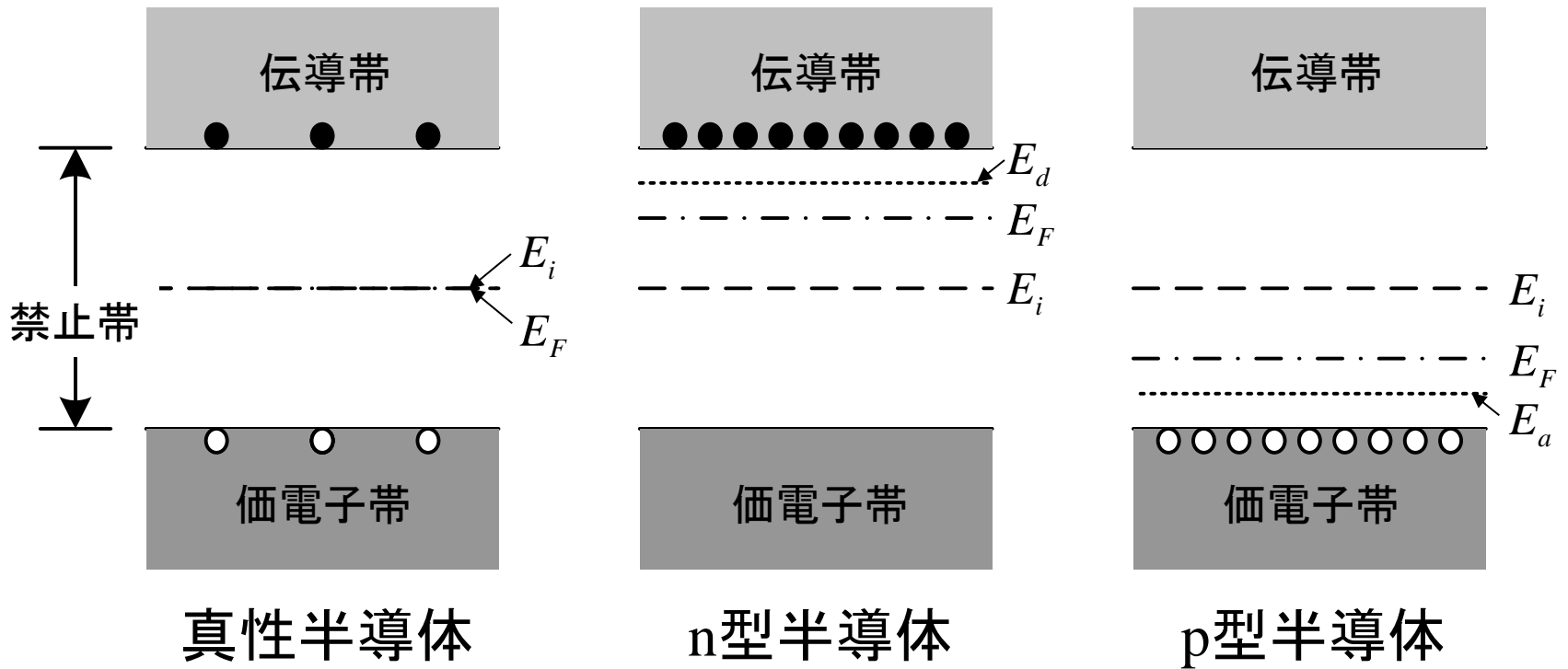
## アナログ・レイアウト

- (11) Alan Hastings, The Art of Analog Layout Second Edition, Pearson Education, New Jersey, 2001.

# 半導体中の基本特性概要

- エネルギー・バンド
- 半導体中の電子と正孔
  - 平衡状態での電子と正孔
- 半導体中の伝導
  - ドリフト電流
  - 拡散電流
  - ドリフト電流 + 拡散電流
- 接触電位
- pn接合

# エネルギー・バンド



● 電子

○ 正孔

$E_i$ : 真性エネルギー・準位

$E_F$ : フェルミ・エネルギー・準位

$E_d$ : ドナー・エネルギー・準位

$E_a$ : アクセプタ・エネルギー・準位



# 半導体中の電子と正孔

## 平衡状態の場合

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_F - E_i}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_F}{kT}\right)$$

$$np = n_i^2$$

$$\phi_F = -\frac{E_F - E_i}{q}$$

$n$ : 電子密度

$p$ : 正孔密度

$n_i$ : 真性キャリア密度

$E_i$ : 真性エネルギー準位

$E_F$ : フェルミエネルギー準位

$k$ : ボルツマン定数

$T$ : 絶対温度

$\phi_F$ : フェルミ電位

$q$ : 素電荷量

# 2点間での電子密度比

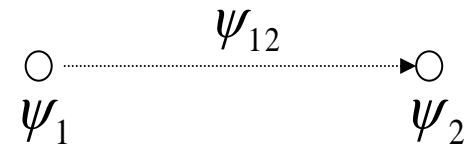
2点での電子密度  $n_1, n_2$

$$\begin{aligned}\frac{n_1}{n_2} &= \exp\left(\frac{E_{i2} - E_{i1}}{kT}\right) \\ &= \exp\left(\frac{q(\psi_1 - \psi_2)}{kT}\right) \\ &= \exp\left(\frac{q\psi_{12}}{kT}\right) \\ &= \exp\left(\frac{\psi_{12}}{\phi_t}\right)\end{aligned}$$

$\psi$ : ポテンシャル

$$\Delta\psi = -\frac{\Delta E_i}{q}$$

$$\psi_{12} = \psi_1 - \psi_2$$



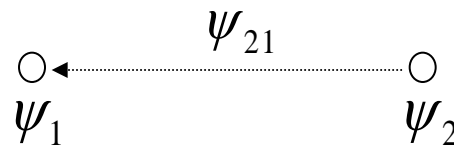
$$\phi_t = \frac{kT}{q} : \text{熱電圧}$$

# 2点間での正孔密度比

2点での正孔密度  $p_1, p_2$

$$\begin{aligned}\frac{p_1}{p_2} &= \exp\left(\frac{E_{i1} - E_{i2}}{kT}\right) \\ &= \exp\left(\frac{q(\psi_2 - \psi_1)}{kT}\right) \\ &= \exp\left(\frac{q\psi_{21}}{kT}\right) \\ &= \exp\left(\frac{\psi_{21}}{\phi_t}\right)\end{aligned}$$

$$\psi_{21} = \psi_2 - \psi_1$$



# 半導体中の伝導

## (電流成分)

- ドリフト電流
  - 電界に依存した電流
  - 強反転領域の電流
- 拡散電流
  - 濃度勾配に依存した電流
  - 弱反転領域の電流

電流⇒ドリフト電流＋拡散電流

# ドリフト電流

n型半導体

電流  $I$  は以下で表される。

$$I = \frac{nq(abc)}{\tau} = nqbc |v_d|$$

$$|v_d| = a/\tau$$

ドリフト速度  $v_d$

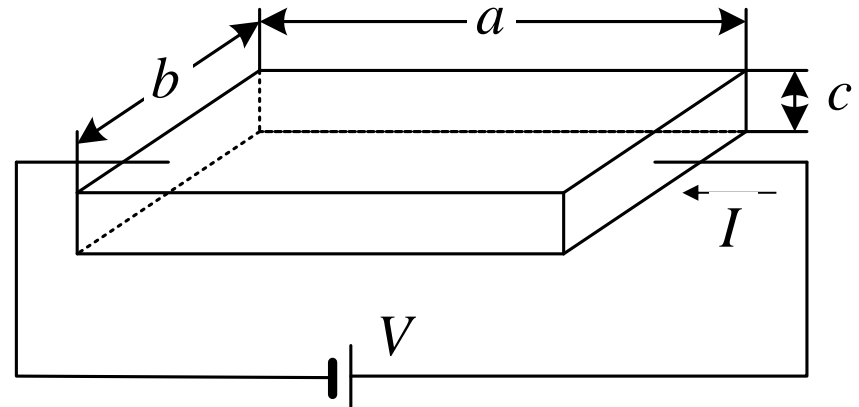
$$|v_d| = \mu_B |E| = \mu_B \frac{V}{a}$$

を用いると  $I$  は以下になる。

$$I = \mu_B nq \frac{bc}{a} V$$

$V/a$ の極限を  $d\psi/dx$ とすると、 $I$ は以下になる。

$$I = \mu_B nqbc \frac{d\psi}{dx} = \mu_B |Q'| b \frac{d\psi}{dx}$$



$\mu_B$ : バルク移動度

$q$ : 素電荷量

$n$ : 電子密度

$\psi$ : ポテンシャル

$E$ : 電界

$\tau$ : 通過時間

$Q'$ : 単位面積当りの電荷

# シート抵抗

$$I = \mu_B nq \frac{bc}{a} V = GV$$

$$G = \mu_B nq \frac{bc}{a} = \sigma \frac{bc}{a} = \mu_B |Q'| \frac{b}{a}$$

$$\sigma = \mu_B nq$$

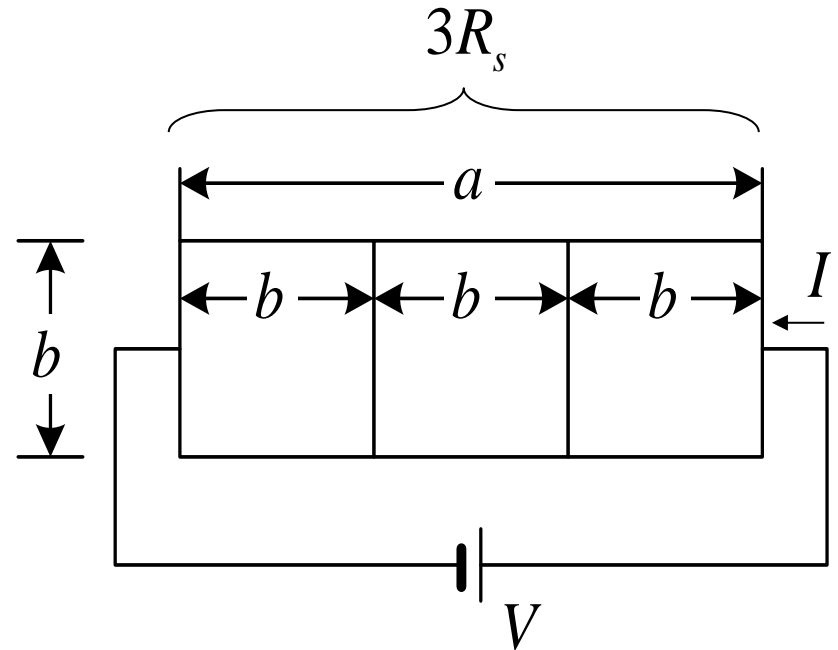
$G$ :コンダクタンス

$\sigma$ :導電率

$\rho = 1/\sigma$ :抵抗率

$$R = \frac{1}{G} = \frac{1}{\sigma} \frac{a}{bc} = \rho \frac{a}{bc} = \frac{1}{\mu_B |Q'|} \frac{a}{b} = R_s \frac{a}{b}$$

$$R_s = \frac{1}{\mu_B |Q'|} : \text{シート抵抗}$$



抵抗パターン

# 拡散電流

$$I = Dq(bc) \left( -\frac{dn}{dx} \right)$$
$$= \mu_B \phi_t b \left( -\frac{dQ'(x)}{dx} \right)$$

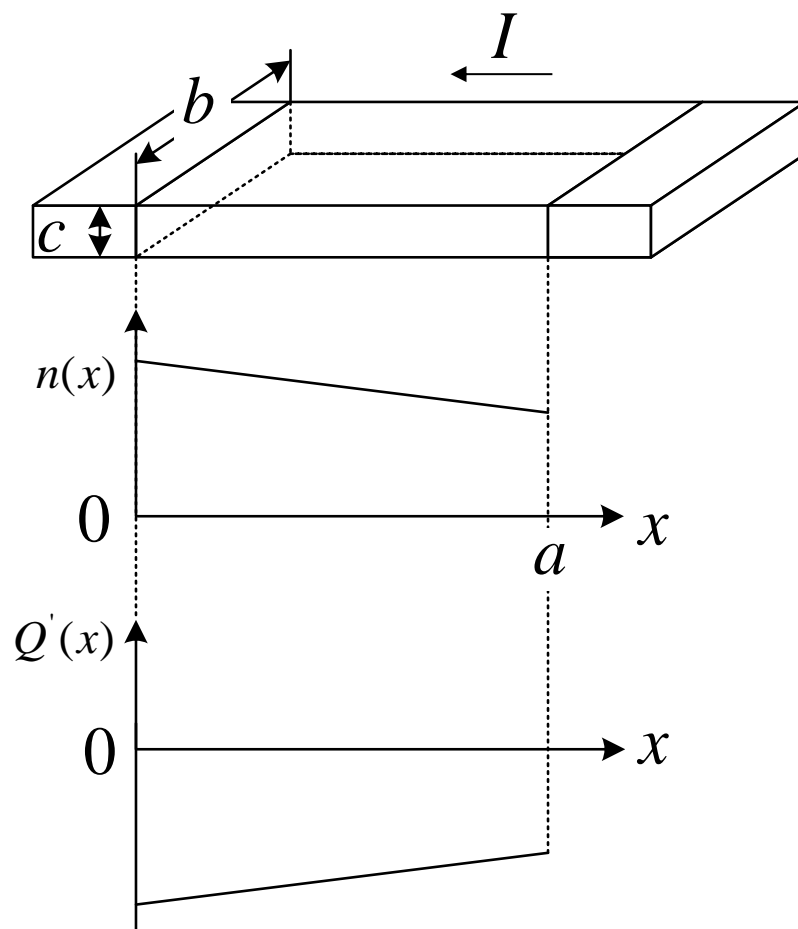
$$D = \mu_B \phi_t$$

(アインシュタインの関係)

$D$ : 拡散係数

$Q'$ : 単位面積当りの電荷

アインシュタインの関係は  
ドリフト電流 + 拡散電流 = 0  
から導出される。



# アインシュタインの関係

電流（ドリフト電流＋拡散電流）

$$I = \mu_B n(x) q b c \frac{d\psi}{dx} - D q (bc) \frac{dn}{dx} \Rightarrow \mu_B n(x) \frac{d\psi}{dx} = D \frac{dn}{dx} \quad (\text{at } I = 0)$$

ここで、

$$\frac{dn(x)}{dx} = \frac{d}{dx} \left[ n_2 \exp\left(\frac{\psi(x)}{\phi_t}\right) \right] = \frac{d}{d\psi(x)} n_2 \exp\left(\frac{\psi(x)}{\phi_t}\right) \frac{d\psi(x)}{dx} = \frac{n(x)}{\phi_t} \frac{d\psi(x)}{dx}$$

となる。これから、以下を得る。

$$\mu_B n(x) \frac{d\psi}{dx} = D \frac{n(x)}{\phi_t} \frac{d\psi}{dx} \Rightarrow D = \mu_B \phi_t$$

$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(\frac{\psi_{12}}{\phi_t}\right), \quad [n_1 \rightarrow n(x), n_2 \rightarrow \text{一定}, \psi_{12} \rightarrow \psi(x)]$$
$$\Rightarrow n(x) = n_2 \exp\left(\frac{\psi(x)}{\phi_t}\right)$$



# ドリフト電流＋拡散電流(1)

電流がある（非平衡状態の）場合、  
擬フェルミレベル $E_{Fn}, E_{Fp}$ を考える

$$n = n_i \exp\left(\frac{E_{Fn} - E_i}{kT}\right)$$

$$p = n_i \exp\left(\frac{E_i - E_{Fp}}{kT}\right)$$

$$np \neq n_i^2$$

$$\begin{aligned} \Delta\psi = -\frac{\Delta E_i}{q} &\Rightarrow \frac{\Delta\psi}{\Delta x} = -\frac{1}{q} \frac{\Delta E_i}{\Delta x} \\ &\Rightarrow \frac{d\psi}{dx} = -\frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \\ \frac{dn}{dx} &= \frac{1}{kT} n(x) \left( \frac{dE_{Fn}}{dx} - \frac{dE_i}{dx} \right) \end{aligned}$$

# ドリフト電流＋拡散電流(2)

電子電流 $I_n$ と正孔電流 $I_p$ は

$$\begin{aligned} I_n &= qA \left[ -\mu_n n(x) \frac{d\psi}{dx} + D_n \frac{dn}{dx} \right] \\ &= qA \left[ -\mu_n n(x) \left( -\frac{1}{q} \frac{dE_i}{dx} \right) + \mu_n \phi_t \frac{1}{kT} n(x) \left( \frac{dE_{Fn}}{dx} - \frac{dE_i}{dx} \right) \right] \\ &= A \mu_n n(x) \frac{dE_{Fn}}{dx} \end{aligned}$$

$$I_p = A \mu_p p(x) \frac{dE_{Fp}}{dx}$$

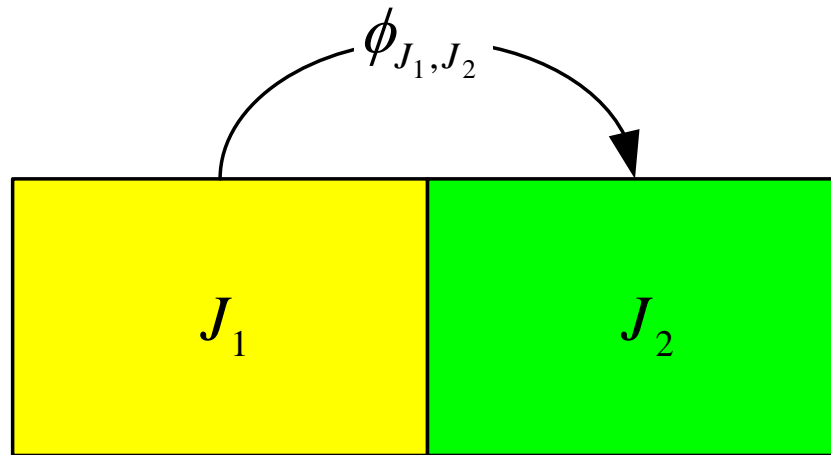
$A$ : 電流通路の断面積

$D_n$ : 電子拡散係数

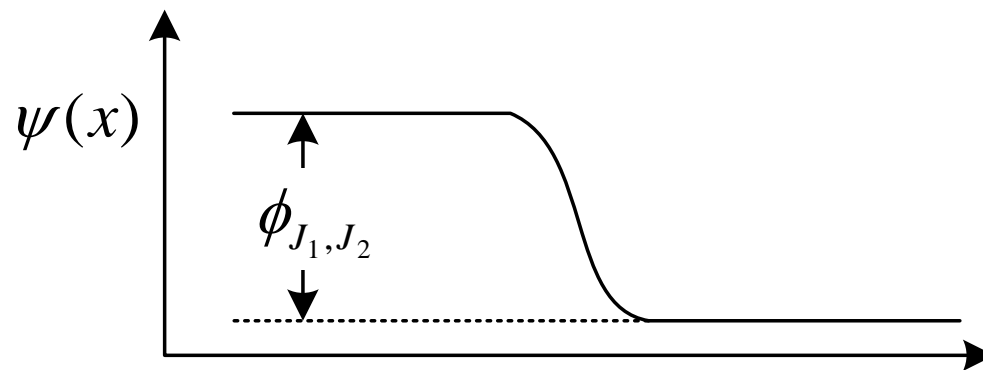
$\mu_n$ : 電子移動度

$\mu_p$ : 正孔移動度

# 接触電位 (2つの異なる材料の接触)



$\phi_{J_1, J_2}$  : 接触電位



# 接触電位とフェルミ・レベル

(接触電位 $\phi_J$  : 真性半導体に対する接触電位)

n型半導体の場合

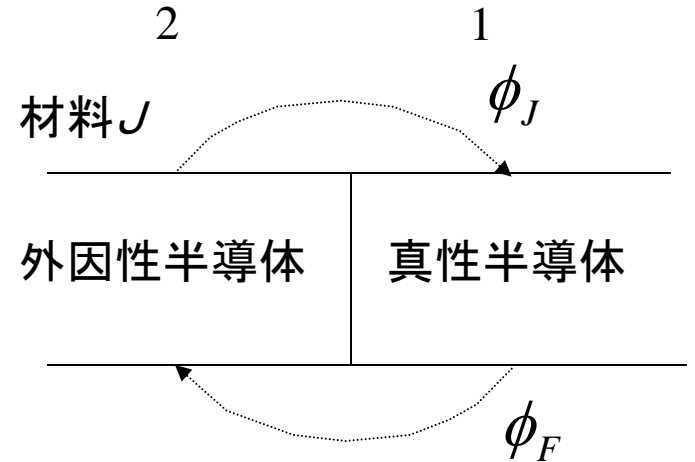
$$\frac{n_1}{n_2} = \exp\left(\frac{\psi_{12}}{\phi_t}\right)$$

$$\frac{n_i}{n_0} = \exp\left(\frac{\phi_F}{\phi_t}\right)$$

$$\Rightarrow \phi_F = \phi_t \ln\left(\frac{n_i}{n_0}\right) \cong -\phi_t \ln\left(\frac{N_D}{n_i}\right)$$

p型半導体の場合

$$\phi_F = \phi_t \ln\left(\frac{p_0}{n_i}\right) \cong \phi_t \ln\left(\frac{N_A}{n_i}\right)$$



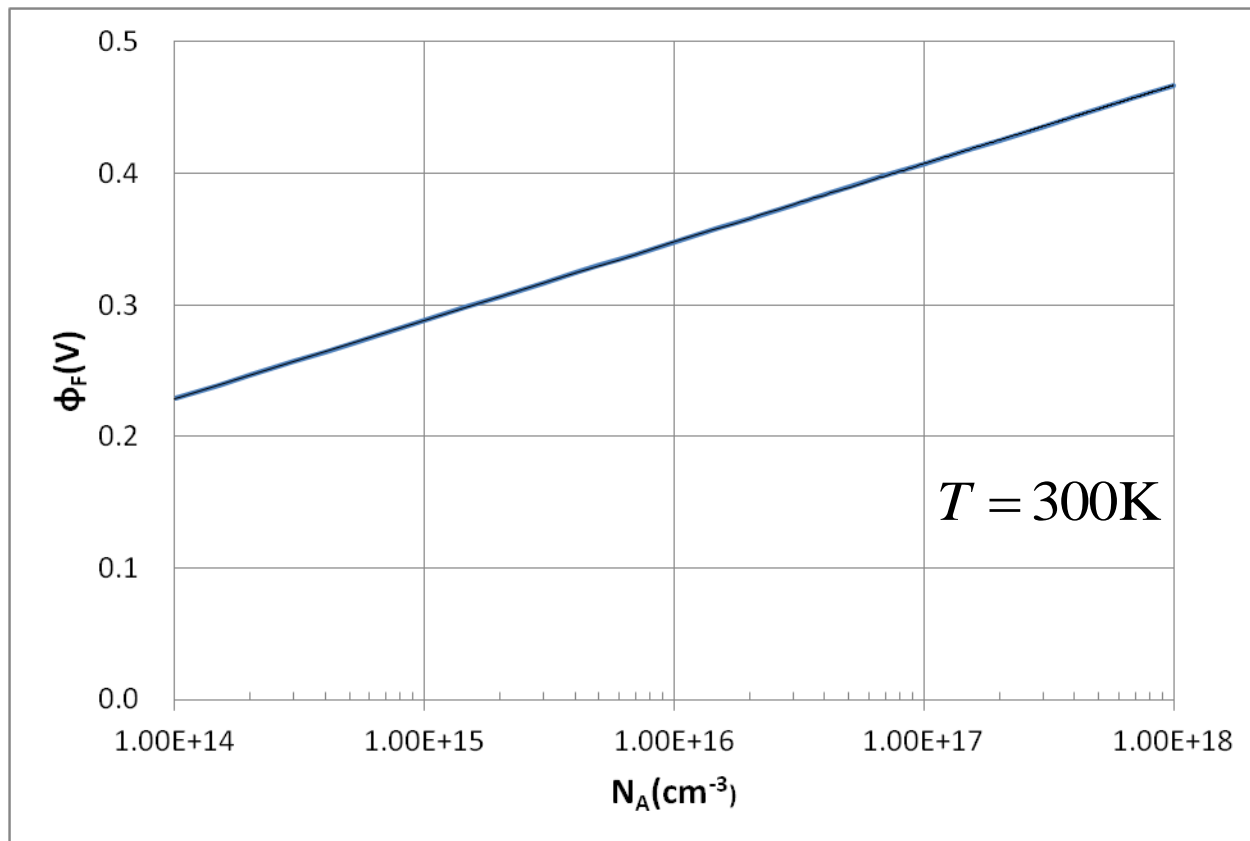
$$n_2 = n_0 \cong N_D \quad n_1 = p_1 = n_i$$
$$p_2 = p_0 \cong N_A$$

$$\phi_J = -\phi_F$$

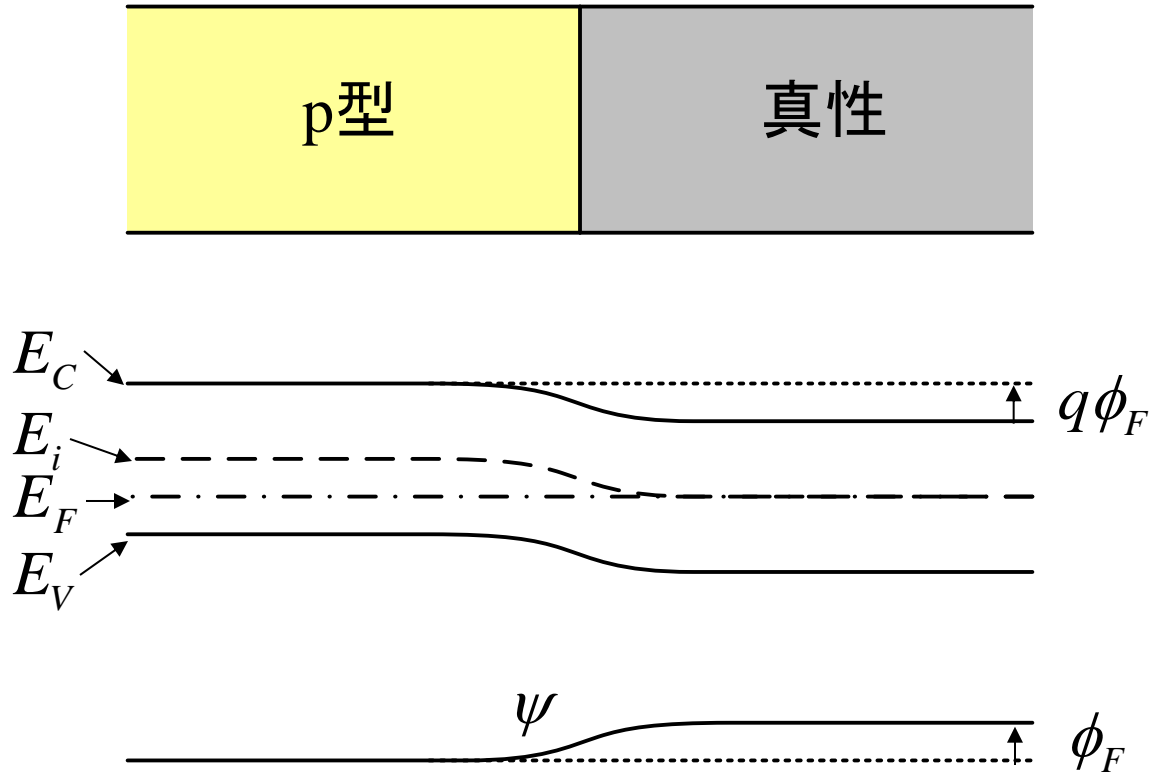
# 各種材料の接触電位

材料	$\phi_J$ (V)
Ag	-0.4
Au	-0.3
Cu	0.0
Ni	0.15
Al	0.6
Mg	1.35
P <sup>+</sup> ポリシリコン	-0.56
N <sup>+</sup> ポリシリコン	0.56
外因性Si	$-\phi_F$
真性Si	0.00

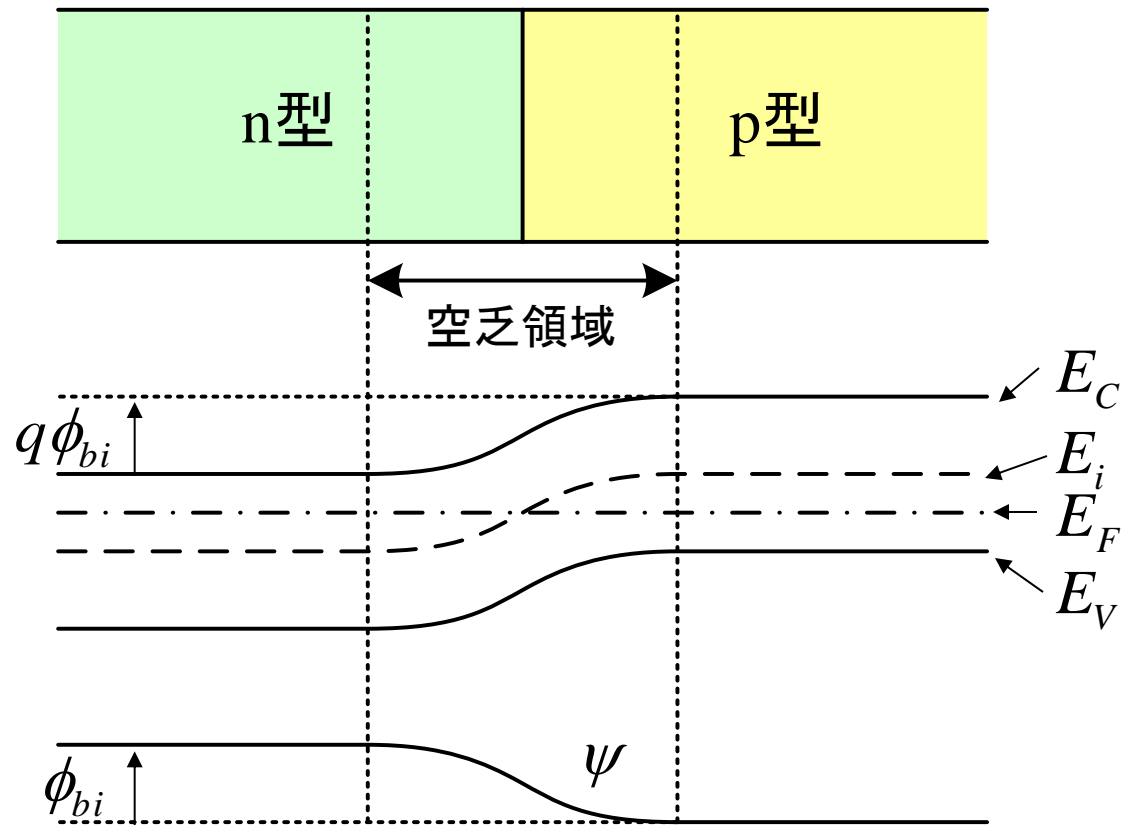
# フェルミ電位と基板濃度 (Si) の関係



# p型半導体と真性半導体接合の エネルギー・バンド図



# pn接合のエネルギー・バンド図(平衡状態)

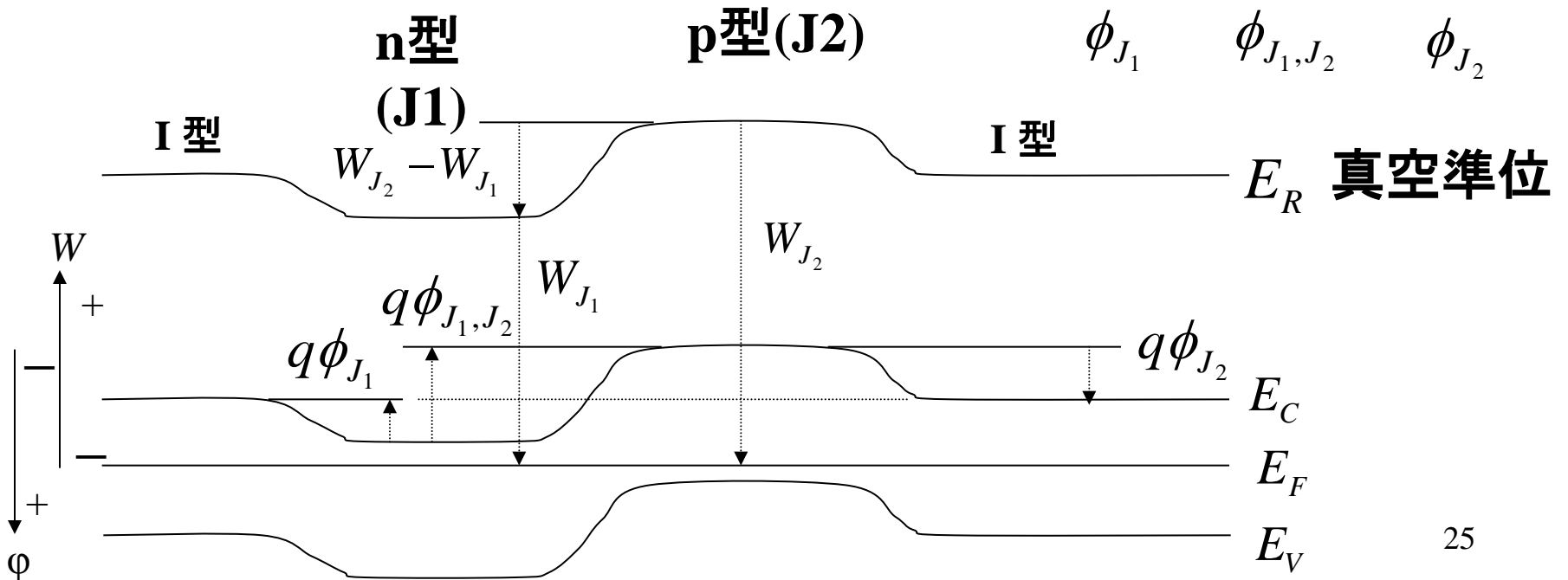
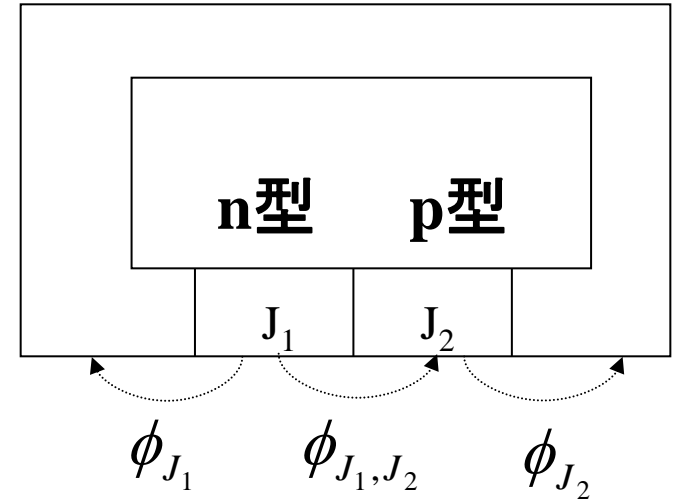




# 接触電位と仕事関数差

$$\begin{aligned}\phi_{J_1, J_2} &= \phi_{J_1} - \phi_{J_2} \\ &= \frac{W_{J_2} - W_{J_1}}{q}\end{aligned}$$

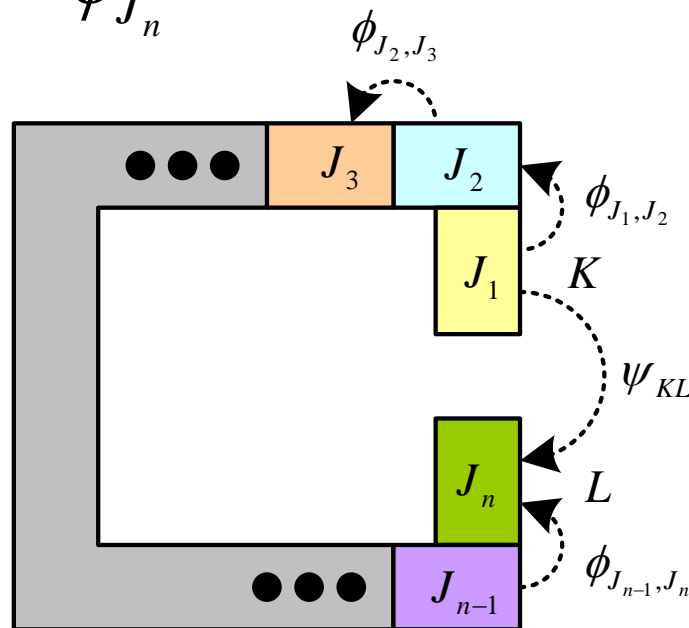
真性半導体 I 型



# 異種材料の直列接続と接触電位(1)

異種材料 $K$ と $L$ の間の電位 $\psi_{KL}$ は

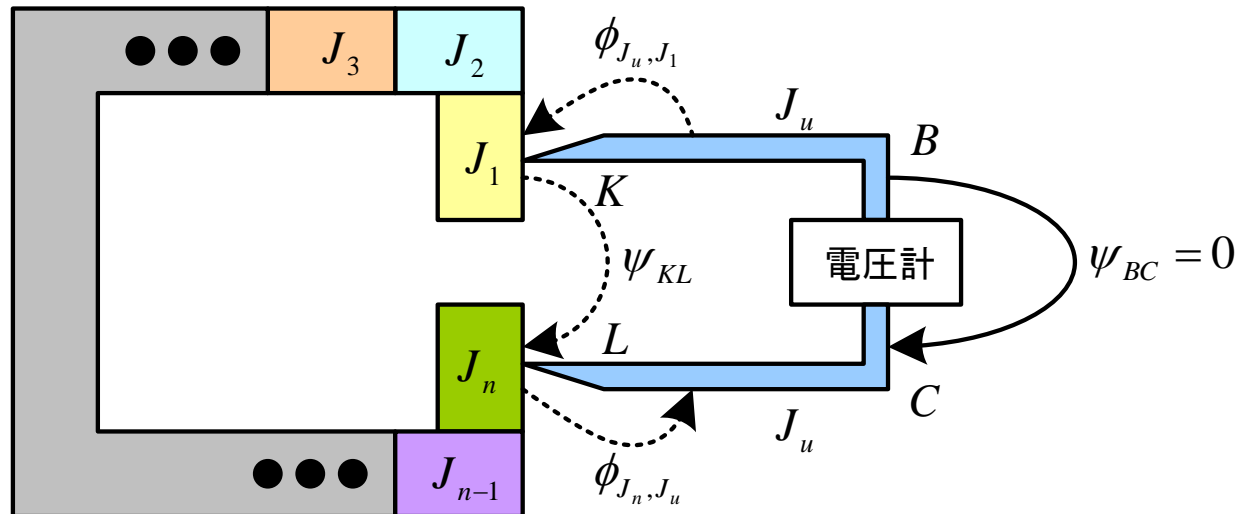
$$\begin{aligned}\psi_{KL} &= \phi_{J_1, J_2} + \phi_{J_2, J_3} + \cdots + \phi_{J_{n-1}, J_n} \\ &= \phi_{J_1} - \phi_{J_2} + \phi_{J_2} - \phi_{J_3} \cdots + \phi_{J_{n-1}} - \phi_{J_n} \\ &= \phi_{J_1} - \phi_{J_n}\end{aligned}$$



# 異種材料の直列接続と接触電位(2)

電圧計の値  $\psi_{BC}$  は

$$\begin{aligned}\psi_{BC} &= \phi_{J_u, J_1} + \psi_{KL} + \phi_{J_n, J_u} \\ &= (\phi_{J_u} - \phi_{J_1}) + \psi_{KL} + (\phi_{J_n} - \phi_{J_u}) \\ &= 0\end{aligned}$$



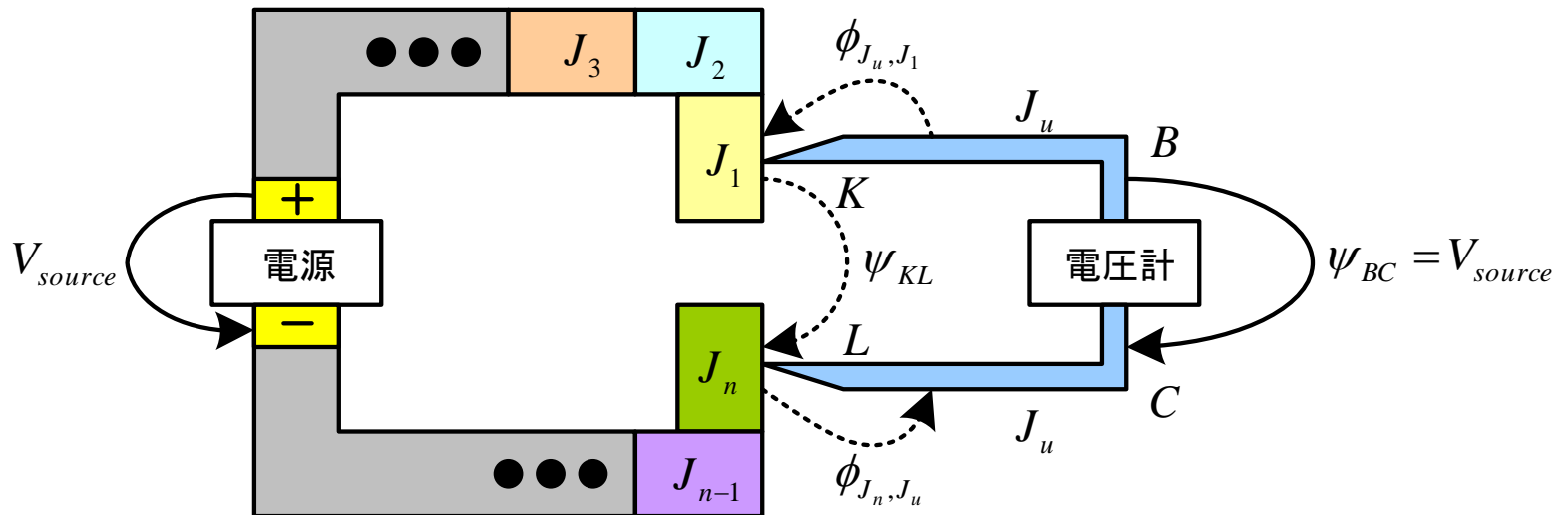
# 異種材料の直列接続と接触電位(3)

電圧印加のある場合の $\psi_{KL}$ は

$$\psi_{KL} = V_{source} + (\phi_{J_1} - \phi_{J_n})$$

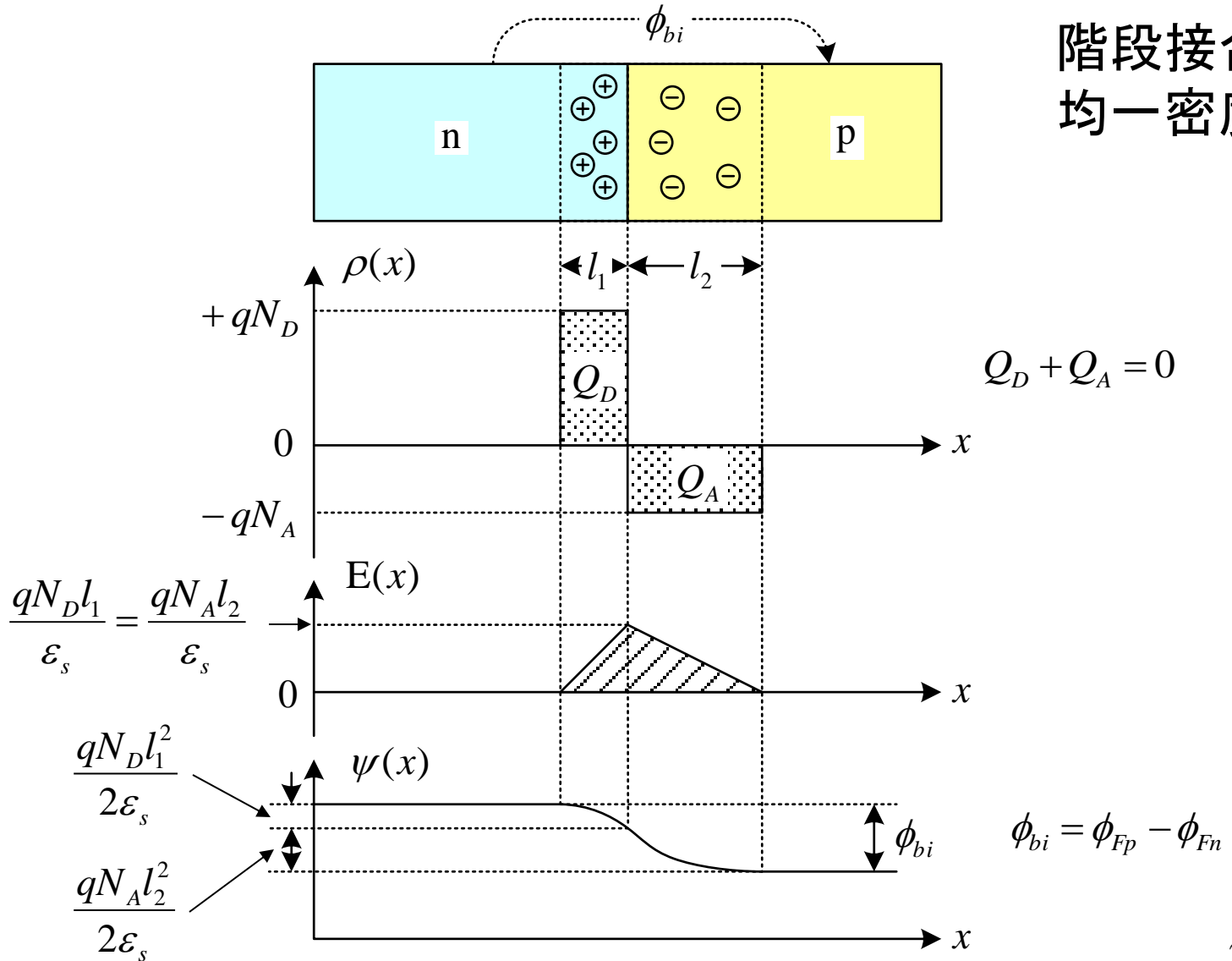
この場合のBとC間に表れる電圧は

$$\psi_{BC} = V_{source}$$



# pn接合：電荷・電界・電位

階段接合  
均一密度



# pn接合の解析(1)

ポアソンの式は

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s}, \quad \frac{d\psi}{dx} = -E(x)$$

である。n型半導体中( $0 \leq x \leq l_1$ )では、ポアソンの式は、以下の如くになる。

$$\frac{dE_1}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon_s}$$

境界条件 $E(0) = 0$ から、 $E_1(x)$ は

$$E_1(x) = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x$$

である。

外部バイアスゼロ $N_D, N_A$ 各半導体中で均一 空乏層近似 空乏層端で電界 $E = 0$ 接触電位 $\phi_{bi}$
---

# $pn$ 接合の解析(2)

また、 $p$ 型半導体中( $l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$ )では、ポアソンの式は以下となる。

$$\frac{dE_2}{dx} = -\frac{qN_A}{\epsilon_s}$$

境界条件 $E(l_1 + l_2) = 0$ から、 $E_2(x)$ は以下で表される。

$$E_2(x) = \frac{qN_A}{\epsilon_s}(l_1 + l_2 - x)$$

$E_1(l_1) = E_2(l_1)$ であるから、

$$E_1(l_1) = E_2(l_1) = \frac{qN_D}{\epsilon_s}l_1 = \frac{qN_A}{\epsilon_s}l_2$$

となり、

$$N_D l_1 = N_A l_2 \Rightarrow \frac{l_1}{l_2} = \frac{N_A}{N_D}$$

となる。これは、 $p$ 及び $n$ の空乏層中の電荷量が等しいことを表す。

# $pn$ 接合の解析(3)

次に、 $n$ 型半導体中( $0 \leq x \leq l_1$ )での電位  $\psi_1(x)$ は、

$$-\frac{d\psi_1}{dx} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} x$$

を積分して、以下の如くになる。

$$\psi_1(x) = -\frac{qN_D}{2\epsilon_s} x^2 + A \quad (A \text{は任意定数})$$

また、 $p$ 型半導体中( $l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$ )での電位  $\psi_2(x)$ は、

$$-\frac{d\psi_2}{dx} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} (l_1 + l_2 - x)$$

を積分して、以下の如くになる。

$$\psi_2(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} \left[ (l_1 + l_2)x - \frac{1}{2}x^2 \right] + B \quad (B \text{は任意定数})$$



# $pn$ 接合の解析(4)

境界条件

$$\psi_1(l_1) = \psi_2(l_1), \quad \psi_1(0) - \psi_2(l_1 + l_2) = \phi_{bi}$$

から、 $\phi_{bi}$ は以下の如くなる。

$$\phi_{bi} = \frac{qN_D}{2\epsilon_s} l_1^2 + \frac{qN_A}{2\epsilon_s} l_2^2$$

ここで、上式第一項は、 $l_1$ の領域での電位差を、また、第二項は、 $l_2$ の領域での電位差を表す。 $\phi_{bi}$ に関する式と  $l_1/l_2 = N_A/N_D$  から、 $l_1$ 、 $l_2$ 、及び  $l_1 + l_2$  は以下となる。

$$l_1 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \phi_{bi}}, \quad l_2 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \phi_{bi}}$$

$$\therefore l_1 + l_2 = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \frac{(N_A + N_D)}{N_A N_D} \phi_{bi}}$$

# pn接合の解析(5)

$N_D \gg N_A$  の場合、 $\phi_{bi}$ は以下になる。

$$\begin{aligned}\phi_{bi} &= \frac{qN_D}{2\varepsilon_s} l_1^2 + \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} l_2^2 = \frac{qN_D}{2\varepsilon_s} \left( \frac{N_A}{N_D} \right)^2 l_2^2 + \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} l_2^2 \\ &= \frac{q}{2\varepsilon_s} \frac{N_A(N_A + N_D)}{N_D} l_2^2 \approx \frac{qN_A}{2\varepsilon_s} l_2^2\end{aligned}$$

また、 $l_1$ と $l_2$ は以下になる。

$$\begin{aligned}l_1 &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{N_A}{N_D(N_A + N_D)} \phi_{bi}} \approx 0, \\ l_2 &= \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q} \frac{N_D}{N_A(N_A + N_D)} \phi_{bi}} \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A} \phi_{bi}}\end{aligned}$$

# $pn$ 接合の解析(6)

$pn$ 接合に逆バイアス  $V_R$  が印加されると、  
 $\phi_{bi}$  は以下になり、

$$\phi_{bi} \Rightarrow \phi_{bi} + V_R$$

$l_2$  は次式で表される。

$$l_2 \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A} (\phi_{bi} + V_R)}$$

この場合  $l_2$  側の単位面積当りの電荷  $Q_2'$  は、以下になる。

$$\begin{aligned} Q_2' &= -ql_2N_A \\ &\approx -\sqrt{2q\varepsilon_sN_A} (\phi_{bi} + V_R) \end{aligned}$$

# 逆バイアスpn接合の小信号容量(1)

pn逆接合電圧が $V_R$ から $V_R + \Delta V_R$ に変化すると、接合容量電荷の変化は、

$$\Delta Q_1 = +\Delta Q$$

$$\Delta Q_2 = -\Delta Q$$

となる。ここで、接合容量 $C_j$ は

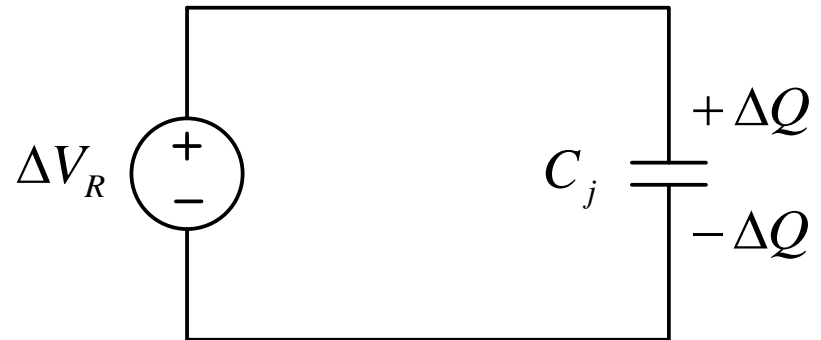
$$C_j = \frac{\Delta Q}{\Delta V_R}$$

となる。微分量で表すと、

$$C_j = -\frac{dQ_2}{dV_R}$$

となり、pn接合の断面積で上式の両辺を割ると、以下になる。

$$C_j' = -\frac{dQ_2'}{dV_R}$$



# 逆バイアスpn接合の小信号容量(2)

$Q_2'$ を以下にすると、

$$Q_2' = -\sqrt{2q\varepsilon_s N_A (\phi_{bi} + V_R)}$$

$N_D \gg N_A$  の階段接合の場合、 $C_j'$ は以下になる。

$$C_j' = \frac{\sqrt{2q\varepsilon_s N_A}}{2\sqrt{(\phi_{bi} + V_R)}}$$

すなわち、

$$C_j' = \frac{\varepsilon_s}{l_2} \left[ \text{但し、} l_2 \approx \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_A} (\phi_{bi} + V_R)} \right]$$