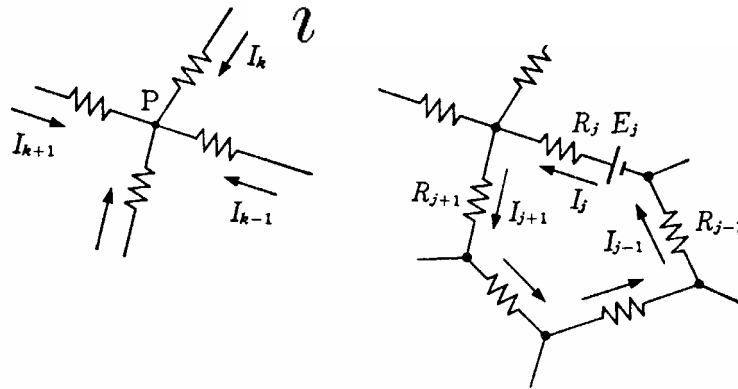


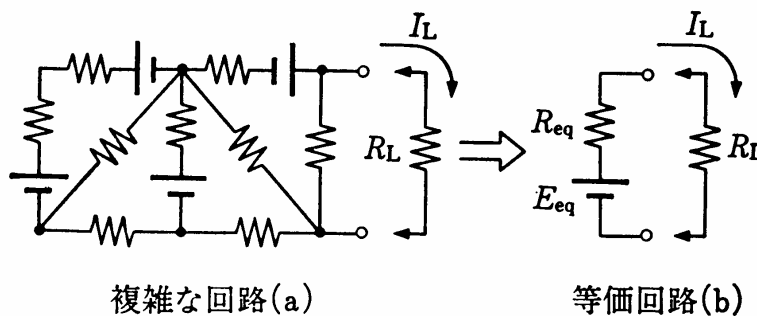
Kirchhoff's law

- 第一法則
$$\sum_{k=1}^n I_k = 0$$
- 第二法則
$$\sum R_i I_i = \sum E_i$$



5-2 図 回路網を流れる電流

• 等価回路



5-4 図 テブナンの定理の説明図

交流回路の抵抗：インピーダンス

$$V = ZI$$

$$V = V_0 e^{i\omega t}$$

$$I = I_0 e^{i(\omega t - \delta)}$$

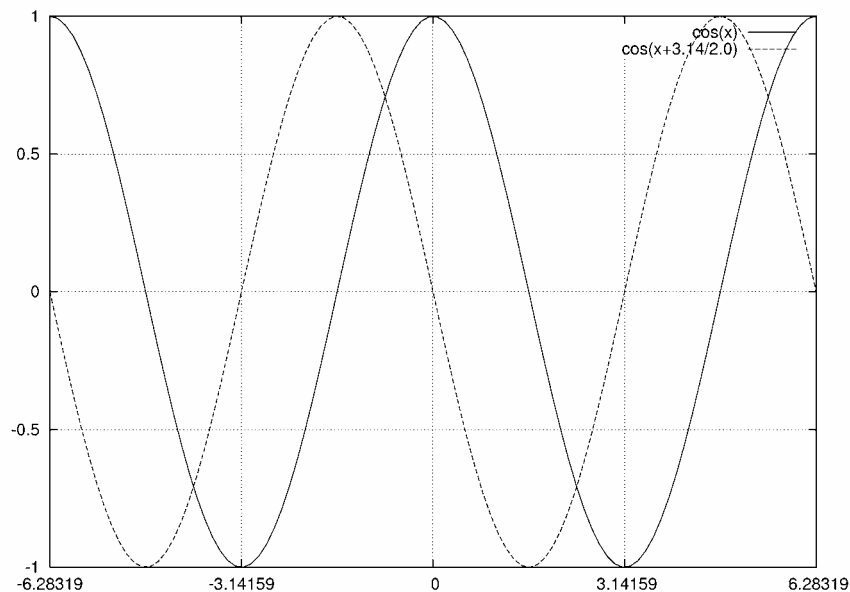
$$R : \quad Z = R, \delta = 0, I_0 = \frac{V_0}{R}$$

$$C : \quad Q = CV, \quad I = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dV}{dt}$$

$$Z = \frac{1}{i\omega C}, \delta = -\frac{\pi}{2}, I_0 = CV_0\omega$$

$$I = i\omega CV_0 e^{i\omega t}$$

$$e^{-i\delta} = i, \delta = -\pi/2$$

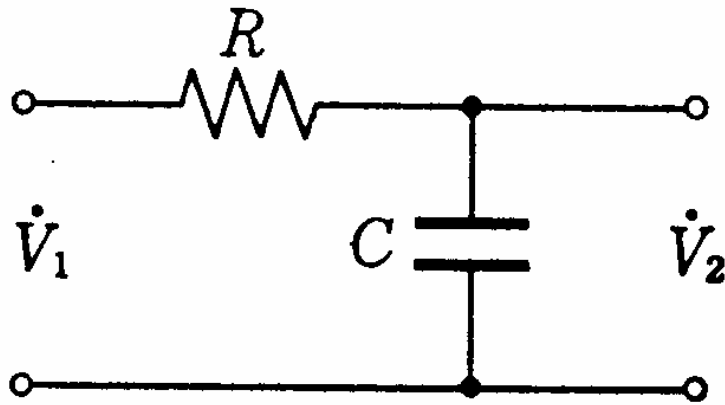


- 直列

$$Z = Z_1 + Z_2$$

- 並列

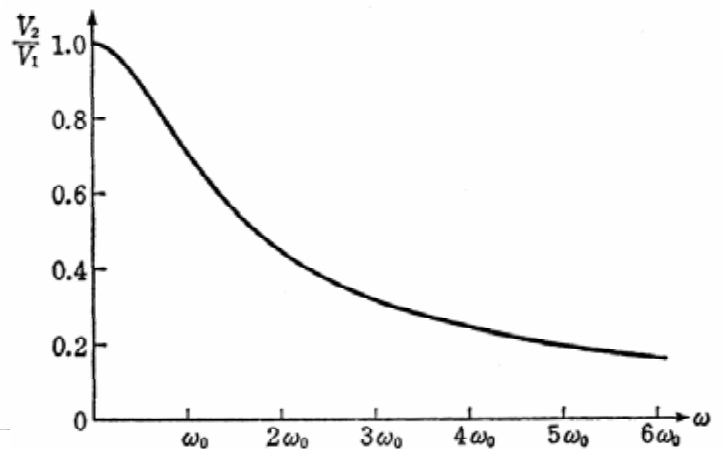
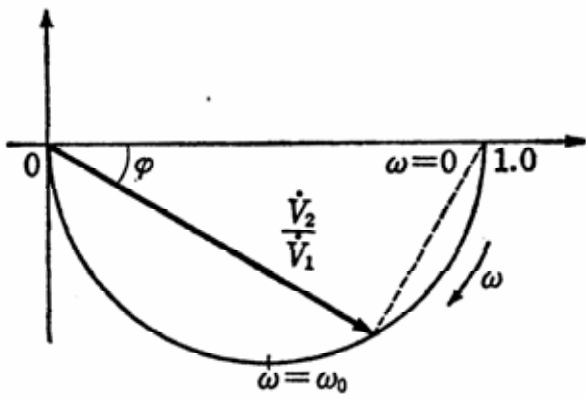
$$1/Z = 1/Z_1 + 1/Z_2$$



ローパス
フィルター回路

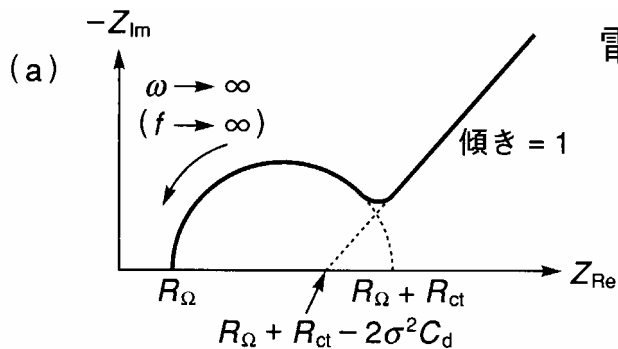
$$V_1 = IZ = I\left(R + \frac{1}{i\omega C}\right) = I \frac{1 + i\omega CR}{i\omega C}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{i\omega C}{I(1 + i\omega CR) i\omega C} = \frac{1}{1 + i(\omega/\omega_0)}$$



5-26 図 ローパスフィルターの透過特性 (5.55)

電気化学反応に伴うインピーダンス $R_{ct} + Z_W$



$$Z_W = \frac{\sigma}{\sqrt{\omega}}(1 - i)$$

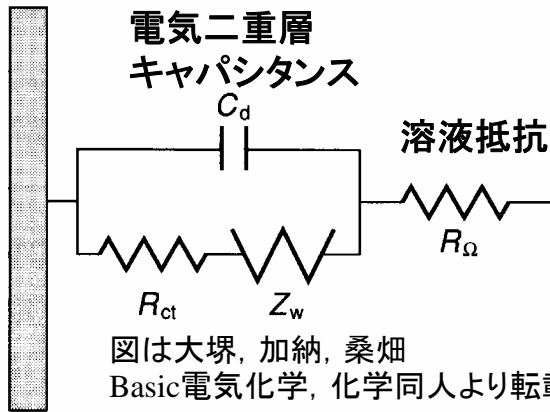
Warburg impedance

$$\sigma = \frac{4RT}{\sqrt{2}F^2A\sqrt{D_O}C_O^*} \cosh^2(a/2)$$

$$a = \frac{F(E - E_{1/2})}{RT}$$

$$R_{ct} = \frac{RT}{F^2Ak^0C_O^*(D_O/D_R)^{\alpha/2}} \left(\frac{1 + e^a}{e^{(1-\alpha)a}} \right)$$

(b)

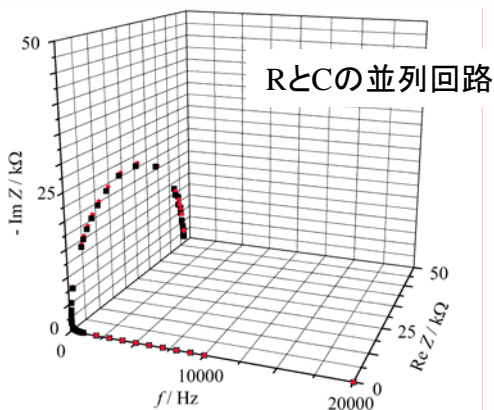


図は大塚, 加納, 桑畑
Basic電気化学, 化学同人より転載

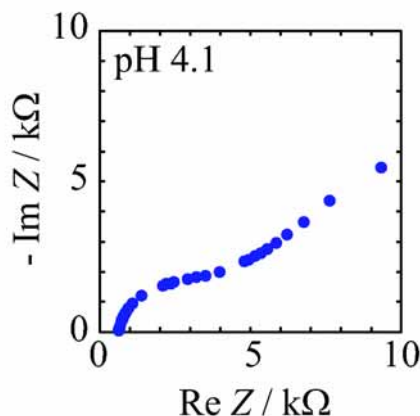
☑ 全体のインピーダンスから R_{Ω} と C_d を差し引く。(バード旧版9. 5. 1 or 3D-fit)

☑ R_{ct} と Z_W の位相角 ϕ の $\cot \phi$ と E の関係 $\max(\cot \phi)$ at $E_{1/2}$

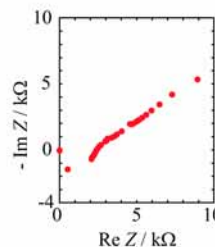
☑ $(\cot \phi)$ at $E_{1/2}$ と $\omega^{1/2}$ のプロットの傾きより速度定数 k_0



■ 実験値
● 理論値

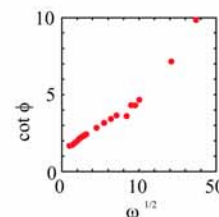


$-C_d$
 $-R_{\Omega}$



友野氏
修論より
転載

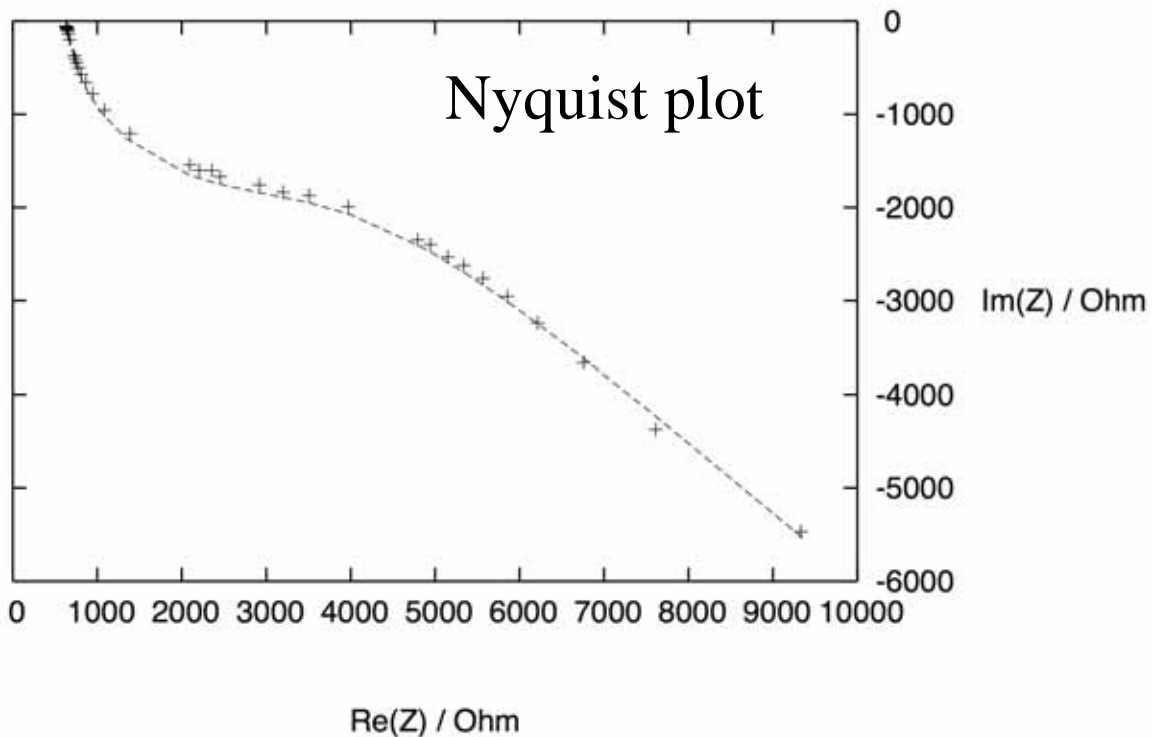
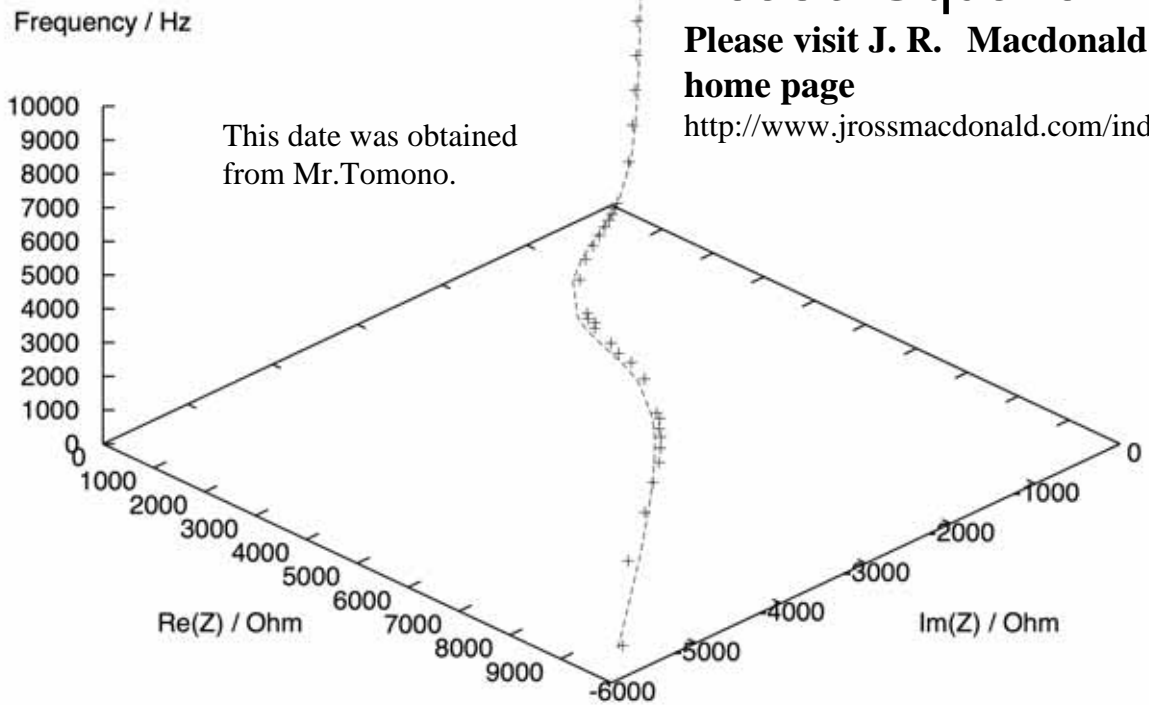
→



Complex Nonlinear Least-Square Fit

Please visit J. R. Macdonald home page

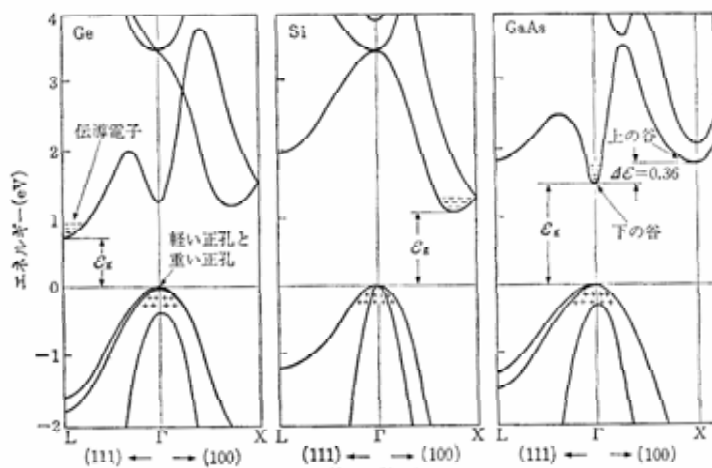
<http://www.jrossmacdonald.com/index.html>



注意: 全体のインピーダンスから R_{Ω} と C_d を差し引く際に、 R_{Ω} と C_d の寄与があまりにも大きいと誤差になる。 5

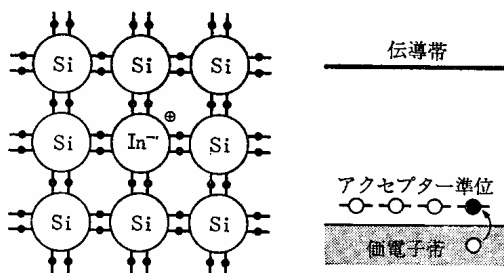
半導体デバイス

参考文献：霜田、桜井、エレクトロニクスの基礎 裳華房

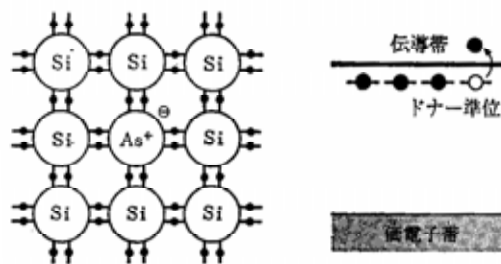


2-6 図 Ge, Si, GaAs のエネルギー図

13	14	15
B	C	N
10.811	12.011	14.007
13	14	15
Al	Si	P
26.982	28.086	30.974
31	32	33
Ga	Ge	As
69.723	72.64	74.922
49	50	51
In	Sn	Sb
114.82	118.71	121.76



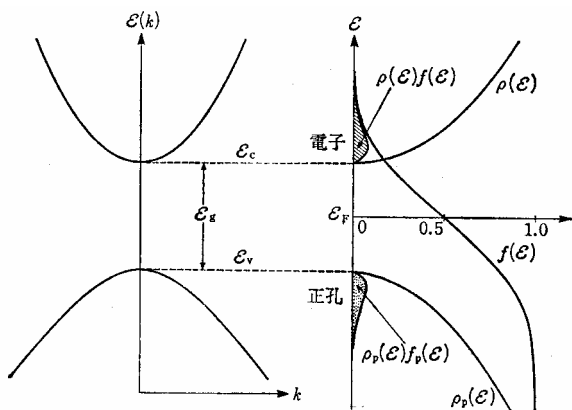
アクセプターとアクセプター準位の説明図



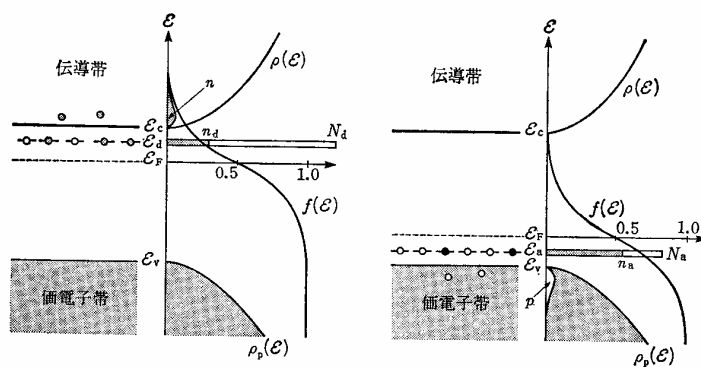
ドナーとドナー準位の説明図

p型

n型



2-13 図 真性半導体の電子と正孔の分布。f(E) はフェルミ分布、ρ(E) は電子の状態密度、ρ_p(E) は正孔の状態密度。



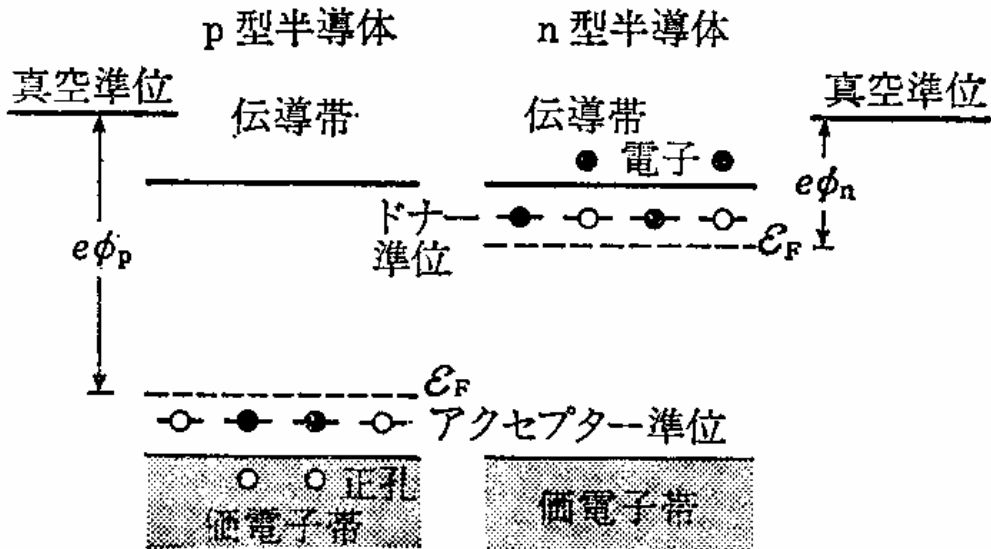
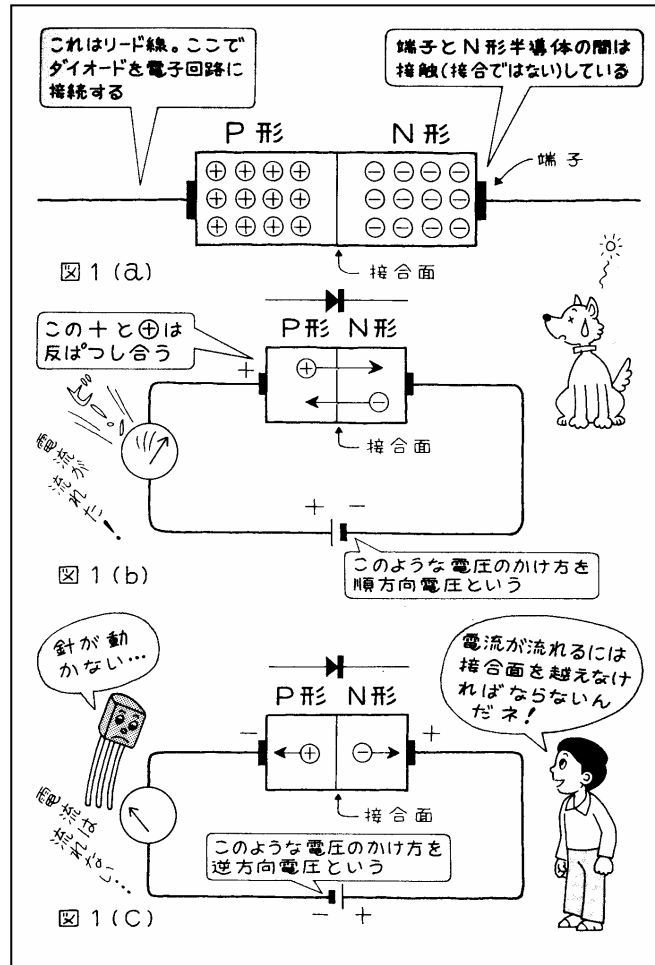
(a) n型半導体

(b) p型半導体

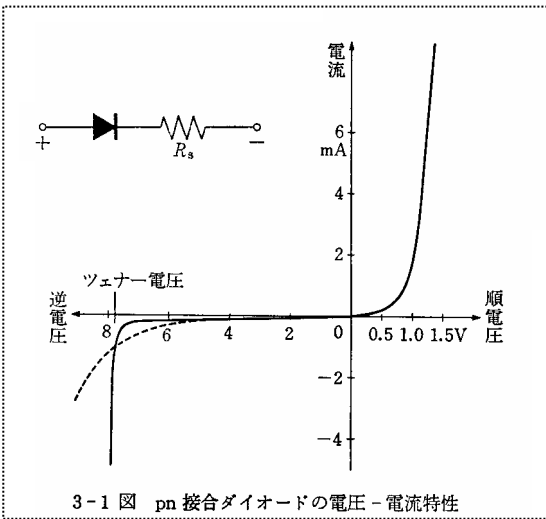
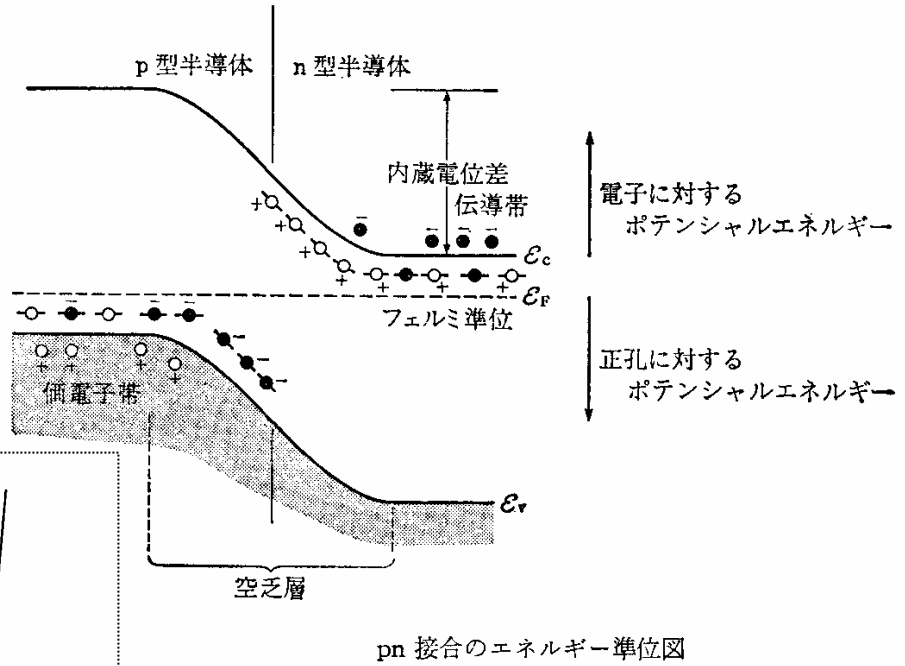
(a) n 型半導体の電子分布とドナーのイオン化。f(E) はフェルミ分布、ρ(E) は電子の状態密度、N_d はドナー原子数、n_d は電子を放していない中性のドナー原子数。
 (b) p 型半導体の正孔の分布とアクセプターのイオン化。f(E) はフェルミ分布、ρ_p(E) は正孔の状態密度、N_a はアクセプター原子数、n_a は電子をとりこんだアクセプター負イオンの数。

pn-junction

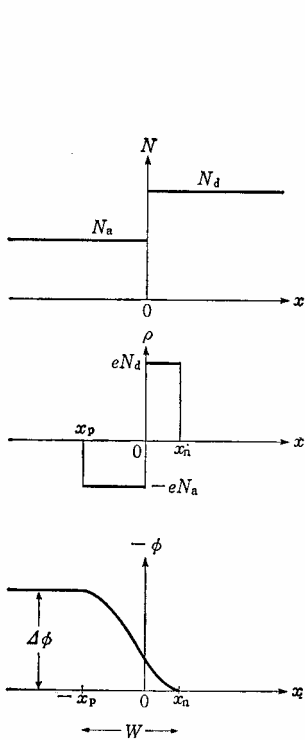
入門エレクトロニクス
トランジスタ
丹羽一夫
誠文堂新光社



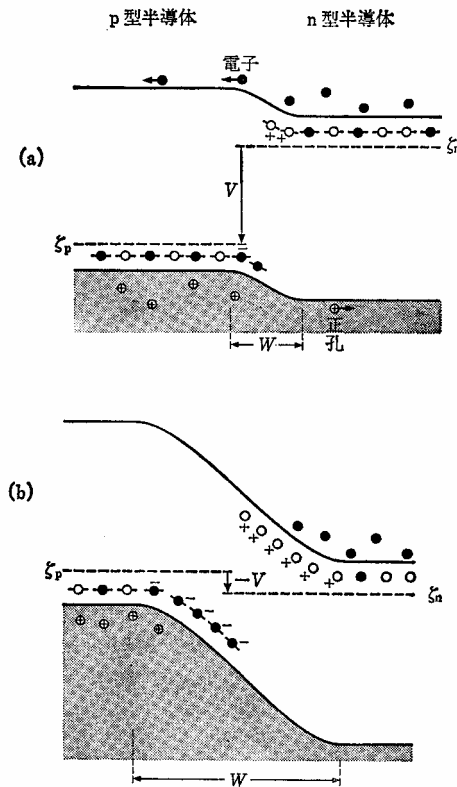
接合していない p 型半導体と n 型半導体のエネルギー準位図



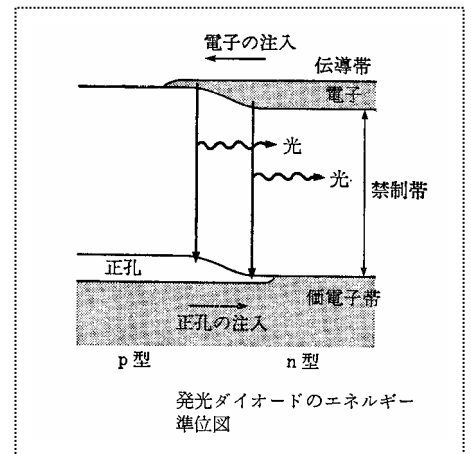
参考文献: エレクトロニクスの基礎 霜田, 桜井 裳華房



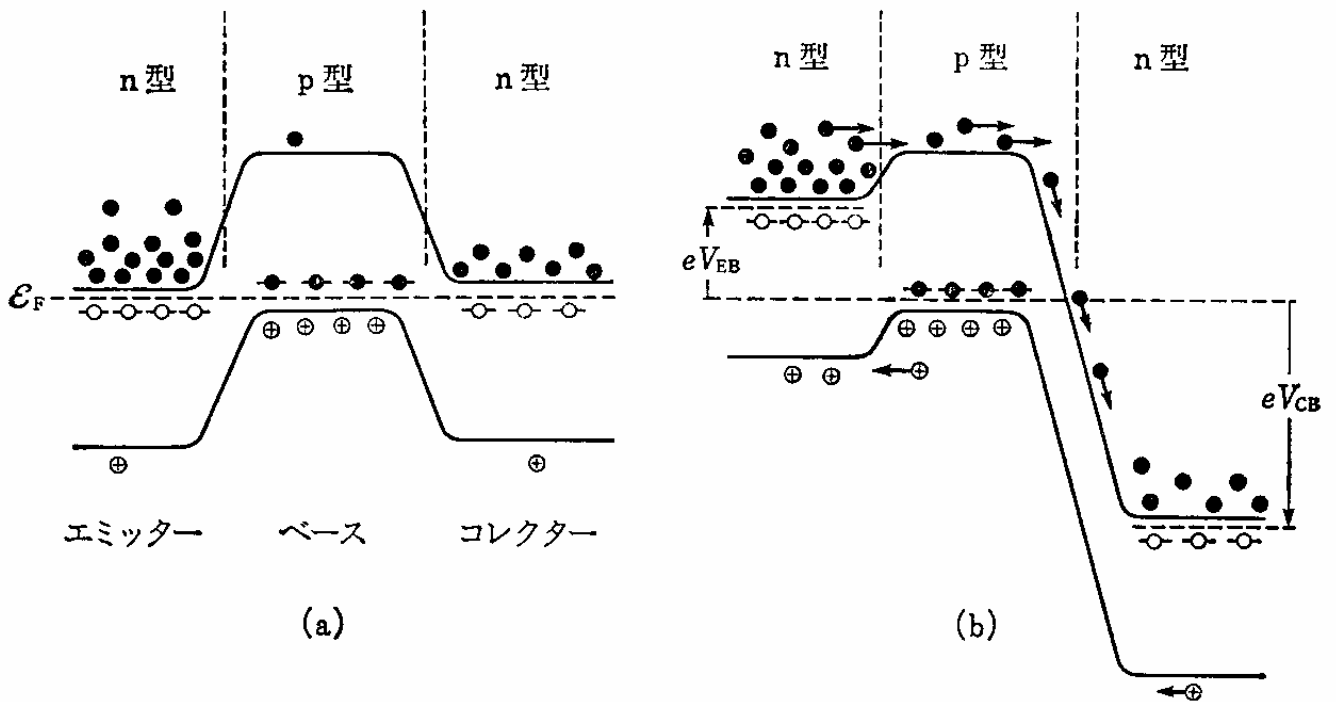
pn 接合における不純物 N_a と N_d , 電荷密度 ρ , および電位 (ポテンシャル) ϕ の分布



(a) 順電圧をかけた pn 接合
(b) 逆電圧をかけた pn 接合

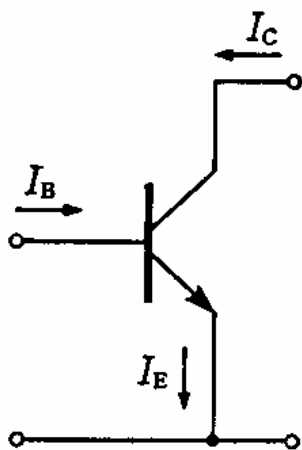


Bipolar transistor

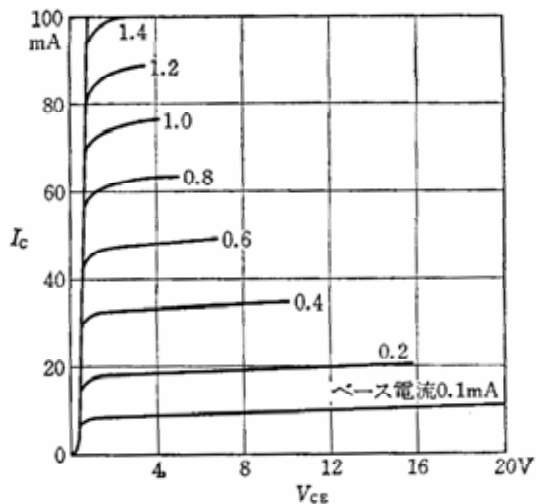


npn トランジスタのエネルギー準位とキャリアの分布
 (a) 電圧をかけないとき, (b) $V_{EB} < 0$, $V_{CB} > 0$ の電圧をかけたとき

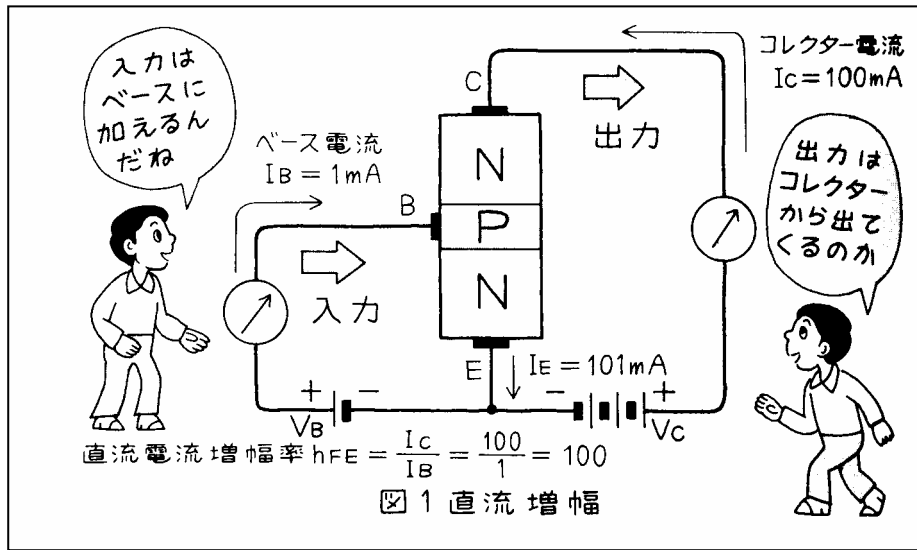
エミッタのキャリア濃度 \gg コレクタ、ベースのキャリア濃度



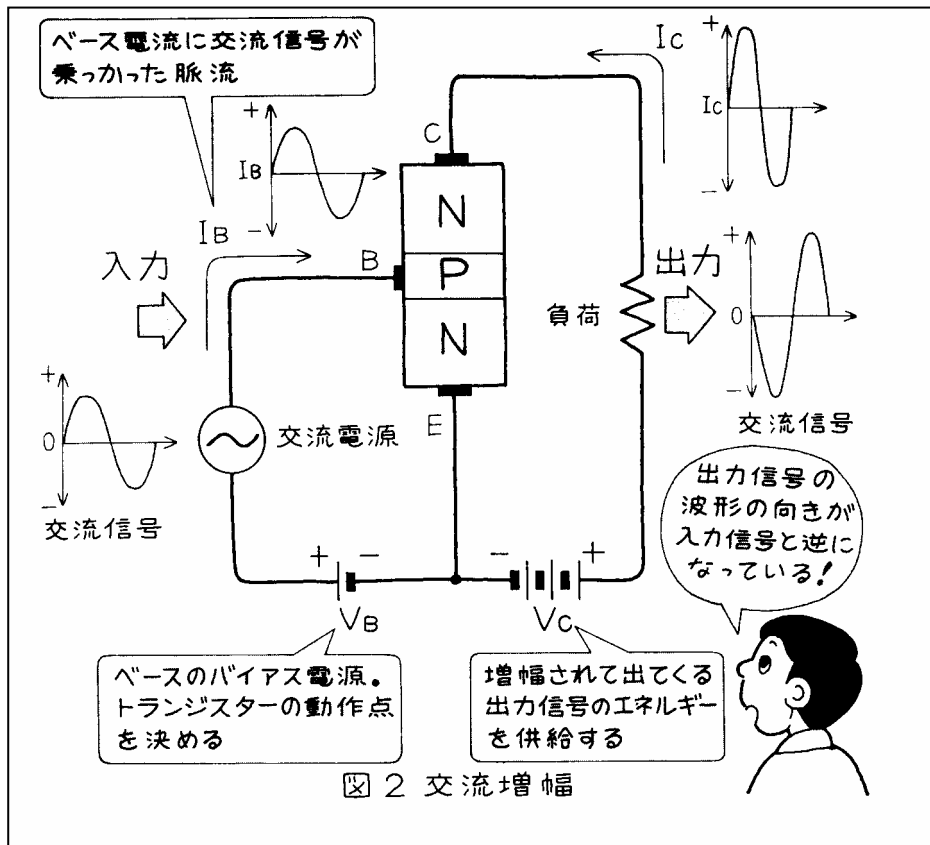
(b) npn



トランジスタをエミッタ
 -接地したときのコレクタ特性

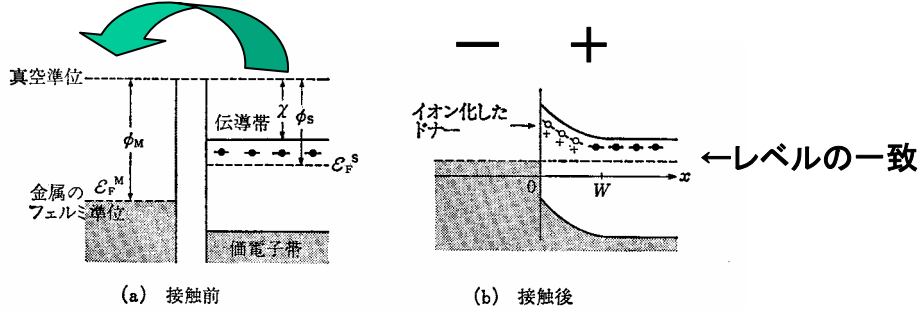


入門エレクトロニクス
トランジスタ
丹羽一夫
誠文堂新光社



Schottky Barrier

ドナーレベルの電子



3-29 図 金属と n 型半導体との接触のエネルギー準位図

ドナー原子は半導体の表面から深さ W まではすべてイオン化されているとすると、そこに一様な空間電荷をもつ層ができる。深さの方向に x 軸をとり、ドナーの密度を N_d とすれば、 $0 < x < W$ で $\rho = eN_d$ で、 $x > W$ では $\rho = 0$ となるから、§2.5 で述べた pn 接合の空乏層の場合と同様に論じることができる。電位分布を $\phi(x)$ とし、半導体内部の伝導帯の底のポテンシャルを基準にとれば、ポアソンの方程式

$$\frac{d^2}{dx^2} \phi(x) = -\frac{eN_d}{\epsilon}$$

から、 $0 < x < W$ では

$$\phi(x) = -\frac{eN_d}{2\epsilon} (x - W)^2 \quad (3.32)$$

が得られる。3-29 図からもわかるように、半導体側からのポテンシャル障壁の高さ (barrier height) は

$$\Delta\phi = \phi_s - \phi_0$$

であって、 $-\phi(0)$ がこれに等しい。

半導体をプラス、金属をマイナスにする電圧を加えたとき、ポテンシャル障壁の高さは

$$\phi(0) = \Delta\phi + V \quad (3.33)$$

となるから、(3.32) より、ポテンシャル障壁の厚さは

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon}{eN_d} (\Delta\phi + V)} \quad (3.34)$$

で与えられる。

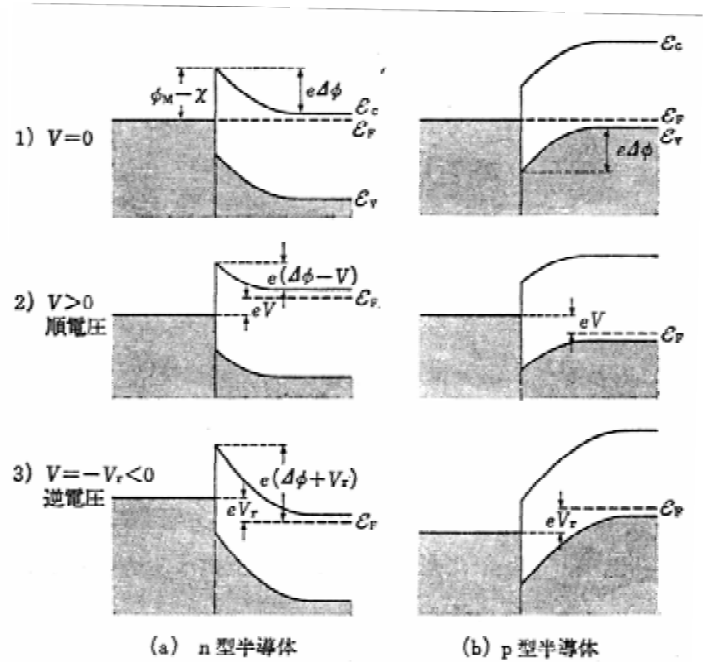
このとき障壁の単位面積あたりの電気容量は

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V}$$

で与えられる。上式に $Q = eN_d W$ と (3.34) を入れて計算すると

$$C = \sqrt{\frac{\epsilon e N_d}{2(\Delta\phi + V)}} = \frac{\epsilon}{W} \quad (3.35)$$

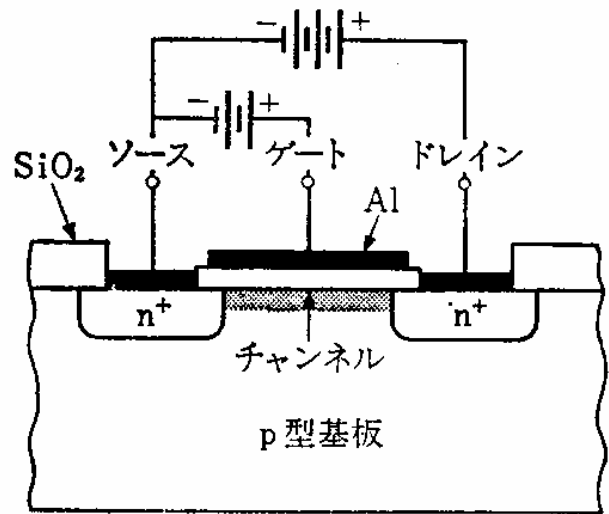
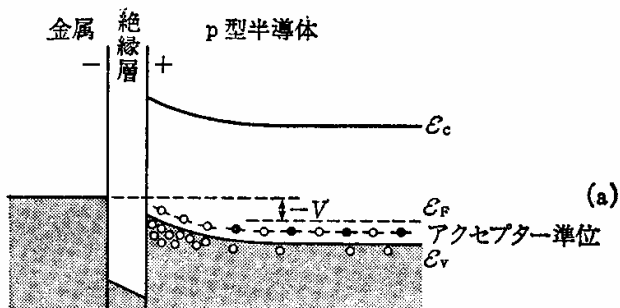
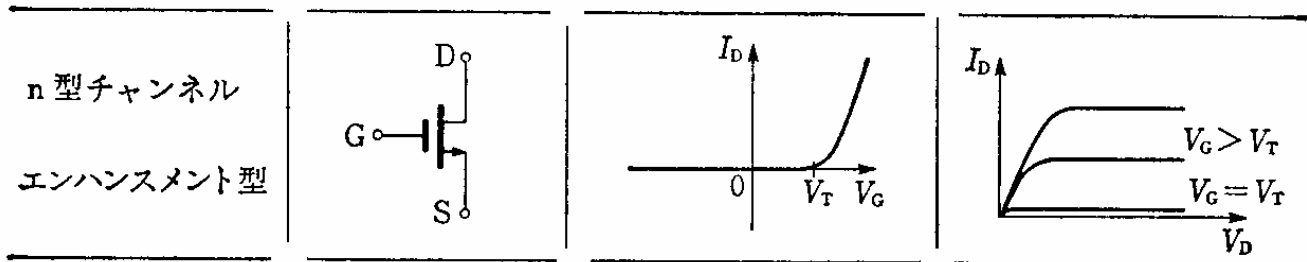
となる。そこで電圧 V の関数として電気容量 C を測定すれば、ショットキー



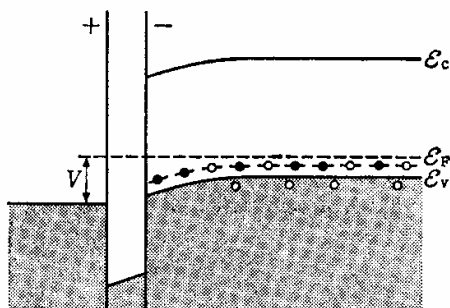
3-30 図 いろいろの電圧をかけたときの金属-半導体接触のエネルギー準位図

$$I = I_0 [\exp(eV / kT) - 1]$$

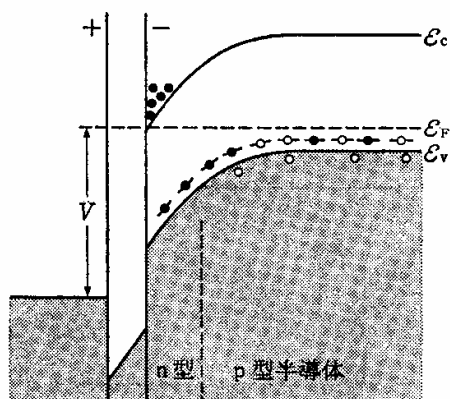
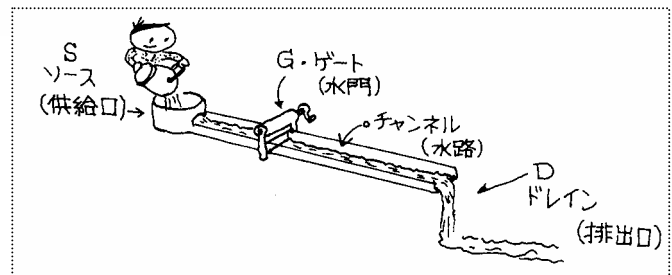
FET(Field-Effect-Transistor)



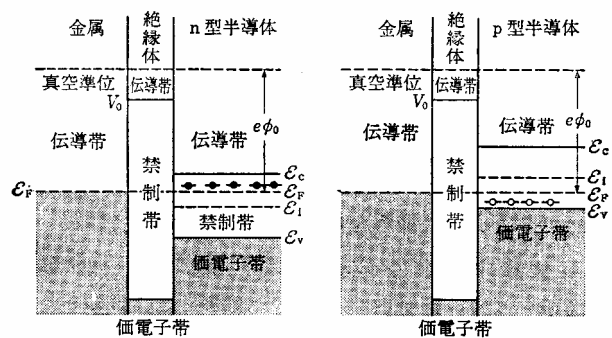
n 型チャンネル MOS FET の構造



(b)



(c)



(a)

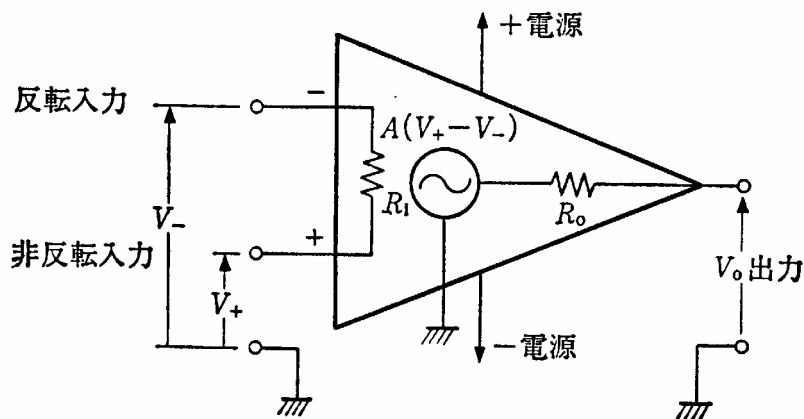
(b)

MOS 構造 p 型半導体の表面電位と表面電荷
(a) 正孔の蓄積, (b) 空乏層の生成, (c) p 型から n 型への反転

MOS 構造のエネルギー準位図 (0 バイアス)
(a) n 型半導体, (b) p 型半導体の場合

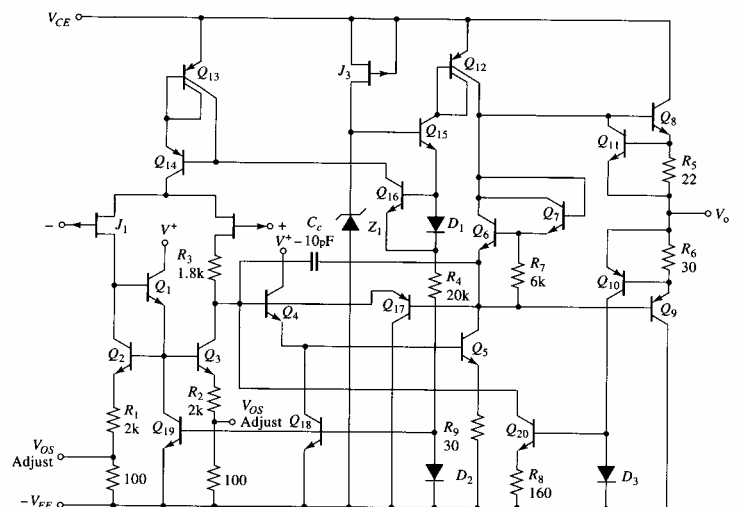
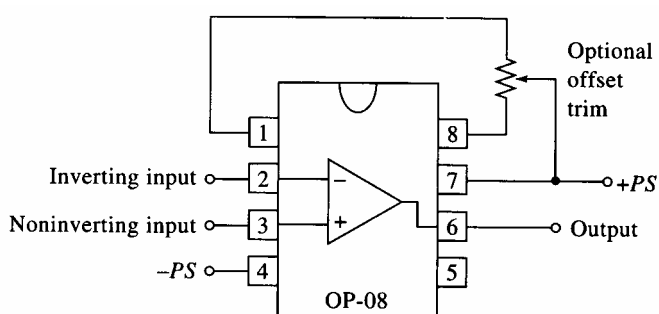
Operational Amplifiers

オペアンプ



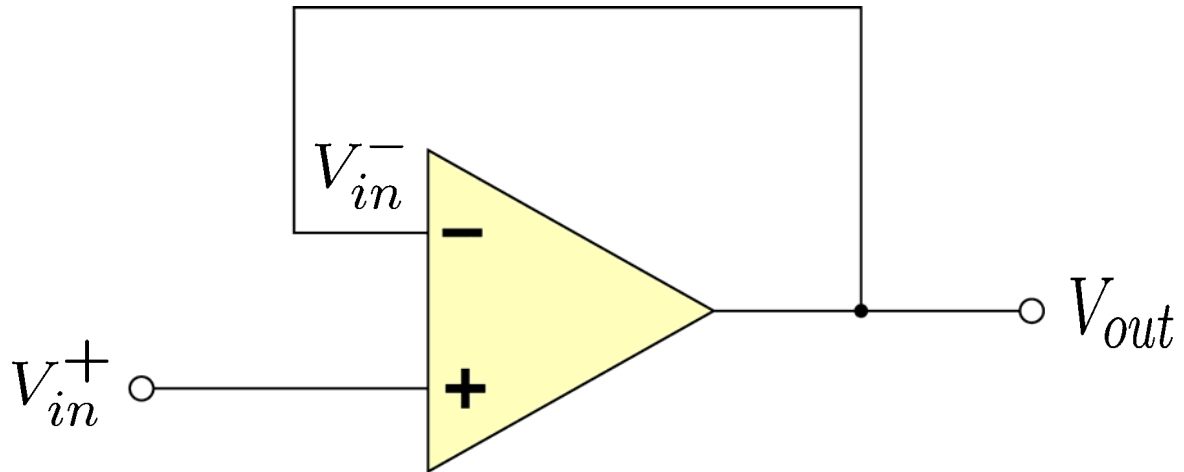
1-1 図 オペアンプの記号と等価回路

- 入力インピーダンス = ∞ ($10^6 - 10^{13} \Omega$)
- 出力インピーダンス = 0 1-10 Ω
- 高利得 = ∞ ($10^4 - 10^6$)
- ゼロ差入力 ゼロ出力 ($< 0.1 \text{mV}$)



電圧フォロアー回路

インピーダンス変換(High Z \Rightarrow Low Z)



- ・電圧フォロワ回路

OPアンプは非反転入力電圧 V_{in}^+ と反転入力 V_{in}^- 間の電位差を増幅し出力する V_{out}

$$V_{out} = K(V_{in}^+ - V_{in}^-)$$

電圧フォロワ回路では $V_{in}^- = V_{out}$ であるから

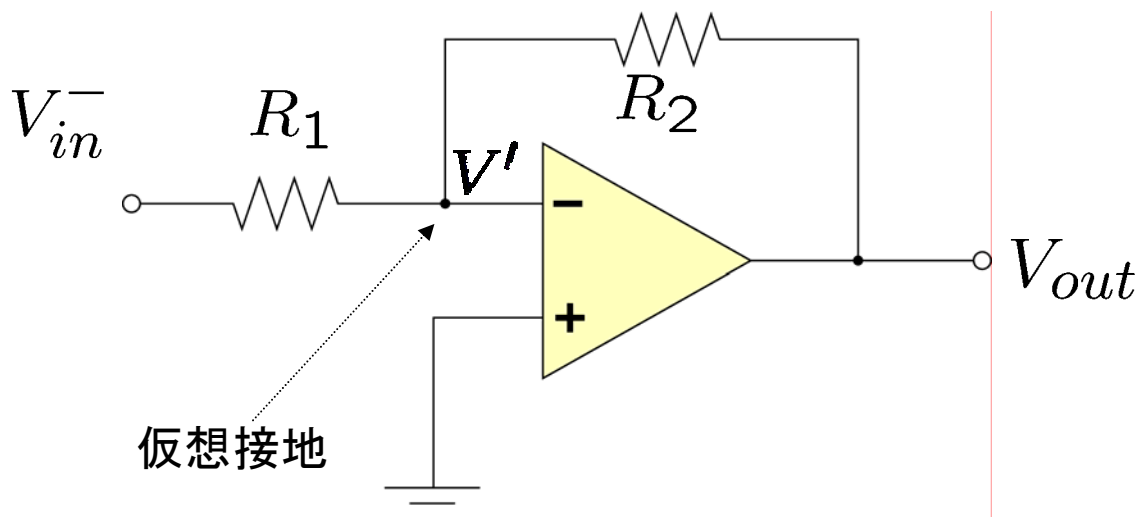
$$V_{out} = K(V_{in}^+ - V_{out})$$

$$V_{out} = \frac{K}{K+1} V_{in}^+$$

$K \rightarrow \infty$ のとき

$$V_{out} = V_{in}^+$$

反転増幅回路



・反転増幅回路

V_{in}^- と V_{out} との間に抵抗 R_1 、 R_2 が存在するから、

$$V' = V_{in}^- + \frac{R_1}{R_1 + R_2}(V_{out} - V_{in}^-)$$

$$V' = \frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}^-}{R_1 + R_2}$$

$$V_{out} = K(0 - V')$$

$$V_{out} = -K \frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}^-}{R_1 + R_2}$$

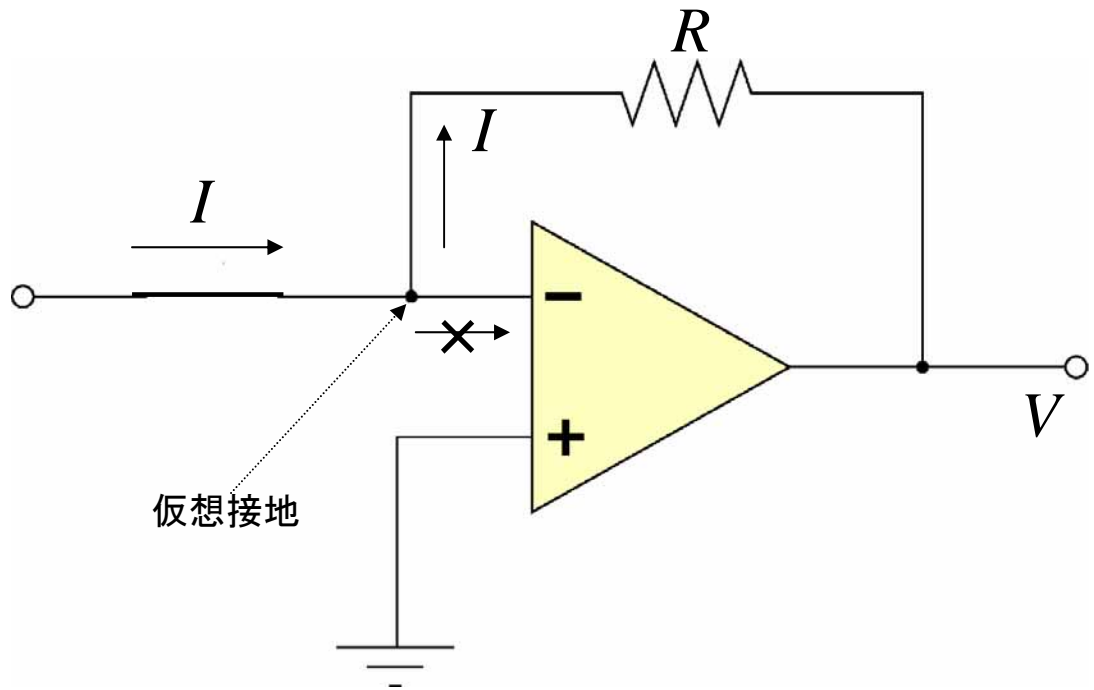
Kは十分大きいので

$$K \frac{R_1 V_{out} + R_2 V_{in}^-}{R_1 + R_2} \simeq 0$$

$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}^-$$

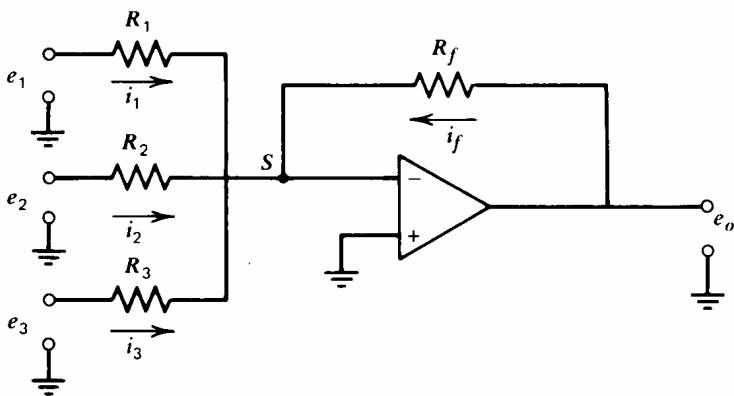
$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{V_{in}^-}{R_1} \\ I_2 &= \frac{V_{out}}{R_2} \\ 0 &= I_1 + I_2 \\ V_{out} &= -\frac{R_2}{R_1} V_{in}^- \end{aligned}$$

電流一電圧変換回路



$$0 - V = IR, \quad I = -V/R$$

加算回路



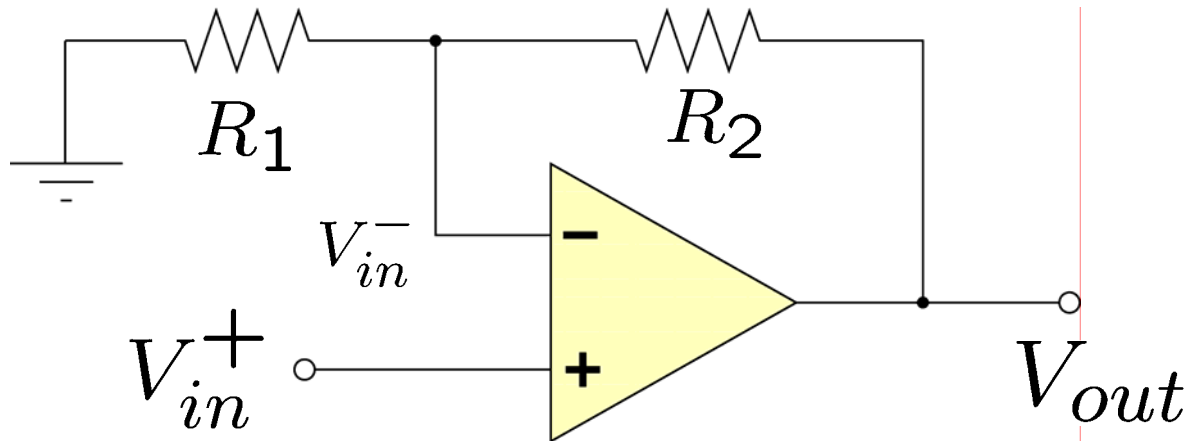
$$0 = I_1 + I_2 + I_3 + I_f$$

$$-\frac{E_f}{R_f} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} + \frac{E_3}{R_3}$$

$R_f \rightarrow \infty, R_1 = R_2 = R_3$ の時

$$E_1 + E_2 + E_3 = 0$$

非反転増幅回路



・非反転増幅回路

$$V_{in}^- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}$$

となる。OPアンプの性質から、

$$\begin{aligned} V_{out} &= K(V_{in}^+ - V_{in}^-) \\ &= K\left(V_{in}^+ - \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{out}\right) \end{aligned}$$

$$\left(\frac{1}{K} + \frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) V_{out} = V_{in}^+$$

$K \rightarrow \infty$ のとき、 $\frac{1}{K} \rightarrow 0$ となるので

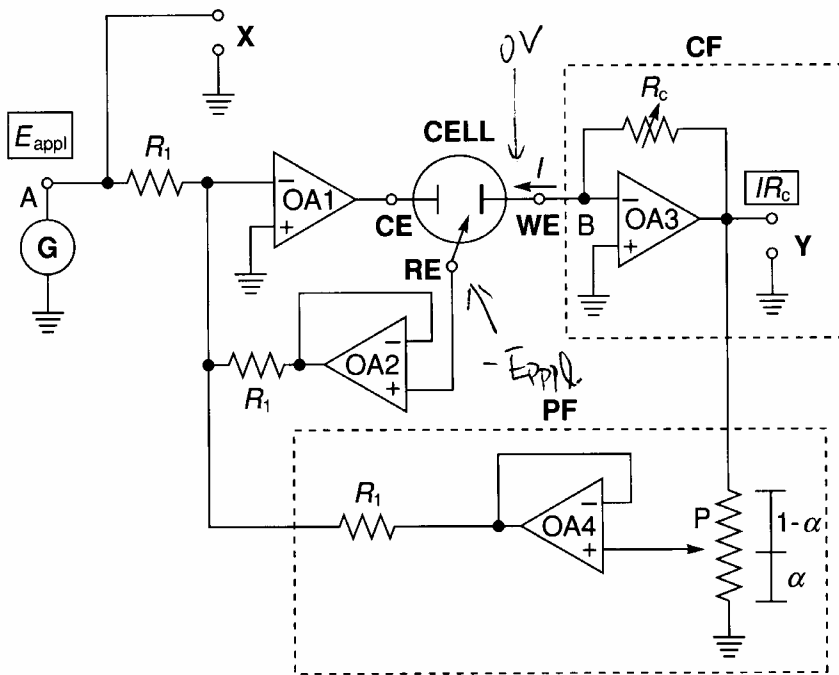
$$\begin{aligned} V_{out} &= \frac{R_1 + R_2}{R_1} V_{in}^+ \\ &= \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in}^+ \end{aligned}$$

オペアンプの化学での利用

- ポテンシostat 電気化学
- 電流測定(パッチクランプ)
- 演算器(加減乗除、指数対数)
- 分光 電流-電圧測定
- フィルター
- 電源回路

ポテンシostat

図は大塚, 加納, 桑畑
Basic電気化学, 化学同人より転載



溶液抵抗 R_{sol} を打ち消すための正帰還回路

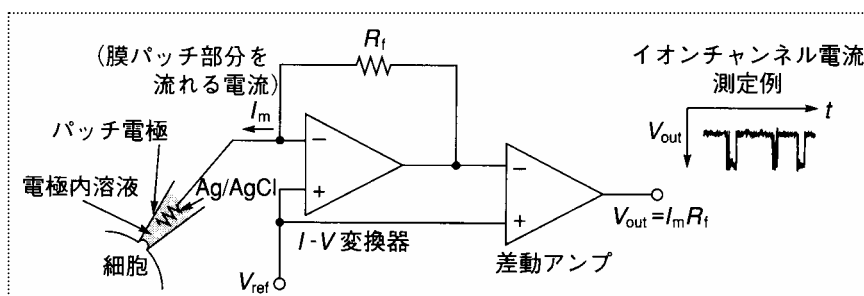
$$E_{appl} + E_{RE} + \alpha IR_C = 0$$

(加算回路参照)

$$E_{RE} = -E_{appl} - \alpha IR_C$$

従って, WEの電位は溶液からみて
 $E_{WE} = E_{appl} - IR_{sol} + \alpha IR_C$ となる。

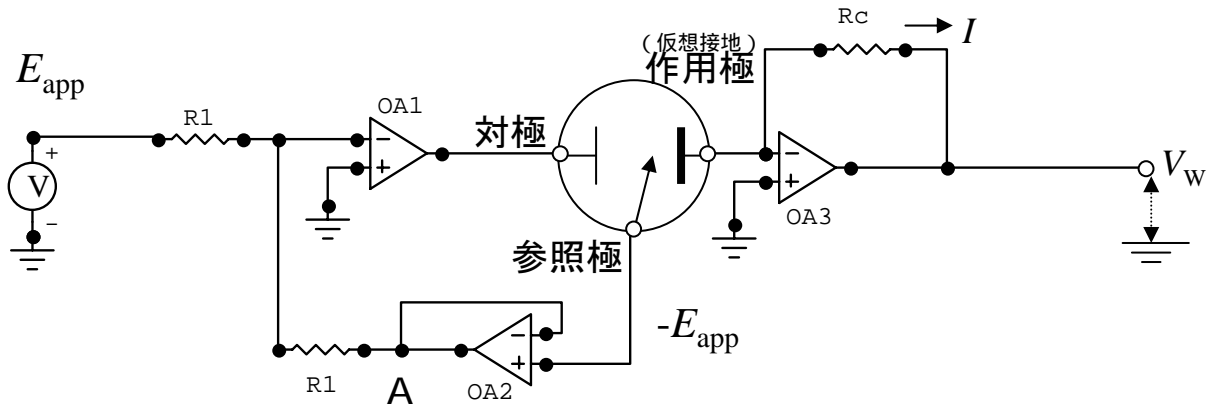
他の回路は次ページ参照



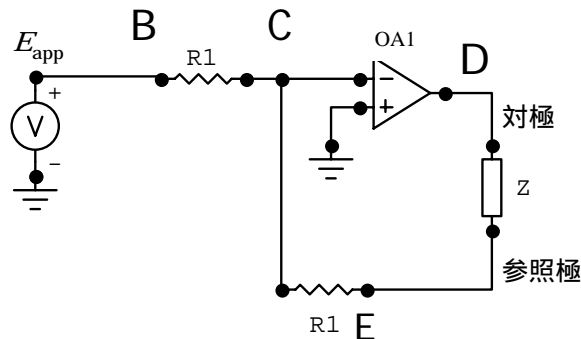
パッチクランプ

電気化学の電流-電圧測定に使われるポテンショスタットは以下のようにオペアンプを組み合わせたものである。以下の問いに答えよ。

(a) オペアンプの入力インピーダンスが高いことを利用して参照極に電流を流さないようにするために、OA2が用いられている。オペアンプOA2の増幅率 K が無限大の時、参照極とA点間の電位は等しいことを示せ。増幅率 K は、 $V_{out} = K(V_{in}^+ - V_{in}^-)$ で表される。



(b) 上図のポテンショスタットの左半分を以下の等価回路で示す。参照極の電位は $-E_{app}$ で与えられることを示せ。ただし、ここでOA2は考慮してない。(ヒント：この回路は反転増幅回路である。C点は仮想接地とみなせる。D点すなわち対極の電位を求め、抵抗分割でE点すなわち参照電極の電位を求めよ。)



$$I_{BC} = E_{app} / R_1, \quad I_{EC} = V_D / (Z + R_1), \quad I_{BC} + I_{EC} = 0,$$

$$E_{app} / R_1 + V_D / (Z + R_1) = 0, \quad V_D = -E_{app} (Z + R_1) / R_1$$

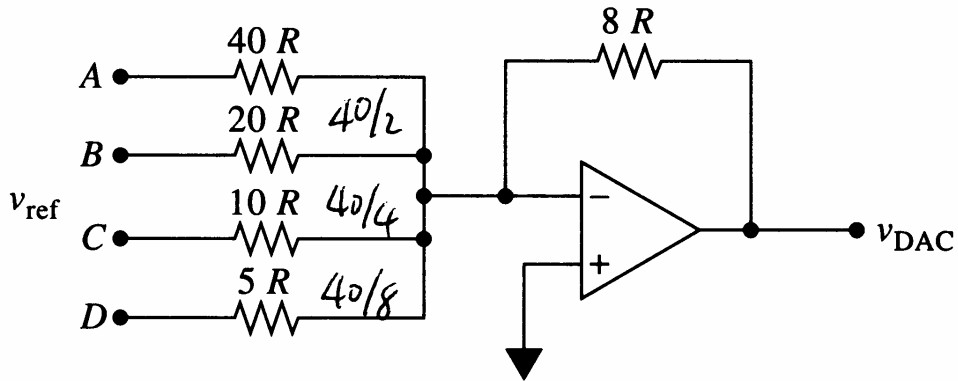
$$V_E = V_D R_1 / (Z + R_1) = -E_{app} (Z + R_1) / R_1 * R_1 / (Z + R_1) = -E_{app}$$

3) (対極の電位)/(参照極の電位)は $1 + (Z/R_1)$ で与えられることを示せ。

4) 作用極に流れる電流 I はどのように測定されるのか？ (ヒント：電圧 V_w と R_c から求めよ。)

$$-I R_c = V_w$$

DA converters

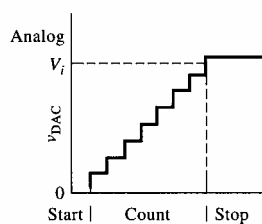
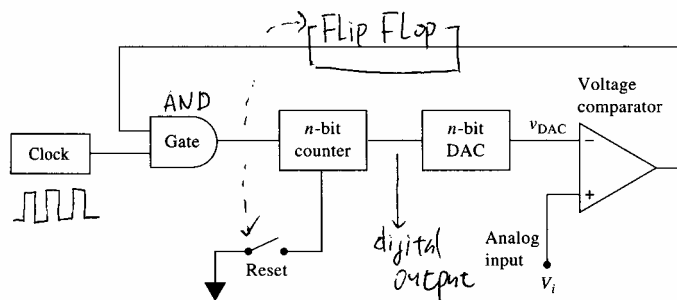


$$V_0 = R_f I_f = -R_f [V_D/R_D + V_C/R_C + V_B/R_B + V_A/R_A]$$

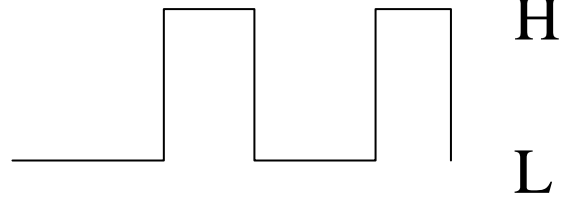
$$= (1/5)[8V_D + 4V_C + 2V_B + V_A]$$

10進数	2進数表記	DCBAin V_{out} (V)
0	0000	0
1	0001	-1
2	0010	-2
3	0011	-3
4	0100	-4
3	0101	-5

AD converters



デジタル回路



種類	記号	真理値表		
		入力		出力
バッファ		H		H
		L		L
AND		A	B	O
		L	L	L
		L	H	L
		H	H	H
OR		A	B	O
		L	L	L
		L	H	H
		H	H	H
Ex.OR		A	B	O
		L	L	L
		L	H	H
		H	L	H
		H	H	L

図1.よく使われるゲート回路(1)

種類	記号	真理値表		
		入力		出力
インバーター		H		L
		L		H
NAND		A	B	O
		L	L	H
		L	H	H
		H	H	L
NOR		A	B	O
		L	L	H
		L	H	L
		H	H	L
Ex.NOR		A	B	O
		L	L	H
		L	H	L
		H	L	L
		H	H	H

空乏層の厚さや電位分布はポアソンの方程式 $\nabla^2 \phi = -\rho/\epsilon$ を用いて調べることができる。pn 接合面は平面とし、面に垂直に x 軸をとる。簡単のため、低温でフェルミ分布は $\mathcal{E} > \mathcal{E}_F$ で 0, $\mathcal{E} < \mathcal{E}_F$ では 1 であるとする。空乏層の中の不純物原子は全部イオン化されている。そこで内蔵電位を $\phi(x)$ とすると、p 型側を $x < 0$ とすると、空乏層では N_a 個のアクセプターが全部負イオンとなっているので、ポアソンの式は

$$-x_p < x < 0 \quad \text{で} \quad \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{eN_a}{\epsilon}$$

となる。* ϵ は半導体の誘電率を表わす。同様に n 型側の空乏層では、 N_d 個のドナーが正イオンとなっているので、

$$0 < x < x_n \quad \text{で} \quad \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{eN_d}{\epsilon}$$

となる。

p 型半導体の内部 ($-x_p < x$) では $\phi(x) = \phi_p$ で一定、n 型半導体の内部 ($x > x_n$) では $\phi(x) = \phi_n$ で一定であるから、各半導体内のポテンシャルは

$$-x_p < x < 0 \quad \text{では} \quad \phi(x) = \phi_p + \frac{eN_a}{2\epsilon}(x + x_p)^2$$

$$0 < x < x_n \quad \text{では} \quad \phi(x) = \phi_n - \frac{eN_d}{2\epsilon}(x - x_n)^2$$

となる。ところで、 $x = 0$ で $d\phi/dx$ と ϕ が連続でなければならないから

$$N_a x_p = -N_d x_n$$

$$\frac{e}{2\epsilon} N_a x_p^2 = \phi(0) - \phi_p, \quad \frac{e}{2\epsilon} N_d x_n^2 = \phi_n - \phi(0)$$

の関係がある。 $\Delta\phi_p = \phi(0) - \phi_p$, $\Delta\phi_n = \phi_n - \phi(0)$ とかけば、内蔵電位差は $\Delta\phi = \phi_n - \phi_p = \Delta\phi_p + \Delta\phi_n$ であって、上式から

$$x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\Delta\phi_p}{eN_a}}, \quad x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon\Delta\phi_n}{eN_d}}$$

$$\Delta\phi_p = \frac{N_d}{N_a + N_d} \Delta\phi, \quad \Delta\phi_n = \frac{N_a}{N_a + N_d} \Delta\phi$$

となる。したがって、空乏層の幅 (厚さ) を W とすると

$$W = x_n + x_p = \sqrt{\frac{2\epsilon\Delta\phi(N_a + N_d)}{eN_a N_d}}$$

と表わされる。