医用工学概論

第8回
電子回路

復習問題

次のあとに続くのは「大きい」「小さい」のいずれか

1. 抵抗のインピーダンスZ_Rは
   抵抗Rが大きいほど…
2. コンデンサのインピーダンスZ_Cは
   容量Cが大きいほど…
3. コンデンサのインピーダンスZ_Cは
   角周波数ωが高いほど…
4. コイルのインピーダンスZ_Lは
   インダクタンスLが大きいほど…
5. コイルのインピーダンスZ_Lは
   角周波数ωが高いほど…

$$\left(Z = \frac{V_{\max}}{I_{\max}}\right)$$

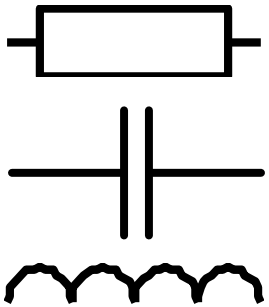
$$Z_R = R$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega C}$$

$$Z_L = \omega L$$

受動素子

- 抵抗
- コンデンサ
- コイル



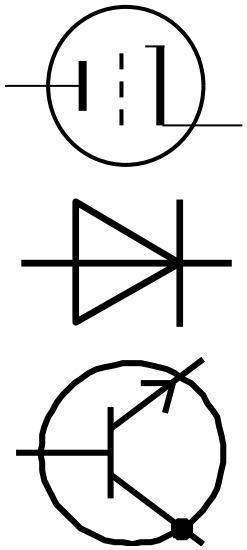
・与えられた電力の大きさ、周波数に従い、電流を流す。

・増幅、整流は行わない。

能動素子

- 真空管
- ダイオード
- トランジスタ

半導体



・小さな電流を大きく増幅したり、電流の流れを整えたりする働きを持つ素子。

・増幅、整流を行う。

真空管

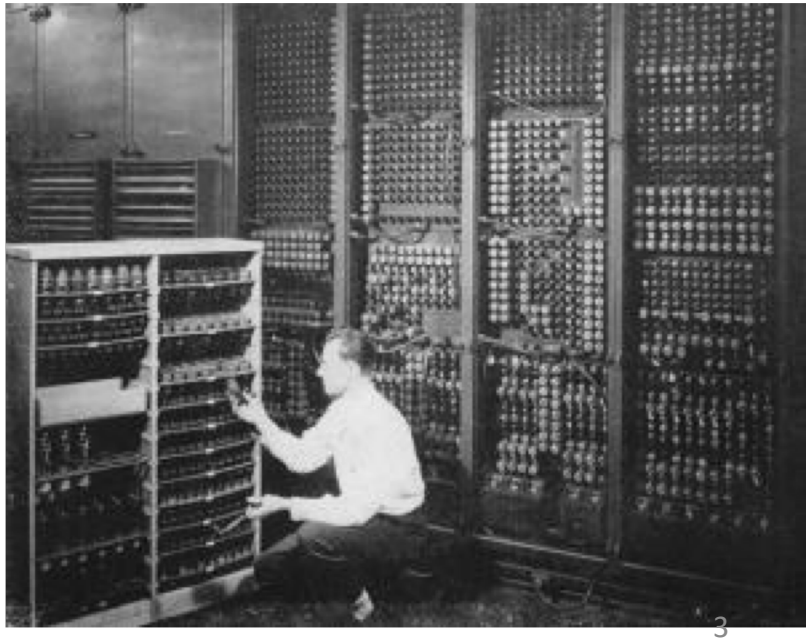
電球のフィラメントから電子が放出される現象（エジソン効果）を利用して電流の流れを制御する能動素子。

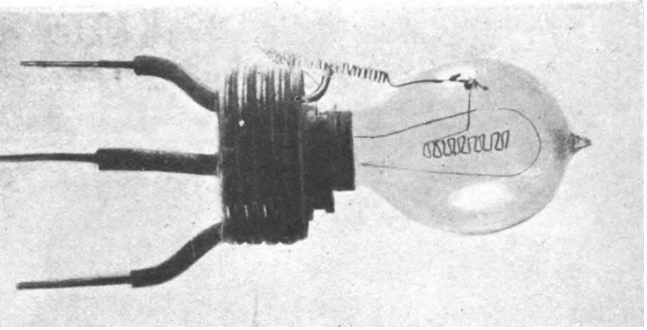
ENIAC（ニアック）

・最初のコンピュータ
・真空管17,468本。
・ダイオード7,200個。
・幅24m、高さ2.5m、奥行き0.9m
・総重量30トン

性能は現在の電卓以下。

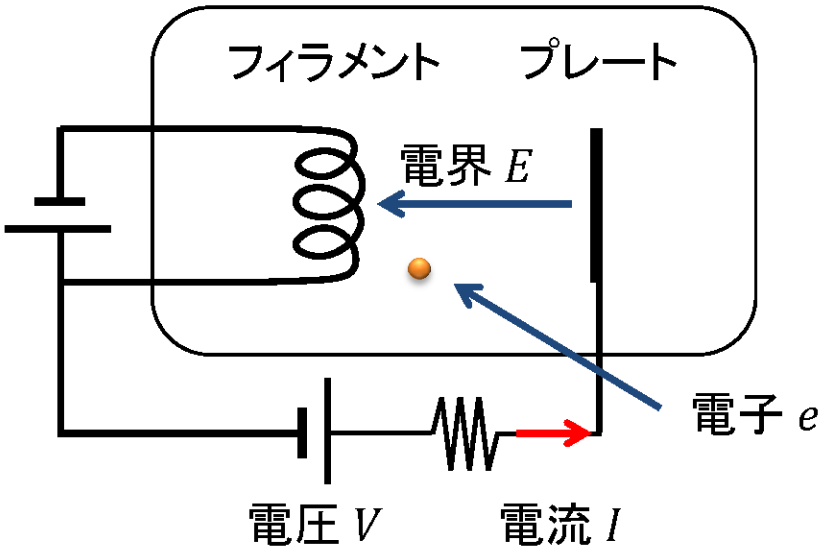
真空管が壊れるたびに手作業で交換 →



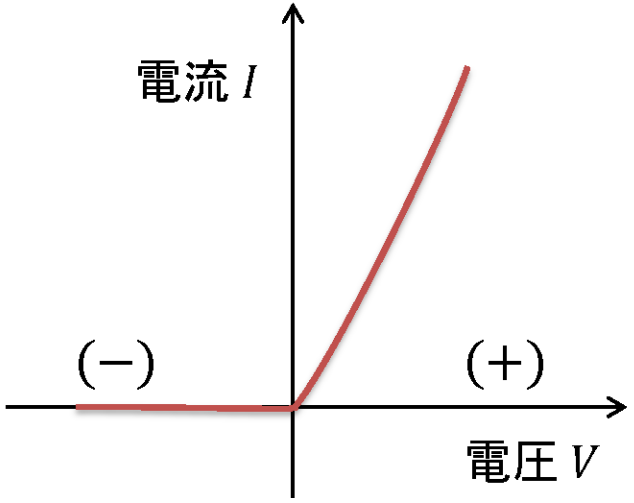


二極真空管（整流）

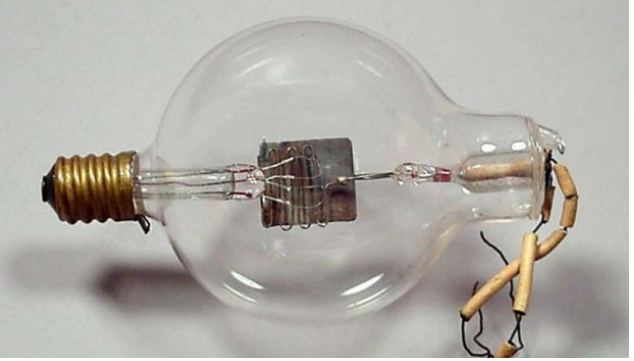
管内は真空に近い状態



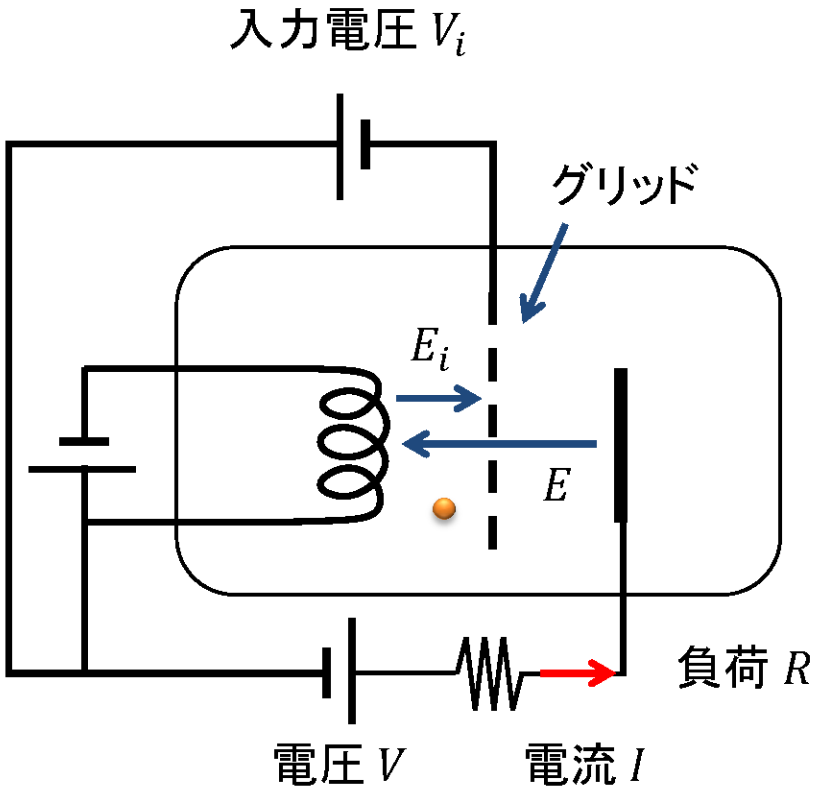
1. フィラメント（電熱線）に電流が流れることにより，加熱される．
2. 熱によるエネルギーで電子（熱電子）が飛び出す．
3. 電界の方向と逆へ電子が移動する．



- 電流は電荷の流れ
- 電子は負の電荷

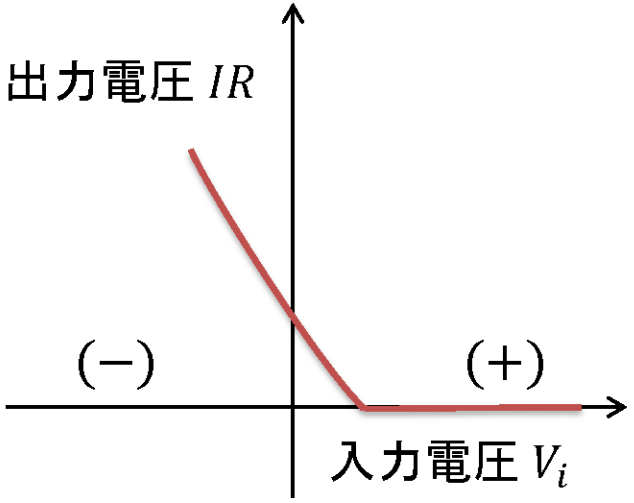


三極真空管（増幅）



1. グリッドとフィラメント間に電界 E_i を発生させる.

2. プレートとフィラメント間の電界 E との足し合わせにより，電荷の受ける力（クーロン力）が決まる.



真空管の特徴

真空中を電子が移動するので，電子の運動を妨げるものがなく，電子の移動度が高い．

⇨　高い周波数　に対する応答が良い．

例）ブラウン管として，表示器に使われる．

ガラス管などで構成されるため，　機械的振動　に弱い．

フィラメントの　加熱　に電力と時間を要する。

大型。

半導体素子

・ダイオード・トランジスタ

半導体の性質を利用したして電子の流れを制御する素子。原子レベルで電子の制御を行うため、真空管に比べて小型化が可能。

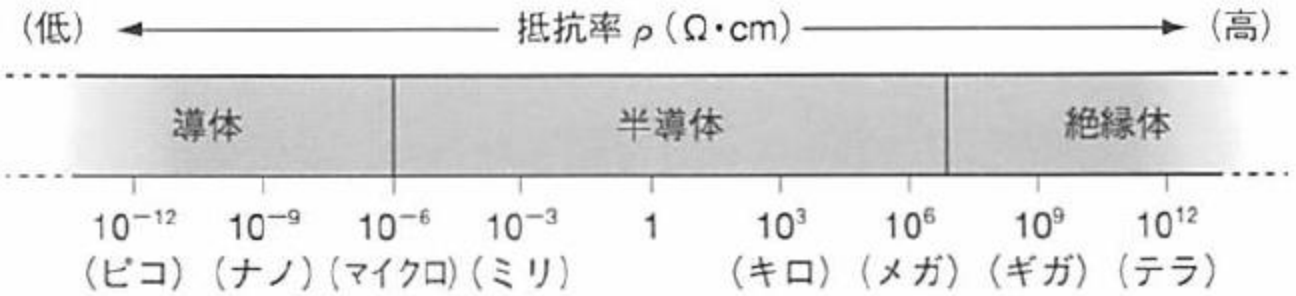
・世界最小のコンピュータ

IBMが開発した米粒よりも小さいコンピュータ。

数万個のトランジスタが入っている。

導体・半導体・不導体（絶縁体）

銅などの金属　　ガラス・ゴムなど



主な半導体

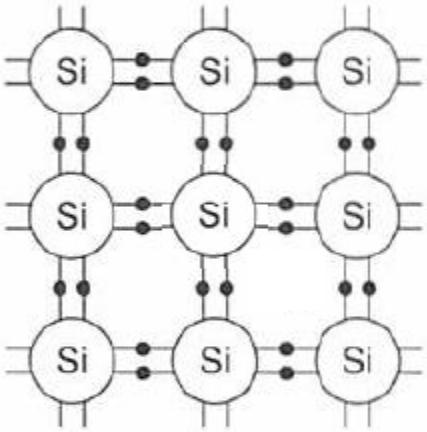
炭素（カーボン）　C
ケイ素（シリコン）　Si
ゲルマニウム　Ge
ガリウムヒ素　GaAs

						2 He
	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr

半導体の結晶

不純物半導体

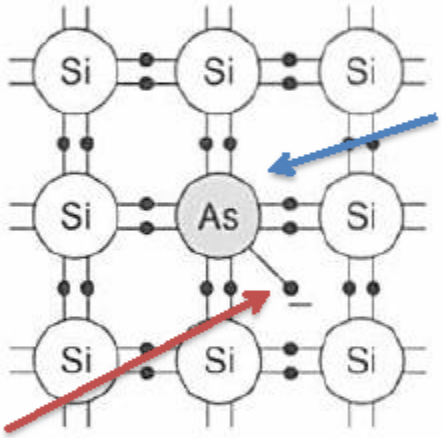
真性半導体



すべての電子が共有結合に使われているため，抵抗率が高い（絶縁体に近い）

N型 半導体

(Negative)

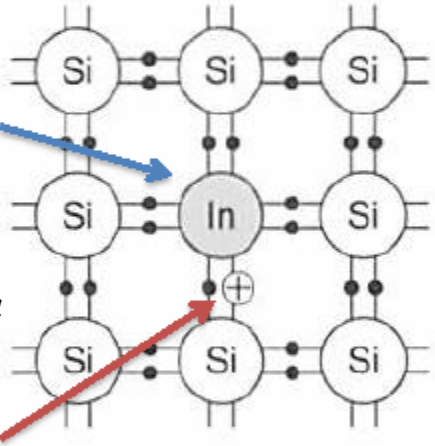


電子

5価の原子が含まれているため，共有結合されていない電子がある

P型 半導体

(Positive)

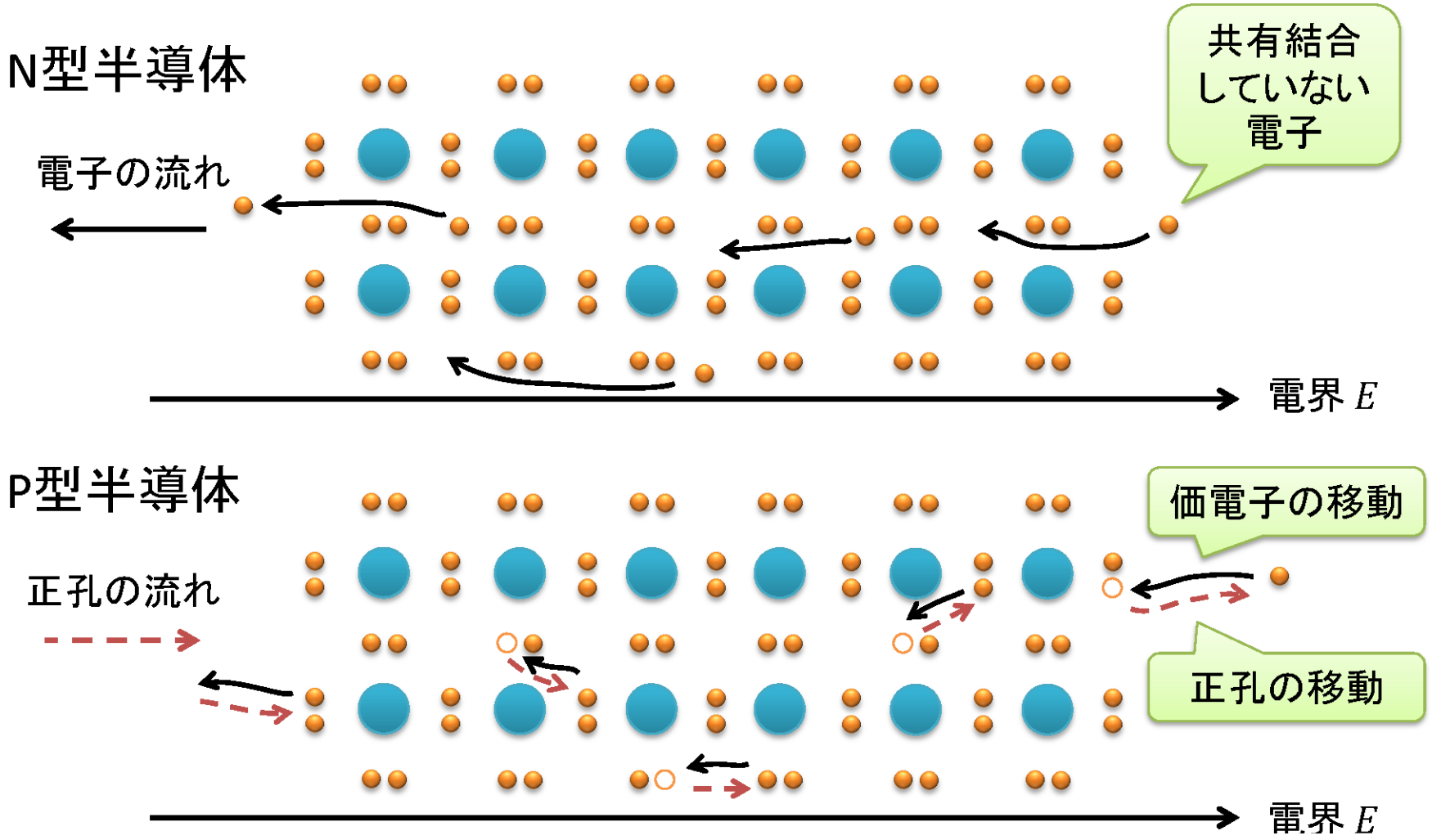


正孔（ホール）

3価の原子が含まれているため，共有結合に電子が欠乏している

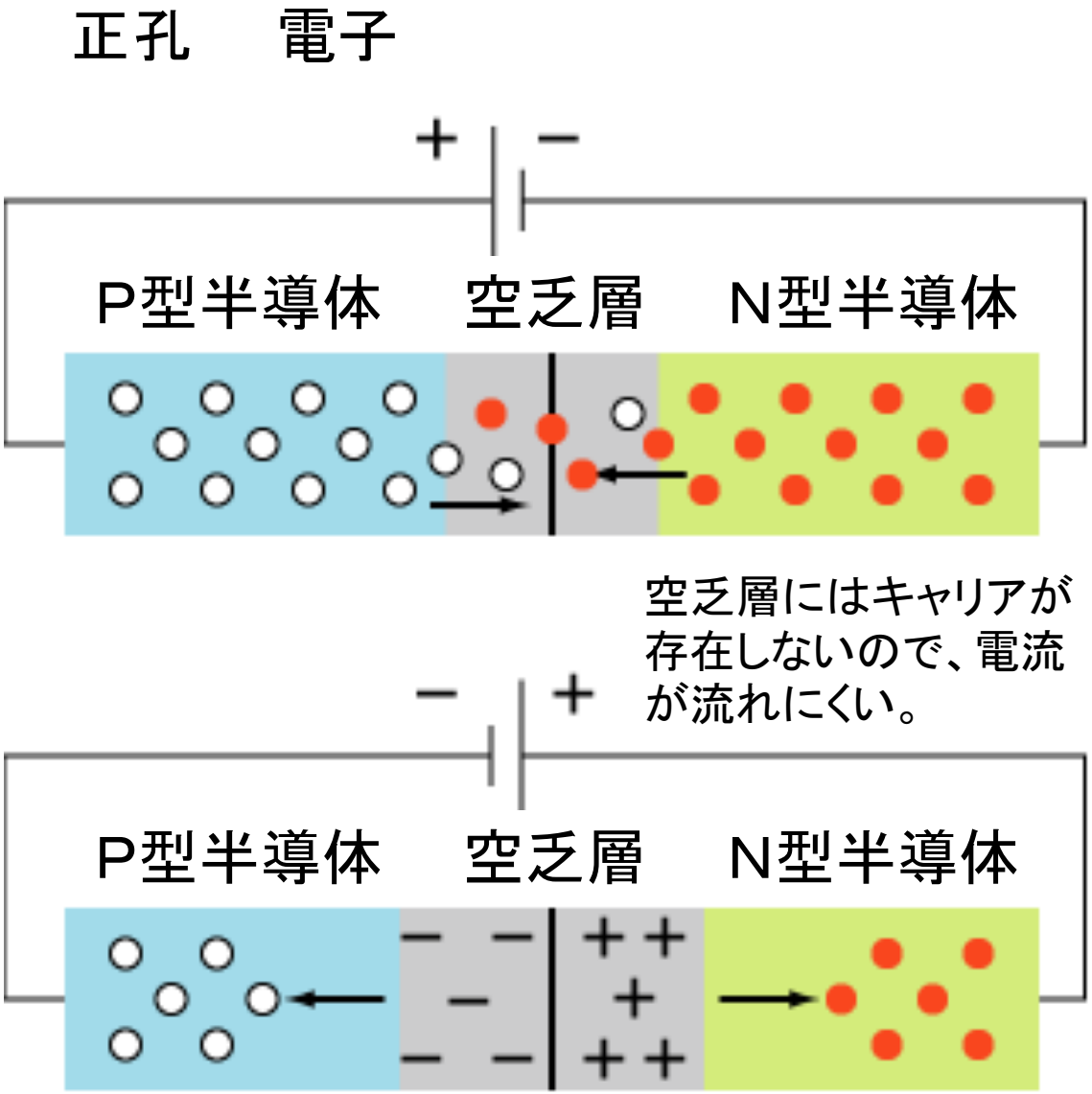
不純物
・N型
ドナー
・P型
アクセプタ

結晶中の電子の流れ



P型半導体での電子の流れは、 正孔の動き として考えることができる。
半導体中の自由電子、正孔は電流を流す運び屋の役割をするので キャリア と呼ばれる。

PN接合



P型とN型を接合すると、接合面で正孔と電子が打ち消し合って空乏層が生まれる。

P側から電圧をかけると空乏層が狭まり電流が流れる。

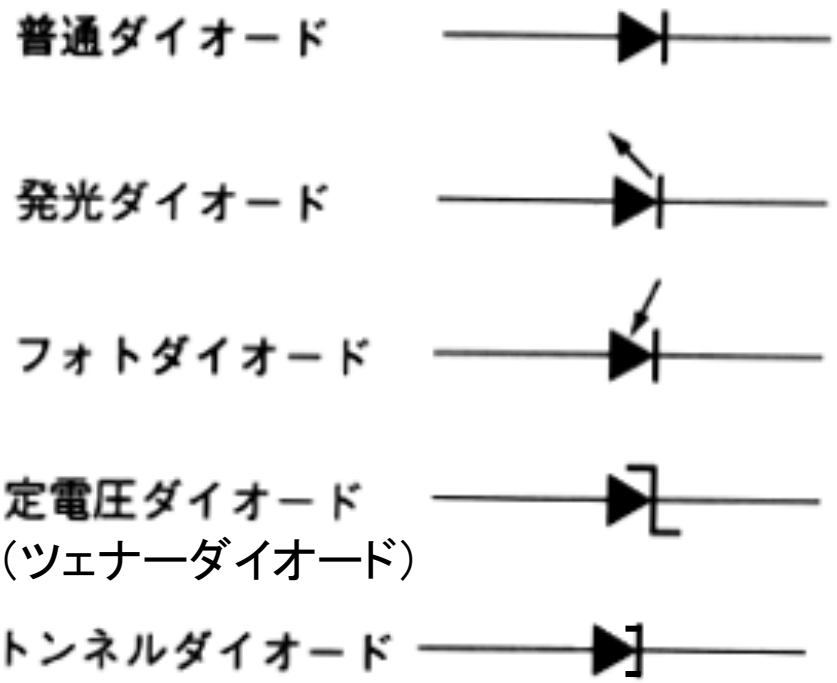
N側から電圧をかけると空乏層が広がり電流が流れない。

ダイオード Diode

P形半導体とN形半導体を接合したもの。

電流をアノード側からカソード側にしか流さない。

（整流、検波、検流）



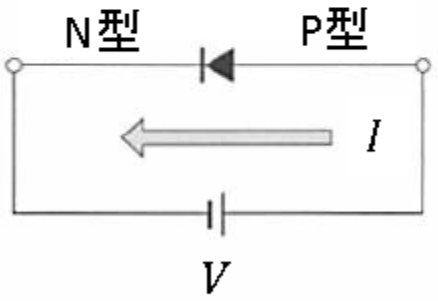
※トンネルダイオードは、負性抵抗、増幅効果を持つ

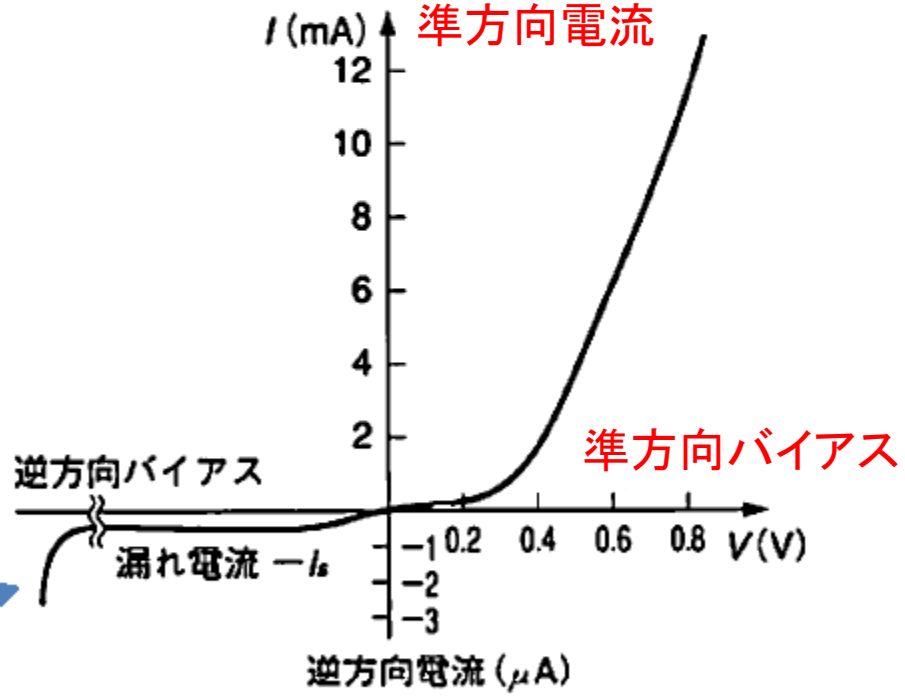
ダイオード

ダイオードは，　整流作用　を持つ

記号

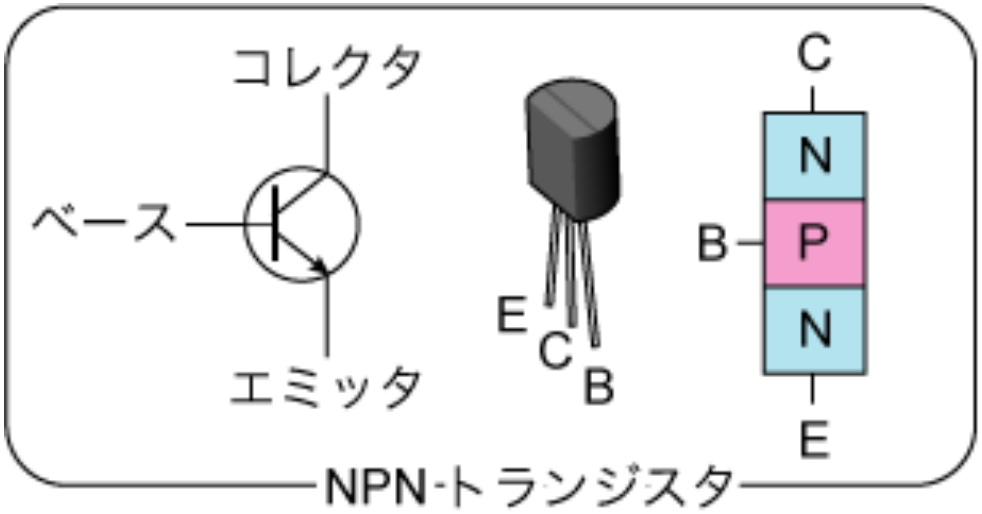
カソード　 　アノード

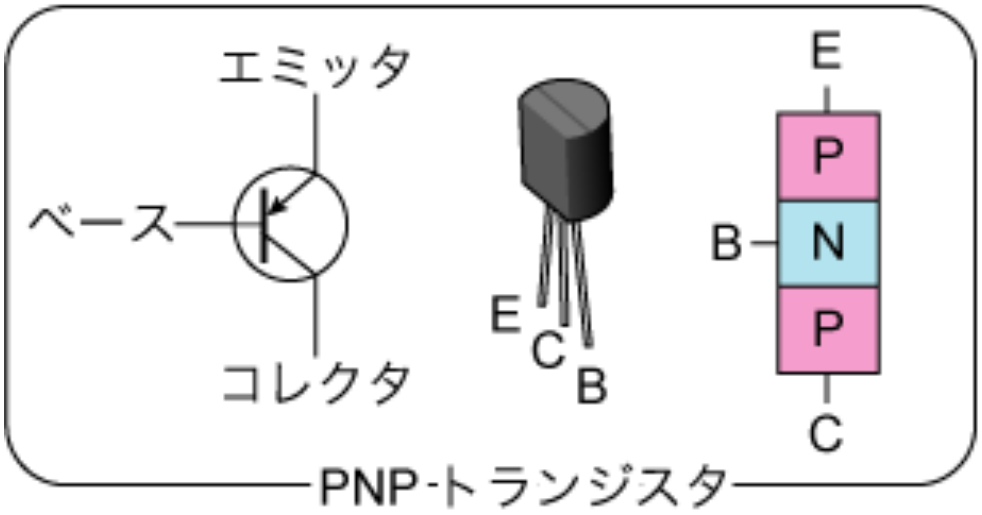




一定以上の逆電圧をかけると大電流が流れる．

バイポーラトランジスタ

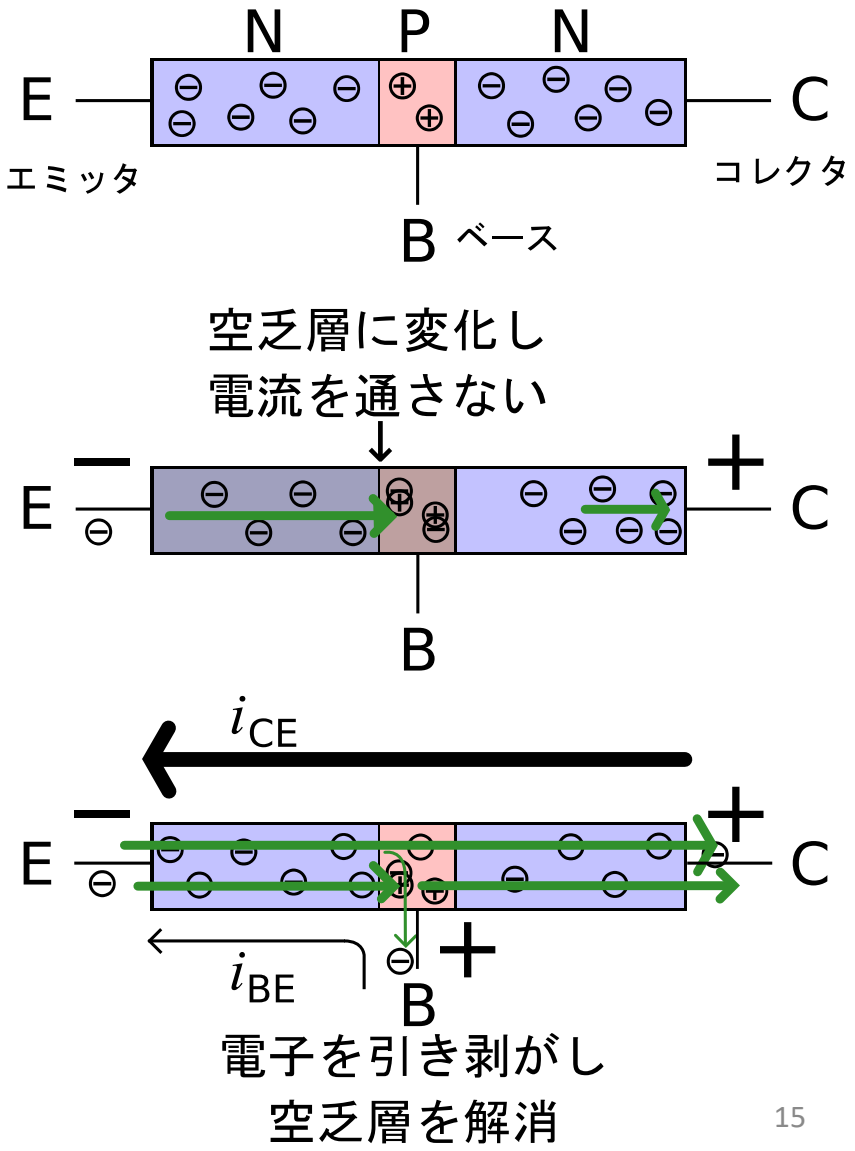




（NPN型）バイポーラトランジスタ

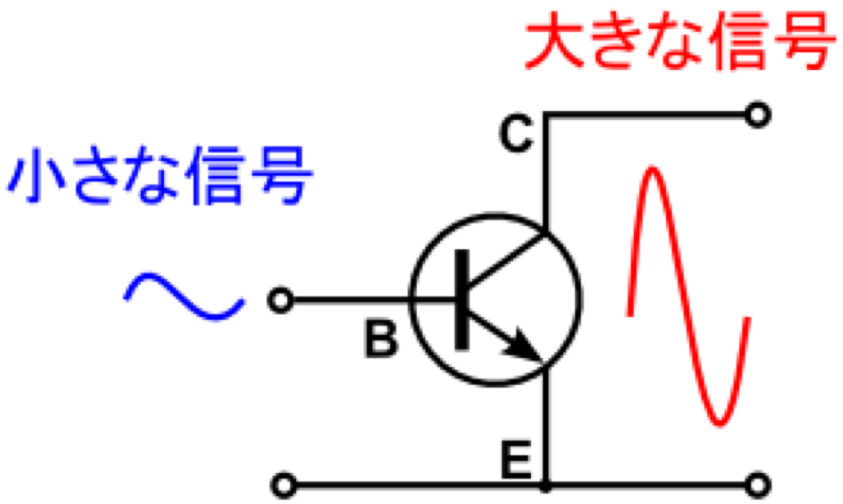
E-C間に電圧をかけても
電流は流れない。

E-B間にすこし電流を
流すと、
E-C間に大電流を
流せるようになる。

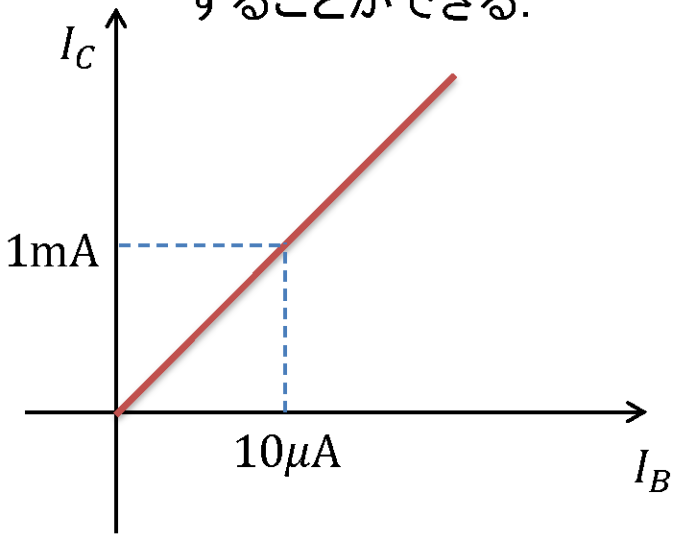


バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタは，　**増幅作用**　を持つ



小さい電流（I_B）変化で
大きい電流（I_C）を制御
することができる．

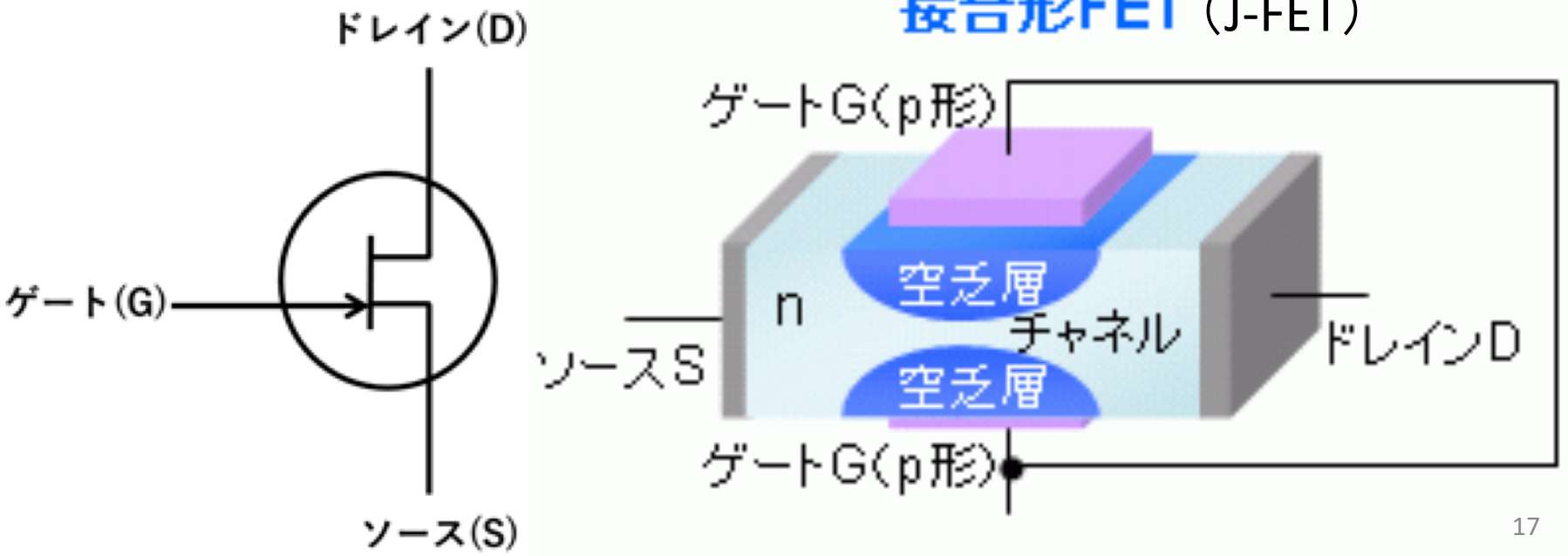


電流増幅率h_{FE} $= \frac{I_C}{I_B}$

FET（電界効果トランジスタ）

Field Effect Transistor

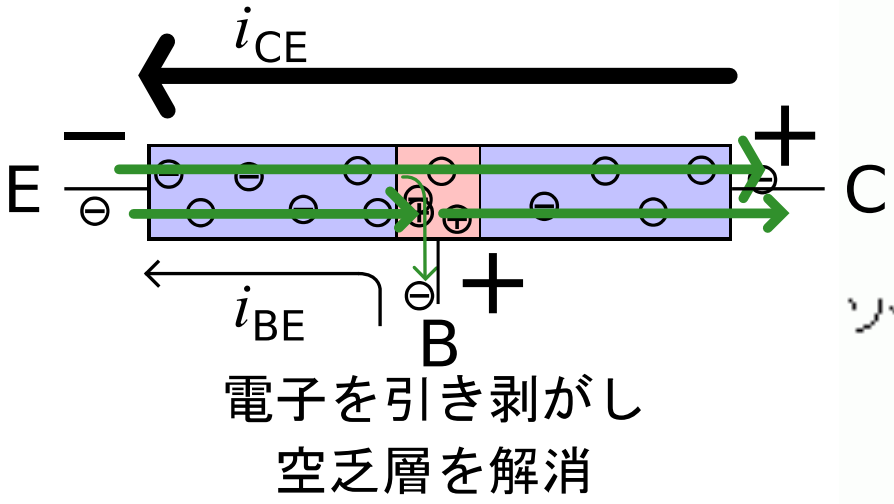
ゲートに逆電圧（電界）をかけ空乏層の厚さを変えると、
キャリアの通り道（チャネル）の幅が変わるので、
ソース･ドレイン間を流れる電流を制御できる。

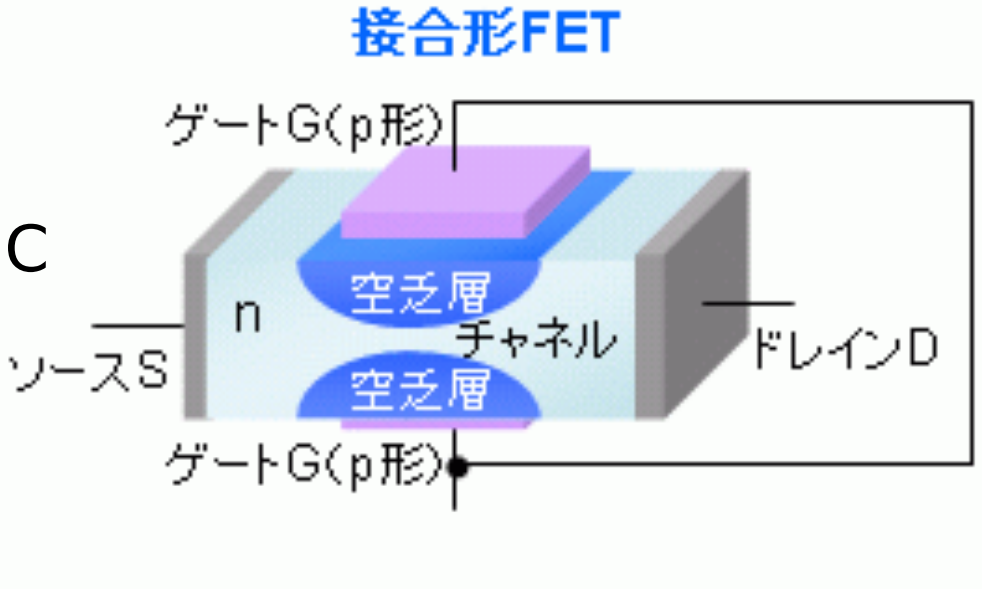


バイポーラ型　vs　電界効果型

電流　で電流を制御　　電圧　で電流を制御

低い　入力インピーダンス　高い　入力インピーダンス





FET（電界効果トランジスタ）について誤っているのはどれか？

1. P型とN型半導体からできている
2. 電源の極性が反対で特性は同じ素子がある
3. 周囲温度の影響を受ける
4. 電流制御形である
5. 真空管と同様、高入力抵抗である

IC

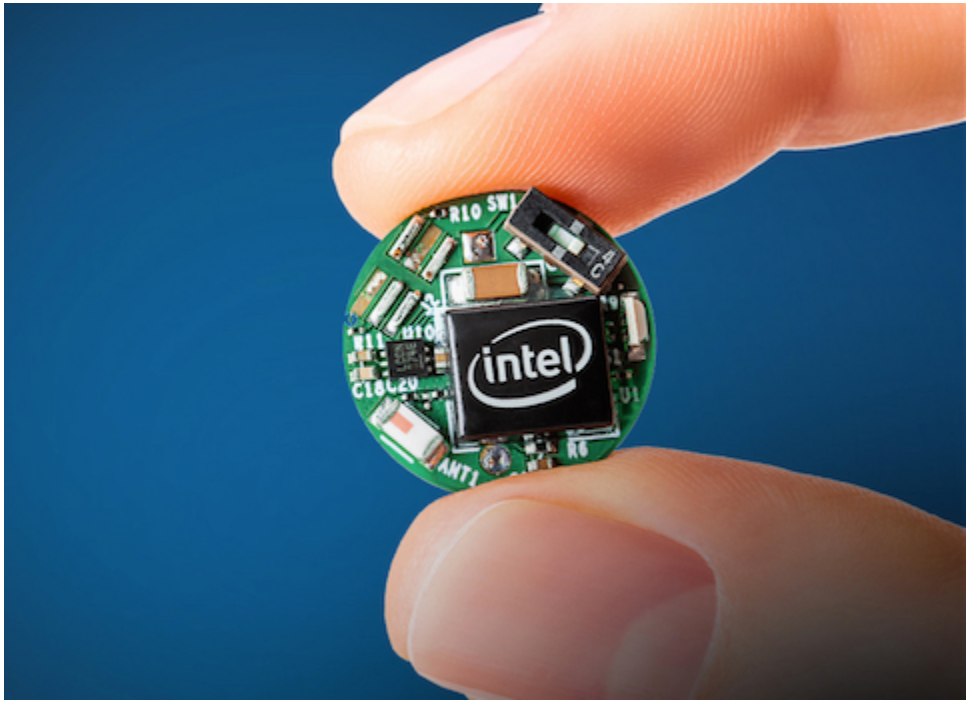
集積回路(IC)とは，半導体上に基本的な素子を集積して，機能的な働きをするように作られた回路

呼称	集積度の目安（IC上の素子数）
SSI	100個以上
MSI	100～1,000個
LSI	1,000個以上
VLSI	10万個以上
ULSI	1,000万個以上

IC　：integrated circuits(集積回路)
SSI　：small scale integration（小規模集積回路）
MSI　：medium scale integration（中規模集積回路）
LSI　：large scale integration（大規模集積回路）
VLSI　：very large scale integration（超大規模集積回路）
ULSI　：ultra large scale integration（超超大規模集積回路）

SoC (System-on-a-Chip)

システムの動作に必要な機能を
ひとつのチップに詰め込んだ、全部入りのIC



問 107 ☆　　(既出問題)

増幅作用をもつのはどれか。

a　トランジスタ

b　変圧器

c　コンデンサ

d　FET

e　三極真空管

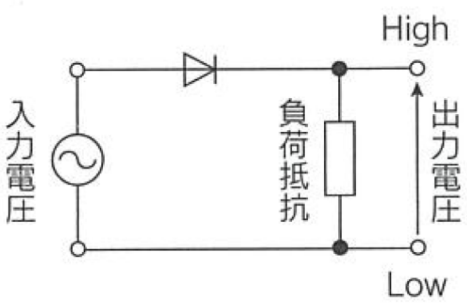
1. a, b, c　　2. a, b, e

3. a, d, e　　4. b, c, d

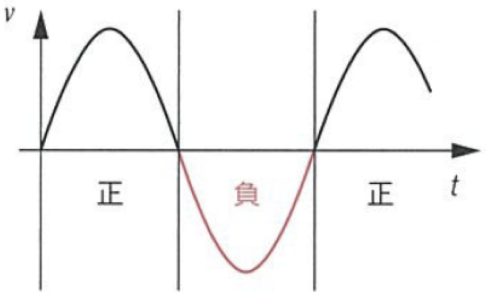
5. c, d, e

整流回路

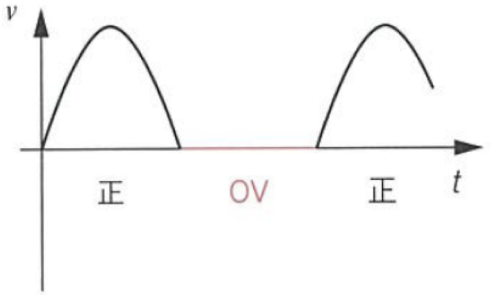
半波整流回路



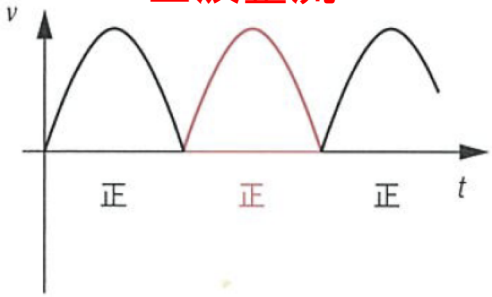
入力信号



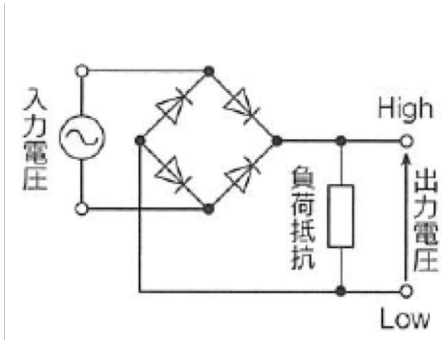
半波整流



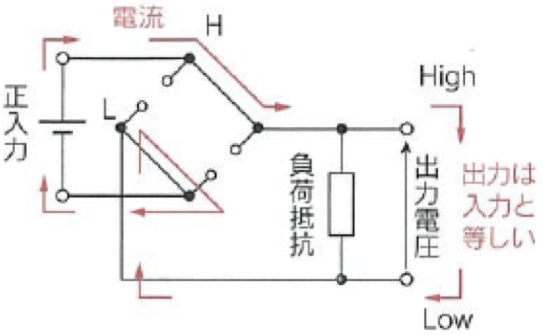
全波整流



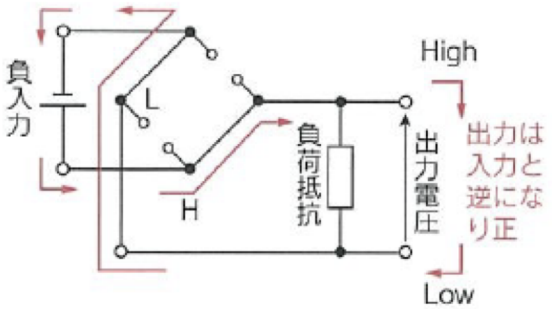
全波整流回路



a　ダイオードブリッジ型全波整流回路



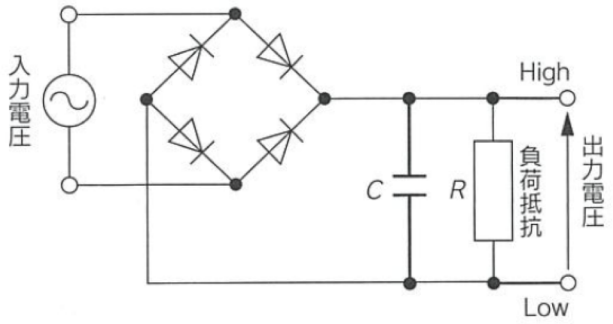
b　入力が正の時間帯の等価回路

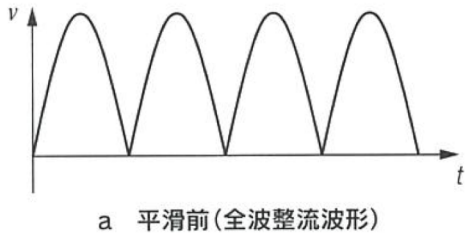


c　入力が負の時間帯の等価回路

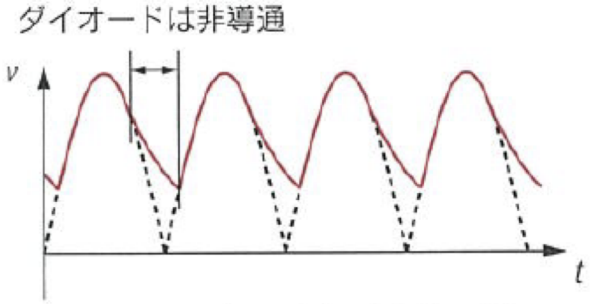
平滑回路

整流平滑化回路

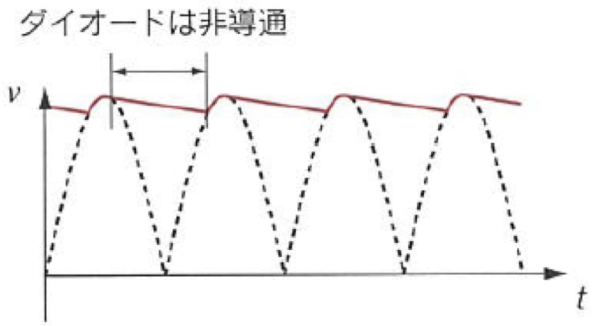




a　平滑前（全波整流波形）

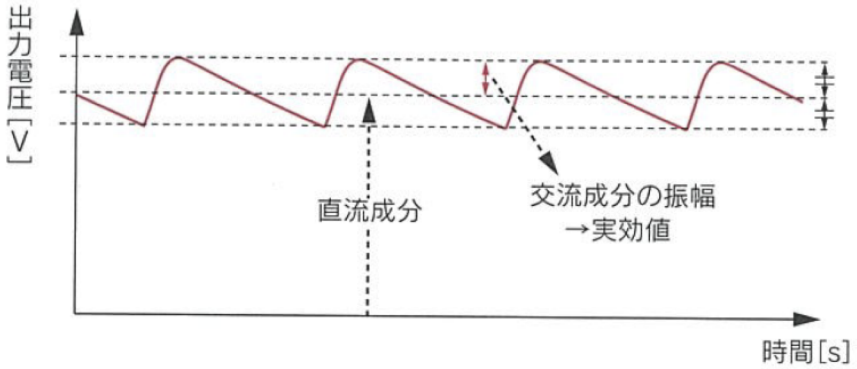


b　平滑後（悪い例：時定数→小）



c　平滑後（良い例：時定数→大）

リップル率：　平滑化の良さ



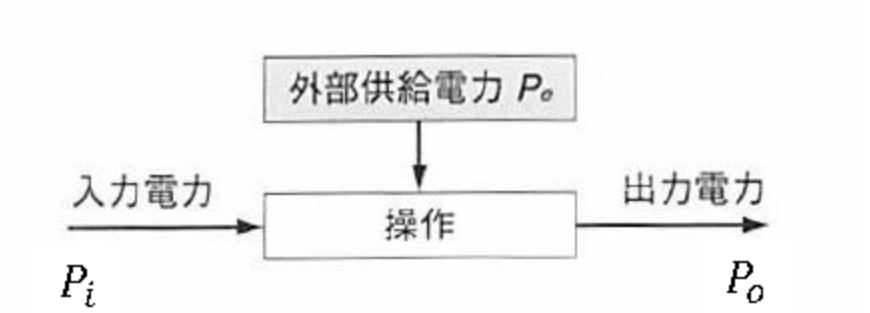
$$\text{リップル率}\gamma = \frac{\text{直流成分の大きさ}}{\text{交流成分の大きさ（実効値）}}$$

教科書 P. 72, 73

増幅

増幅とは，　微弱　（エネルギーの小さい）な入力信号を

外部供給電力　によって，　大きな　出力信号にするための操作

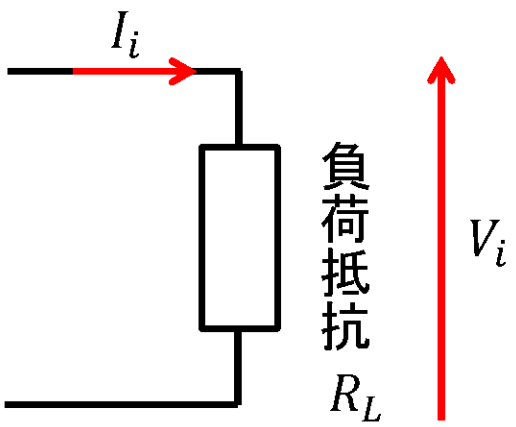


増幅度とは，　入力電力　に対する　出力電力　の　倍率

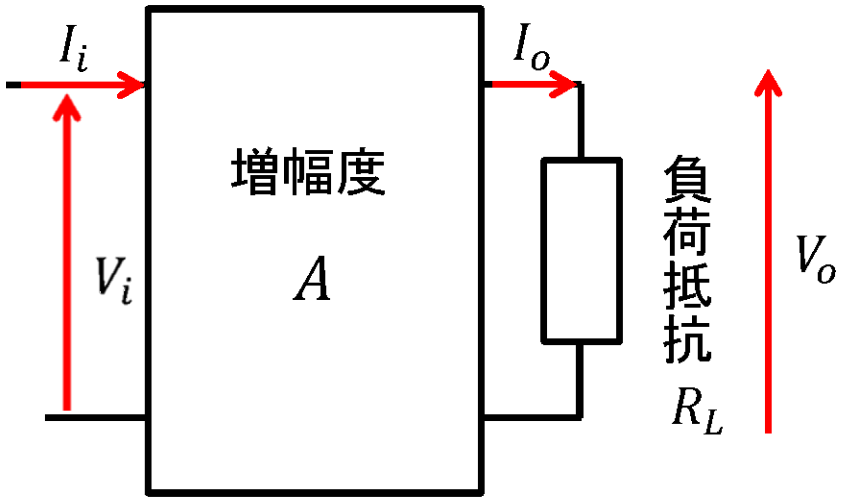
$$\text{増幅度 } A = \frac{P_o}{P_i}$$

増幅器

挿入前



挿入後



負荷に供給される電力

$$P_i = V_i I_i = \frac{V_i^2}{R_L} = I_i^2 R_L \qquad P_o = V_o I_o = \frac{V_o^2}{R_L} = I_o^2 R_L$$

$$\text{増幅度 } A = \frac{P_o}{P_i} = \frac{V_o^2}{V_i^2} = \frac{I_o^2}{I_i^2}$$

増幅度と利得

増幅度はレンジが広いため，　対数表示　で表すことがある．

$10^a = A$

$a = \log_{10} A\ [\mathrm{B}]$

常用対数

単位は，ベル．通常は，
10倍した[dB]（　デシベル　）
が用いられる．

増幅度のデシベル表示　＝　利得

$$10\log_{10} A = 10\log_{10}\frac{P_o}{P_i} = 20\log_{10}\frac{V_o}{V_i} = 20\log_{10}\frac{I_o}{I_i}$$

電圧増幅度　　電流増幅度

電圧利得が何dBのとき、
電力増幅度が何倍かを表にしています

（注）増幅度（A）とデシベル〔電圧増幅〕

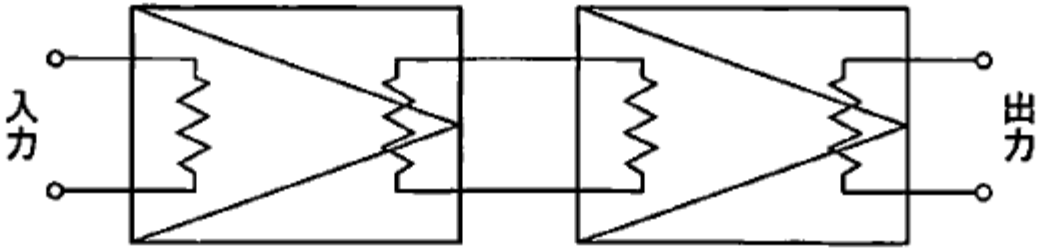
増幅度	1.4（$\sqrt{2}$）	1.995	3（$\sqrt{10}$）	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6
dB	3	6	10	20	40	60	80	100	120

増幅度の計算例

増幅度が何倍のとき、
電圧利得が何dBかを計算しています

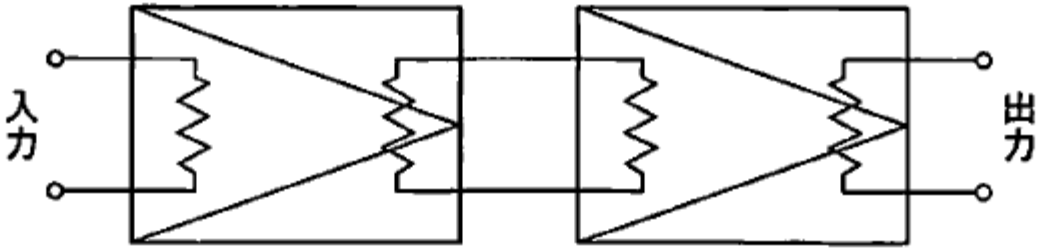
2倍 × 5倍 ＝ 10倍

(0.3B) 3dB ＋ (0.7B) 7dB ＝ (1B) 10dB



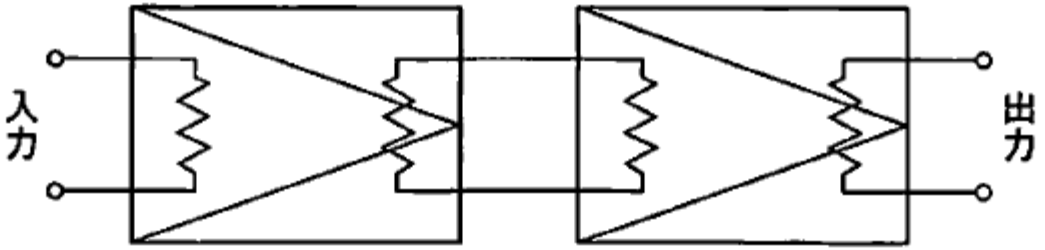
100倍 × 1,000倍 ＝ 100,000倍

(2B) 20dB ＋ (3B) 30dB ＝ (5B) 50dB

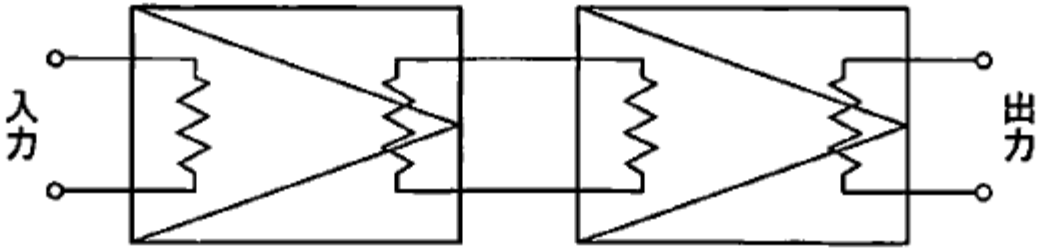


増幅度の計算例

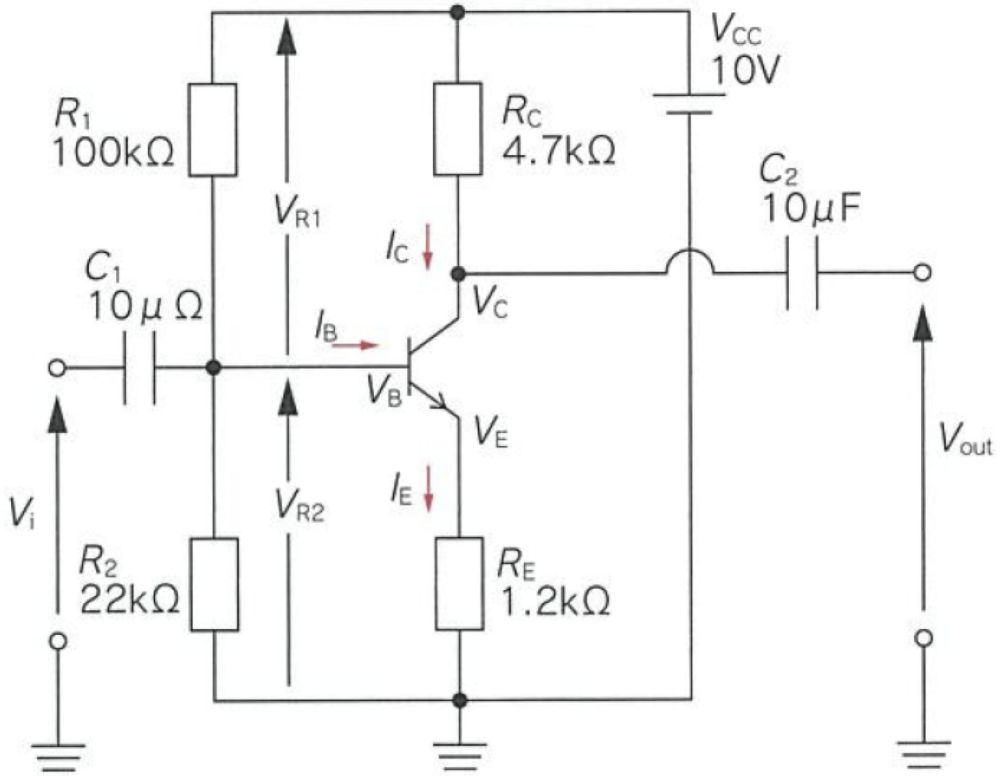
1/2倍	×	1/5倍	＝	1/10倍
-3dB	＋	-7dB	＝	-10dB



1/100倍	×	1,000倍	＝	10倍
-20dB	＋	30dB	＝	10dB



トランジスタを用いた増幅回路



〈各素子の役割〉

C_1：V_{in} に含まれる交流成分のみを通過（直流成分を遮断）させる．

R_1, R_2：B–E 間 pn 接合に順バイアスを加えるために V_{CC} を分圧する．

R_E：$I_E = \dfrac{V_B - 0.6}{R_E}$，
V_B に応じて I_C（≒I_E）を制限する．

R_C：$V_C = V_{CC} - I_C \cdot R_C$，
I_C に応じて V_C が決まる．

C_2：V_C に含まれる交流成分のみを通過させて V_{out} を得る．

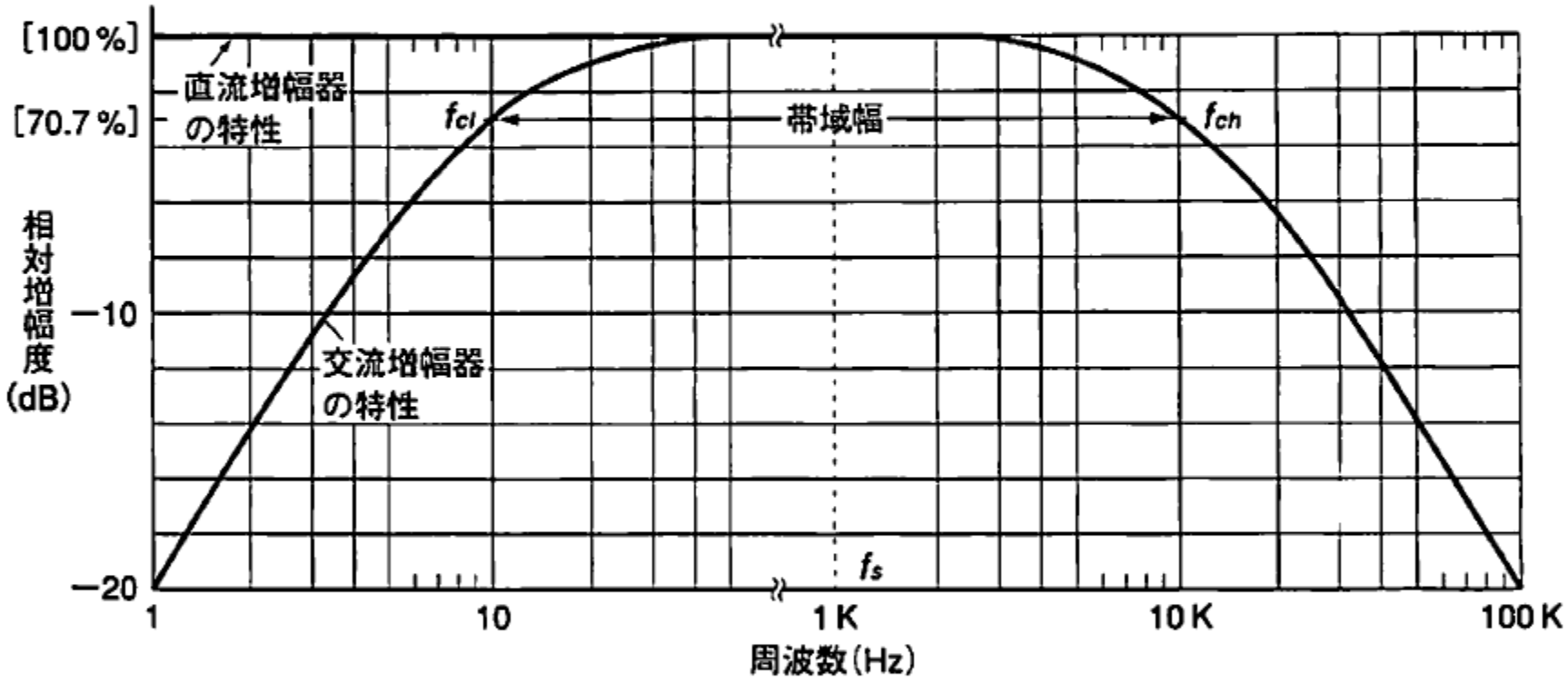
電圧増幅率 $A_v = \dfrac{V_o}{V_i} = \dfrac{R_C}{R_E}$

生体信号の特性

生体信号の周波数の例	電気血圧計	0~数十Hz
	心電計	0.05~100Hz
	微小電極用増幅器	0~20kHz
生体信号の大きさの例	脳波	数~数百μV
組織のインピーダンスの例	皮膚抵抗	数kΩ
	細胞膜抵抗	数十MΩ

増幅器の周波数特性

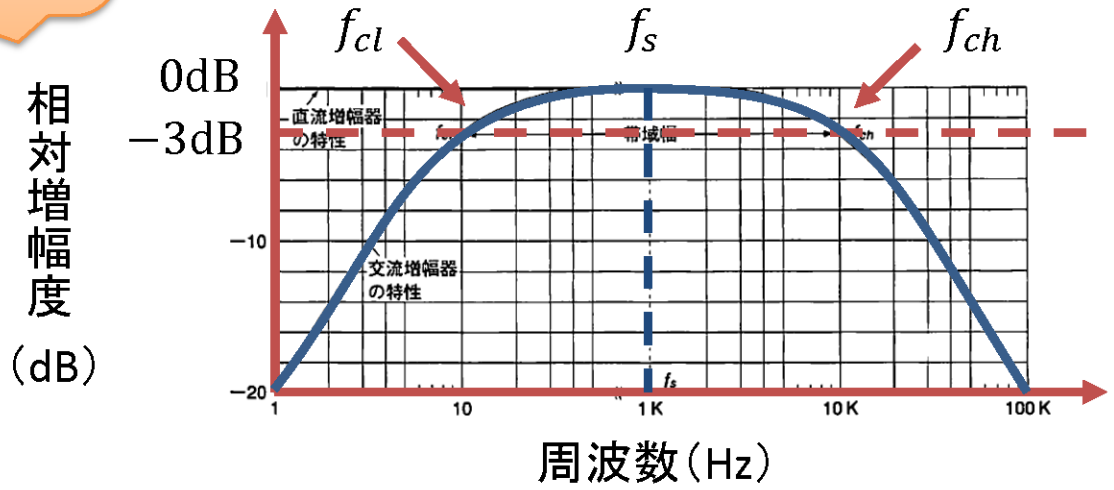
一般的に，増幅度は入力信号の　周波数　に依存する．



広い周波数で増幅度が高いほど，増幅器内部からの　雑音　が大きくなる．

基準周波数
f_sを0dBとした時
の増幅度

周波数特性

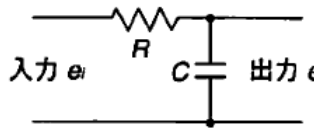
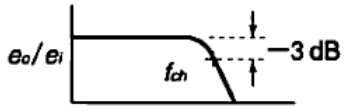
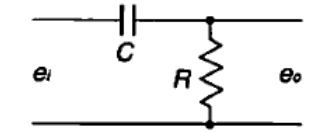
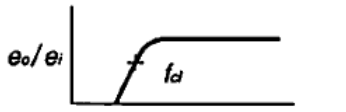
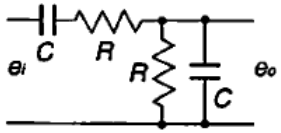
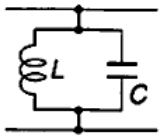
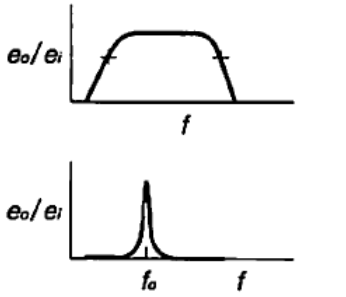
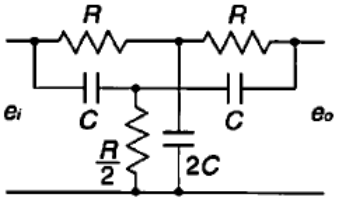
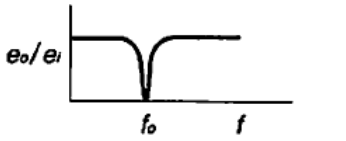


遮断周波数　電力増幅度が平坦部に対し，半分（−3dB）になる周波数
（電圧増幅度は$1/\sqrt{2}$倍，70.7%）

帯域幅　低域遮断周波数f_{cl}と高域遮断周波数f_{ch}の間
(Low cut-off)　(High cut-off)

帯域幅外での増幅は，信号を　歪ませて　しまうため，生体信号の特性（周波数）によって，適切な増幅器を用いる必要がある．

濾波(フィルタ)回路

種類	簡単な回路	周波数特性
低域遮波器 (LPF) 〔高域遮断〕	 積分回路 $f_{ch}=1/2\pi CR$	
高域遮波器 (HPF) 〔低域遮断〕	 微分回路 $f_{cl}=1/2\pi CR$	
帯域遮波器 (BPF)	 狭帯域の場合は 上記組み合わせ 中心周波数 f_o $f_o=1/2\pi CR$  $f_o=1/2\pi\sqrt{LC}$	
帯域除去器 (BEF)	 $f_o=1/2\pi CR$	

直流　に近い(低周波)信号に制限する回路

交流信号　に制限する回路

低域遮断周波数　$f_{cl}=\dfrac{1}{2\pi CR}$

時定数

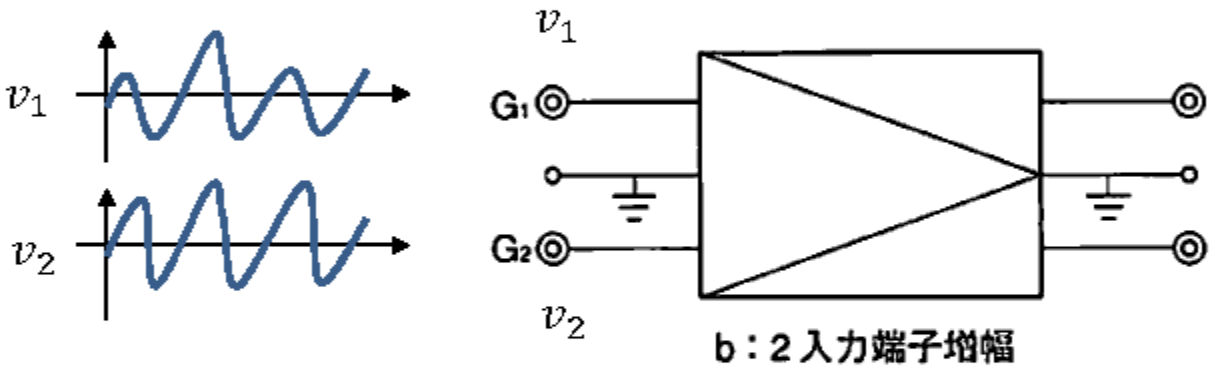
特定の帯域　に制限する回路

特定の帯域以外に制限する回路
(商用交流によるノイズ除去)

差動増幅器

2つの入力端子（＋端子と－端子）を持つ増幅器

2つの入力信号の差分を一定係数で増幅する



b：2入力端子増幅

差動増幅率：A_d

同相増幅率：A_c

差動入力　$\Delta v = v_d = (v_1 - v_2)/2$

同相入力　$v_c = (v_1 + v_2)/2$

出力

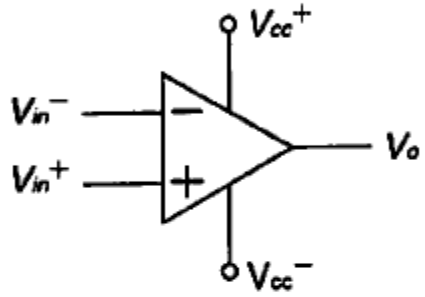
$$v_o = A_d v_d + A_c v_c$$

差動出力（作動利得）　同相出力（同相利得）

同相除去比（弁別比）　$\mathrm{CMRR} = \dfrac{A_d}{A_c}$

オペアンプ

オペアンプ（演算増幅器）は，‘　性質の良い　’増幅器



$V_o = A_v(V_{in}^+ - V_{in}^-)$

V_{cc}^+，V_{cc}^-：電源接続端子
V_{in}^+，V_{in}^-：差動入力端子
V_o：出力端子
A_v：電圧増幅率

入力インピーダンス　**大**
（入力電流が流れ込まない）

出力インピーダンス　**小**

ほぼ理想的な性質を持つ（直流）増幅器として扱うことができる．

増幅度が非常に　大きい　（$A_v \approx \infty$ とみなせる）．

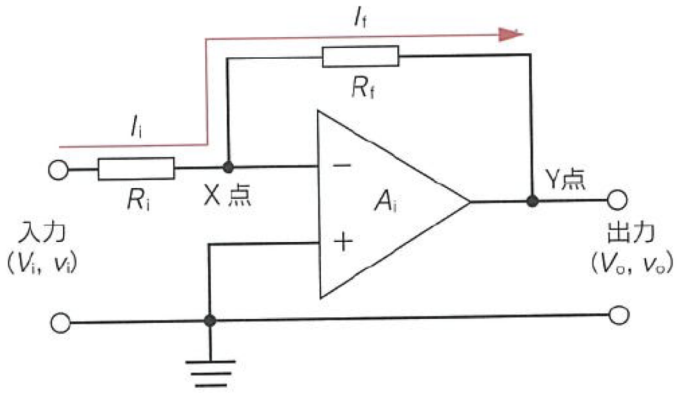
出力電圧 $V_o = A_V(V_{in}^+ - V_{in}^-)$

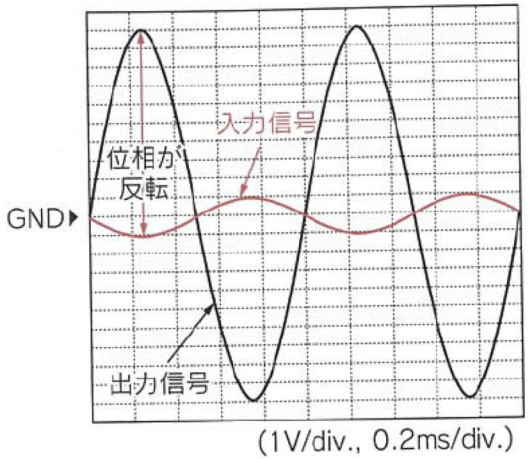
Imaginary short

出力電圧が有限値だとすれば，差動入力は　$V_{in}^+ - V_{in}^- \approx 0$ とみなせる．

オペアンプによる増幅回路

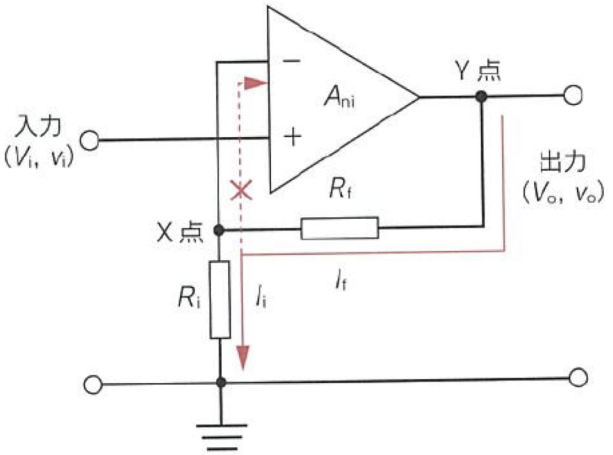
反転増幅回路：入力信号の位相を180度ずらして増幅

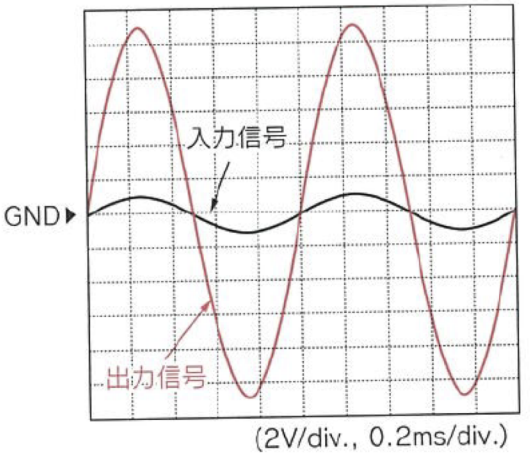




$$v_o = -\frac{R_f}{R_i} v_i$$

非反転増幅回路：入力信号の位相を変えずに増幅



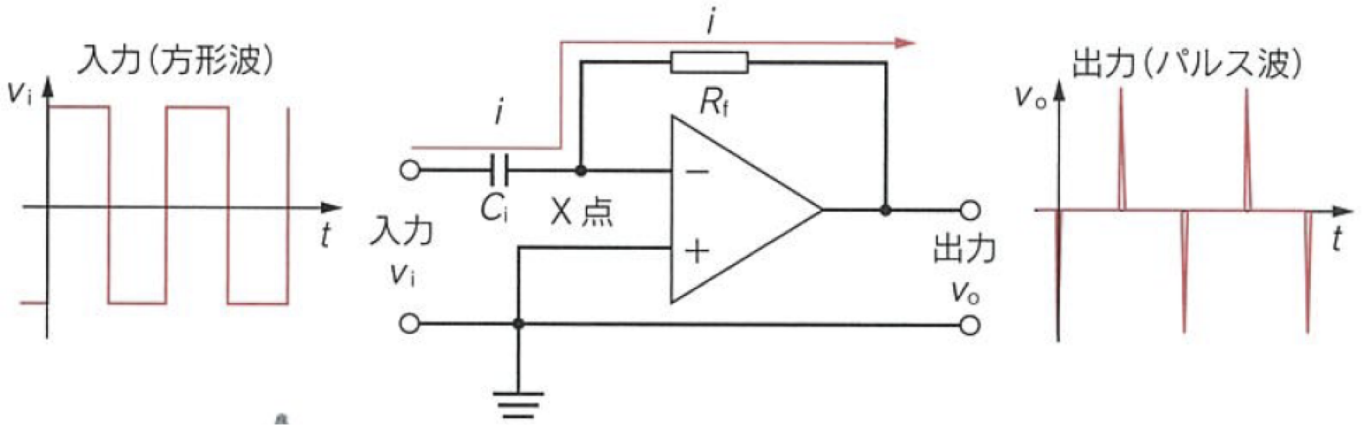


$$v_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) v_i$$

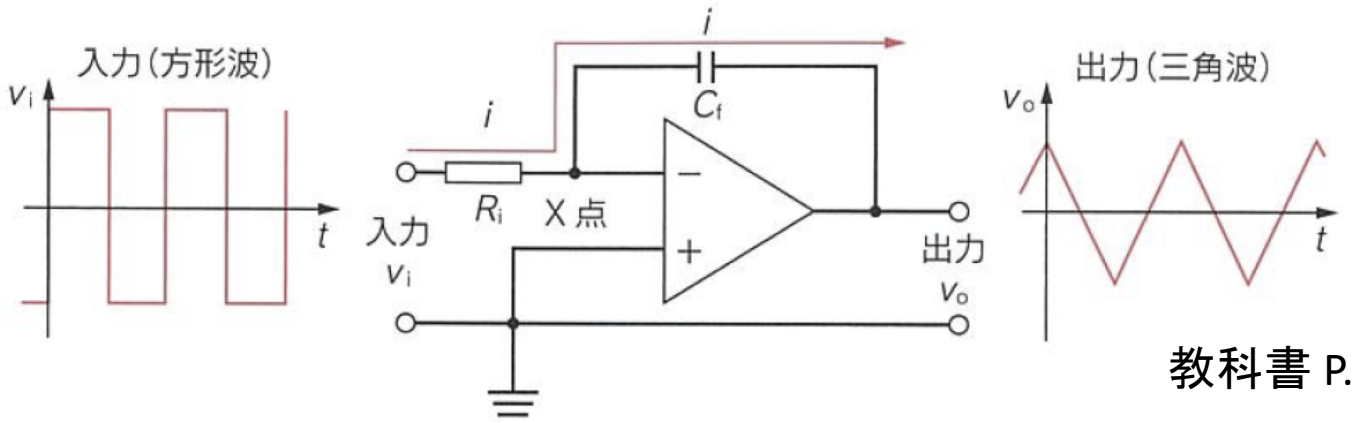
教科書 P.78

オペアンプによる演算回路

微分回路：　入力波形の微分を出力



積分回路：　入力信号の積分を出力



教科書 P. 79

オペアンプの応用回路

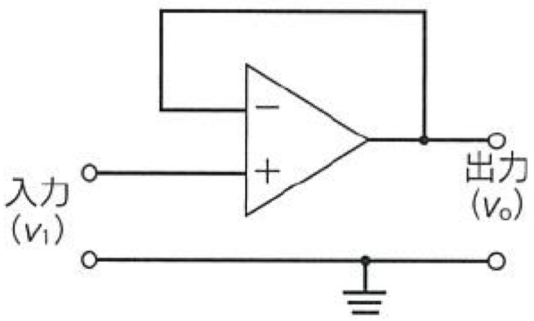
- ボルテージフォロワ

  入力信号と全く同じ波形を出力する（1倍の非反転増幅）。
- 加算回路

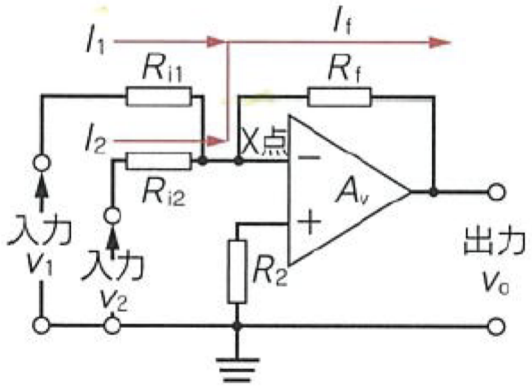
  入力波形の加算を出力する。
- 比較回路（コンパレータ）

  入力と基準電圧を比較する。

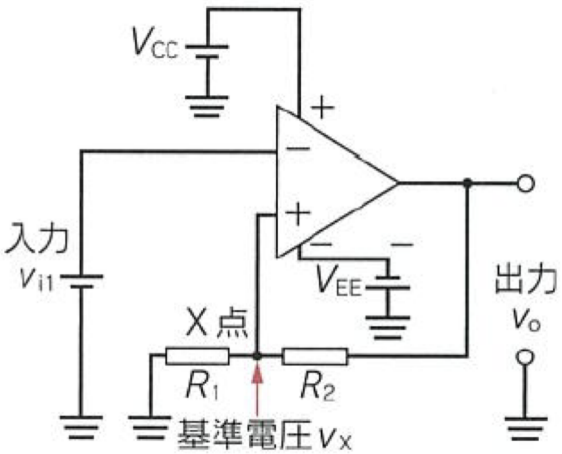
教科書 P. 79



a　ボルテージフォロワ

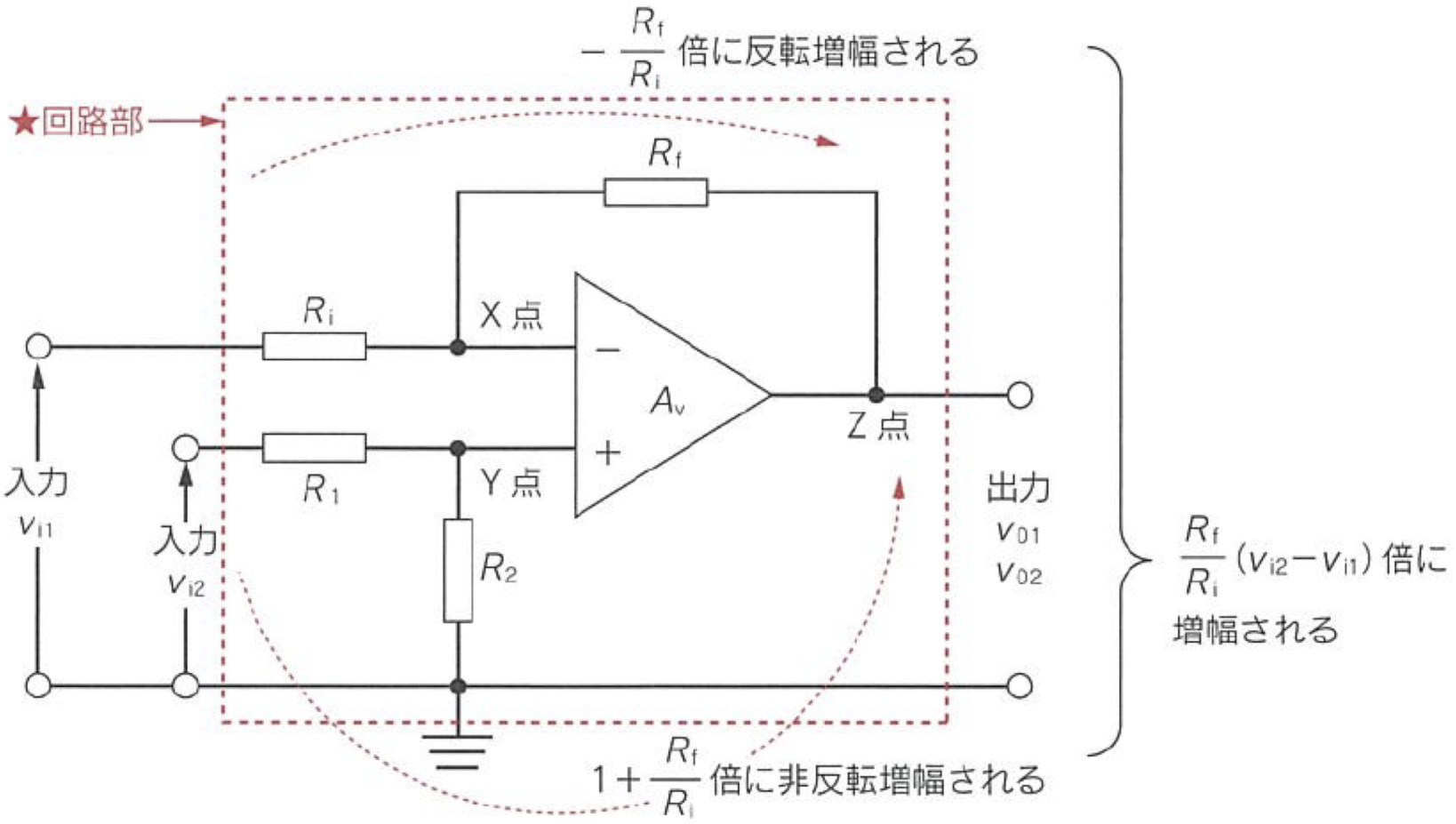


b　加算回路



c　比較回路
（非反転増幅型）

作動増幅回路の動作原理



教科書 P. 80

練習問題

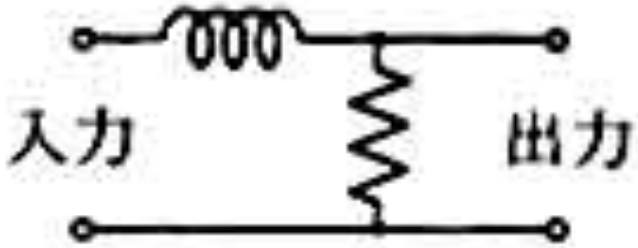
問 210☆ (既出問題)

60 dBと20 dBの増幅器を直列に接続したときの全利得はどれか。

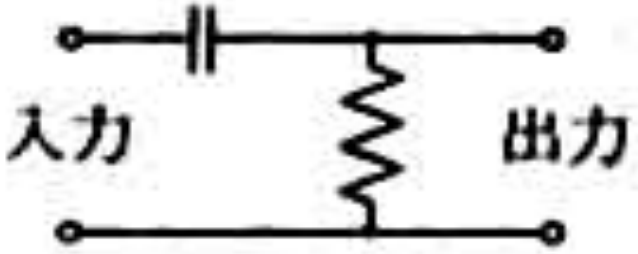
1. 40 dB
2. 60 dB
3. 80 dB
4. 120 dB
5. 1,200 dB

低域遮断フィルターとして働く回路はどれか。
2つ選べ。

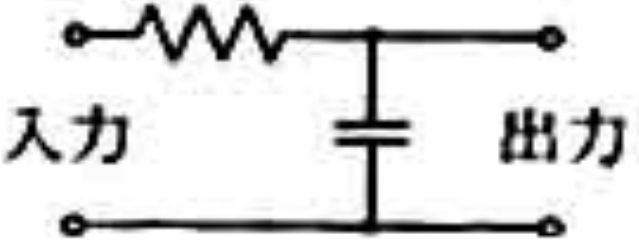
1.



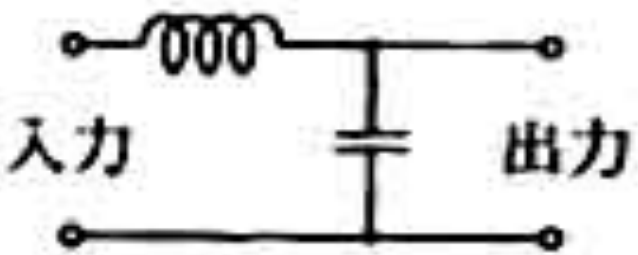
2.



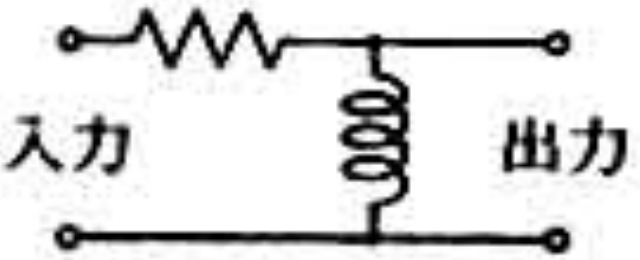
3.



4.



5.



問 102 ☆☆ (既出問題)

ダイオードについて正しいのはどれか。

a　ダイオードは一般に整流器，検流器に使用される。

b　トンネルダイオードには増幅作用がある。

c　シリコンやガラスは半導体である。

d　発光ダイオードは光をあてると明るさに応じてダイオードを流れる電流が変化する。

e　定電圧ダイオードは安定化直流電源の基準電圧をつくる時に利用される。

1. a，b，c　　2. a，b，e

3. a，d，e　　4. b，c，d

5. c，d，e