

電験どうでしょう管理人  
*KWG presents*

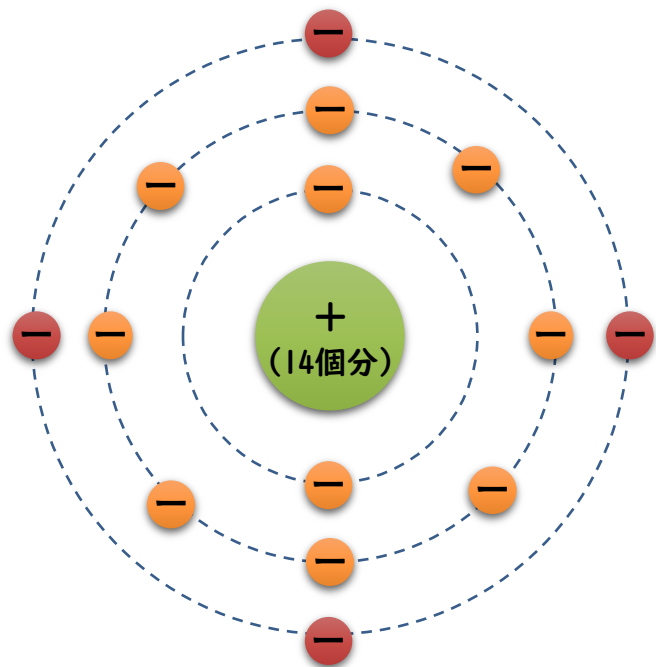
# 短期集中講座

## 第9回 半導体、電子回路

2023.07.16 Sun

# 半導体とは

- 最外殻に電子が4つある原子 (IV族の原子)
- 代表的な原子はSi (ケイ素、シリコン)
- 外部からのエネルギーにより最外殻の電子が外れたりくっついたりする



- + 原子核  
(電子と同じ数の陽子 (+の電荷) を持つ)
- 電子 (-の電荷を持つ)
- 最外殻電子  
(原子の電気的特性を決める)

最も普及

研究レベル  
複合回路用  
の土台

半導体 Si (ケイ素)、Ge (ゲルマニウム)  
SiC (炭化ケイ素)、GaAs (ガリウムヒ素)

電力用  
少し実用化

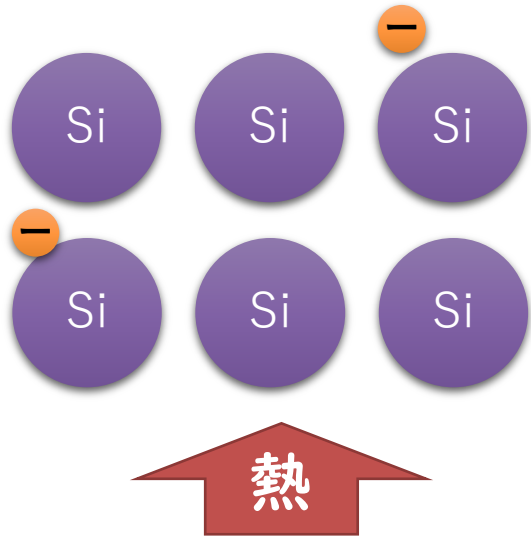
高周波用  
太陽電池

抵抗の大きさ: 導体の10000倍以上

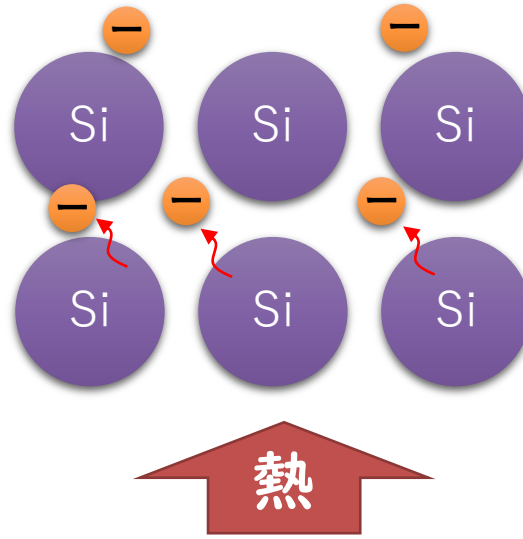
外部エネルギー  
で変化

# 半導体と熱

半導体に熱を加える

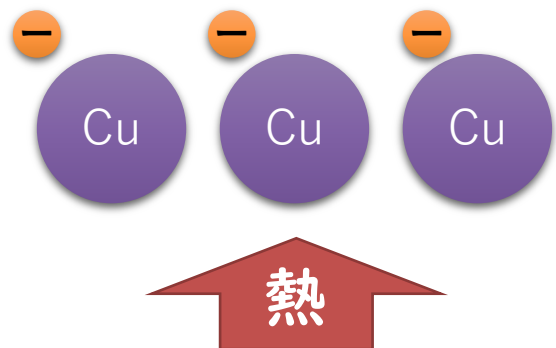


自由電子の数が増える

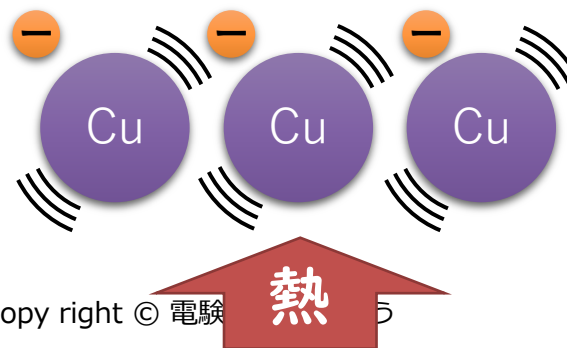


抵抗率が下がる  
(導電率が上がる)

金属に熱を加える



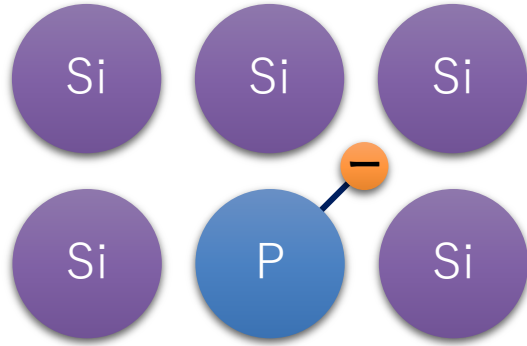
原子が振動する



電子の動きを阻害するため  
抵抗率が上がる  
(導電率が下がる)

# 半導体と不純物

半導体に**V族**の原子を混ぜる

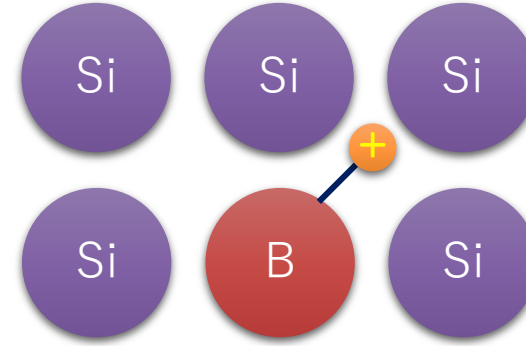


電子が余る → **自由電子**となる  
(-の電荷)

V族の原子 (**ドナー**)  
P (リン), As (ヒ素),  
Sb (アンチモン) など

**n形半導体**

半導体に**III族**の原子を混ぜる



電子が足りない (電子の穴) → **正孔**となる  
(+の電荷)

III族の原子 (**アクセプタ**)  
B (ホウ素), Al (アルミニウム),  
Ga (ガリウム) など

**p形半導体**

# p形半導体とn形半導体

	p型半導体	n型半導体
注入する不純物	<b>III族の元素 (アクセプタ)</b> ホウ素 (B) アルミニウム (Al) ガリウム (Ga) インジウム (In) など	<b>V族の元素 (ドナー)</b> リン (P) ヒ素 (As) アンチモン (Sb) など
多数キャリア	<b>正孔 (+の電荷)</b> <b>(電子の穴ができる)</b>	<b>自由電子 (-の電荷)</b> <b>(電子が余る)</b>

# 演習

## H25 問11

次の文章は、不純物半導体に関する記述である。

極めて高い純度に精製されたケイ素 (Si) の真性半導体に、微量のリン (P)、ヒ素 (As) などの ア 価の元素を不純物として加えたものを イ 形半導体といい、このとき加えた不純物を ウ という。

ただし、Si、P、Asの原子番号は、それぞれ14、15、33である。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	5	p	アクセプタ
(2)	3	n	ドナー
(3)	3	p	アクセプタ
(4)	5	n	アクセプタ
(5)	5	n	ドナー

## H18 問11

極めて高い純度に精製されたけい素 (Si) の真性半導体に、微量のほう素 (B) 又はインジウム (In) などの ア 価の元素を不純物として加えたものを イ 形半導体といい、このとき加えた不純物を ウ という。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる語句又は数値として、正しいものを組み合わせたのは次のうちどれか。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	5	n	ドナー
(2)	3	p	アクセプタ
(3)	3	n	ドナー
(4)	5	n	アクセプタ
(5)	3	p	ドナー

# 演習

## H25 問11

次の文章は、不純物半導体に関する記述である。

極めて高い純度に精製されたケイ素 (Si) の真性半導体に、微量のリン (P)、ヒ素 (As) などの [ア] 価の元素を不純物として加えたものを [イ] 形半導体といい、このとき加えた不純物を [ウ] という。

ただし、Si、P、Asの原子番号は、それぞれ14、15、33である。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	5	p	アクセプタ
(2)	3	n	ドナー
(3)	3	p	アクセプタ
(4)	5	n	アクセプタ
(5)	5	n	ドナー

## H18 問11

極めて高い純度に精製されたけい素 (Si) の真性半導体に、微量のほう素 (B) 又はインジウム (In) などの [ア] 価の元素を不純物として加えたものを [イ] 形半導体といい、このとき加えた不純物を [ウ] という。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる語句又は数値として、正しいものを組み合わせたのは次のうちどれか。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	5	n	ドナー
(2)	3	p	アクセプタ
(3)	3	n	ドナー
(4)	5	n	アクセプタ
(5)	3	p	ドナー

# 演習

## H28 問11

半導体に関する記述として、誤っているものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 極めて高い純度に精製されたシリコン (Si) の真性半導体に、価電子の数が3個の原子、例えばホウ素 (B) を加えると p 形半導体になる。
- (2) 真性半導体に外部から熱を与えると、その抵抗率は温度の上昇とともに増加する。
- (3) n 形半導体のキャリアは正孔より自由電子の方が多い。
- (4) 不純物半導体の導電率は金属よりも小さいが、真性半導体よりも大きい。
- (5) 真性半導体に外部から熱や光などのエネルギーを加えると電流が流れ、その向きは正孔の移動する向きと同じである。

## H21 問11

半導体に関する記述として、誤っているのは次のうちどれか。

- (1) シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) の真性半導体においては、キャリアの電子と正孔の数は同じである。
- (2) 真性半導体に微量のⅢ族又はⅤ族の元素を不純物として加えた半導体を不純物半導体といい、電気伝導度が真性半導体に比べて大きくなる。
- (3) シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) の真性半導体にⅤ族の元素を不純物として微量だけ加えたものを p 形半導体という。
- (4) n 形半導体の少数キャリアは正孔である。
- (5) 半導体の電気伝導度は温度が下がると小さくなる。



# 演習

## H28 問11

半導体に関する記述として、誤っているものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

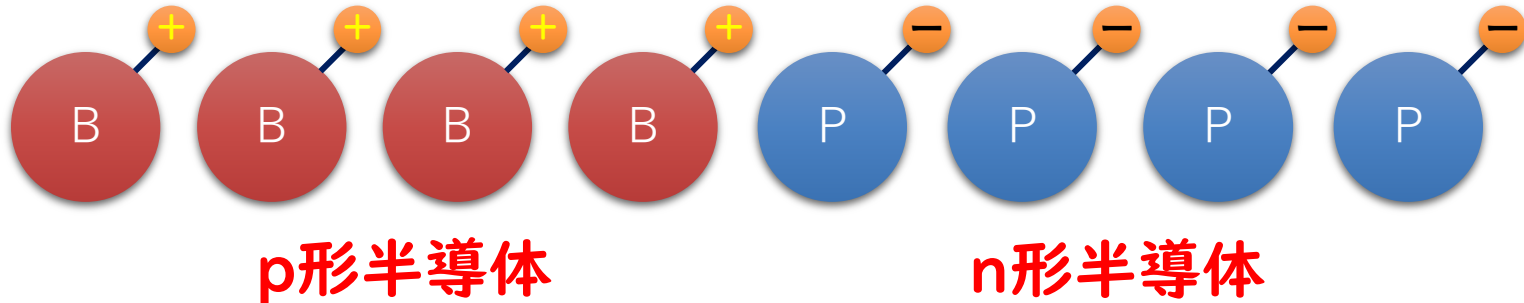
- (1) 極めて高い純度に精製されたシリコン (Si) の真性半導体に、価電子の数が3個の原子、例えばホウ素 (B) を加えると p 形半導体になる。
- (2) 真性半導体に外部から熱を与えると、その抵抗率は温度の上昇とともに増加する。
- (3) n 形半導体のキャリアは正孔より自由電子の方が多い。
- (4) 不純物半導体の導電率は金属よりも小さいが、真性半導体よりも大きい。
- (5) 真性半導体に外部から熱や光などのエネルギーを加えると電流が流れ、その向きは正孔の移動する向きと同じである。

## H21 問11

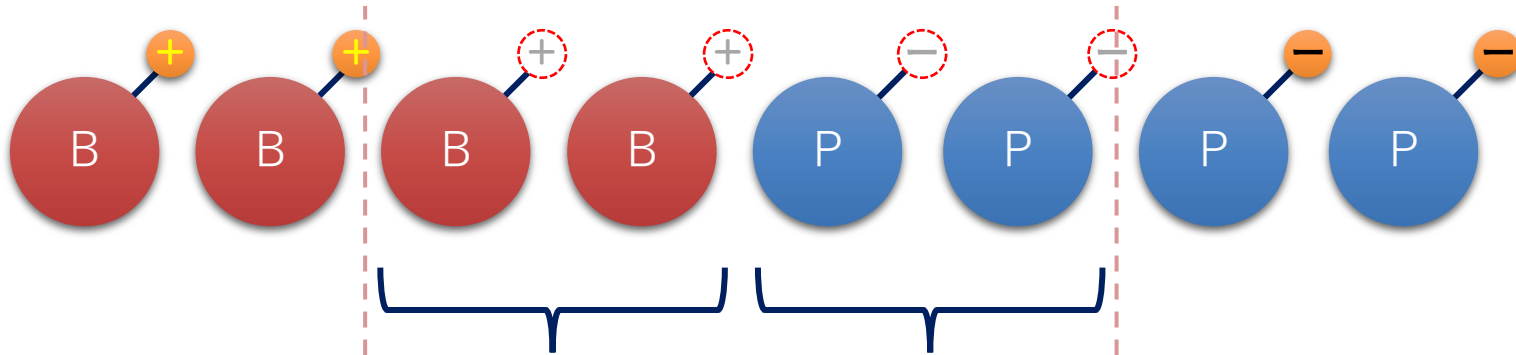
半導体に関する記述として、誤っているのは次のうちどれか。

- (1) シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) の真性半導体においては、キャリアの電子と正孔の数は同じである。
- (2) 真性半導体に微量のⅢ族又はⅤ族の元素を不純物として加えた半導体を不純物半導体といい、電気伝導度が真性半導体に比べて大きくなる。
- (3) シリコン (Si) やゲルマニウム (Ge) の真性半導体にⅤ族の元素を不純物として微量だけ加えたものを p 形半導体という。
- (4) n 形半導体の少数キャリアは正孔である。
- (5) 半導体の電気伝導度は温度が下がると小さくなる。

# pn接合

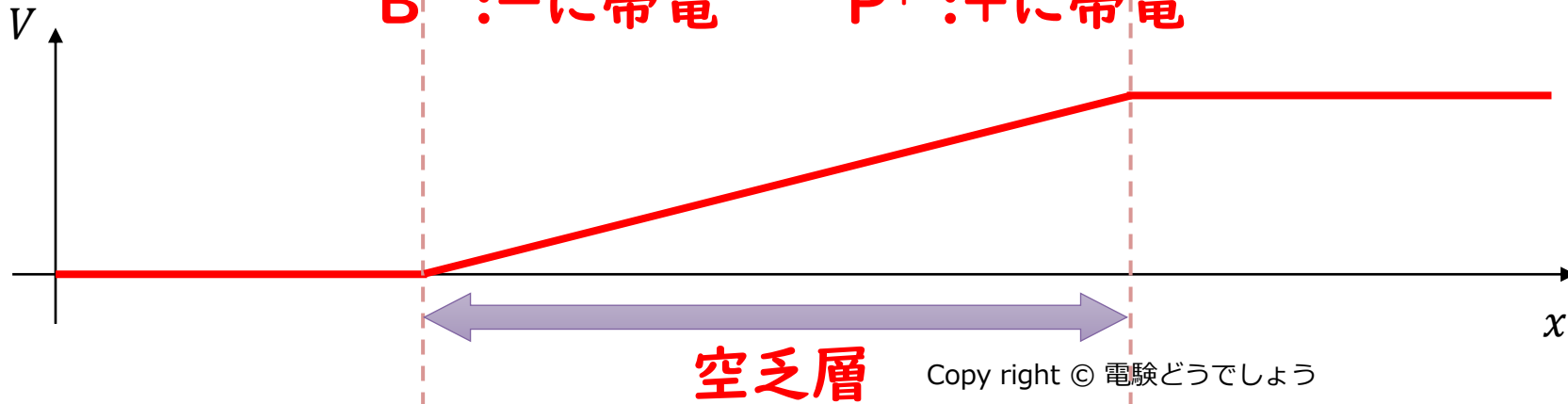


p半導体とn形半導体をくっつける



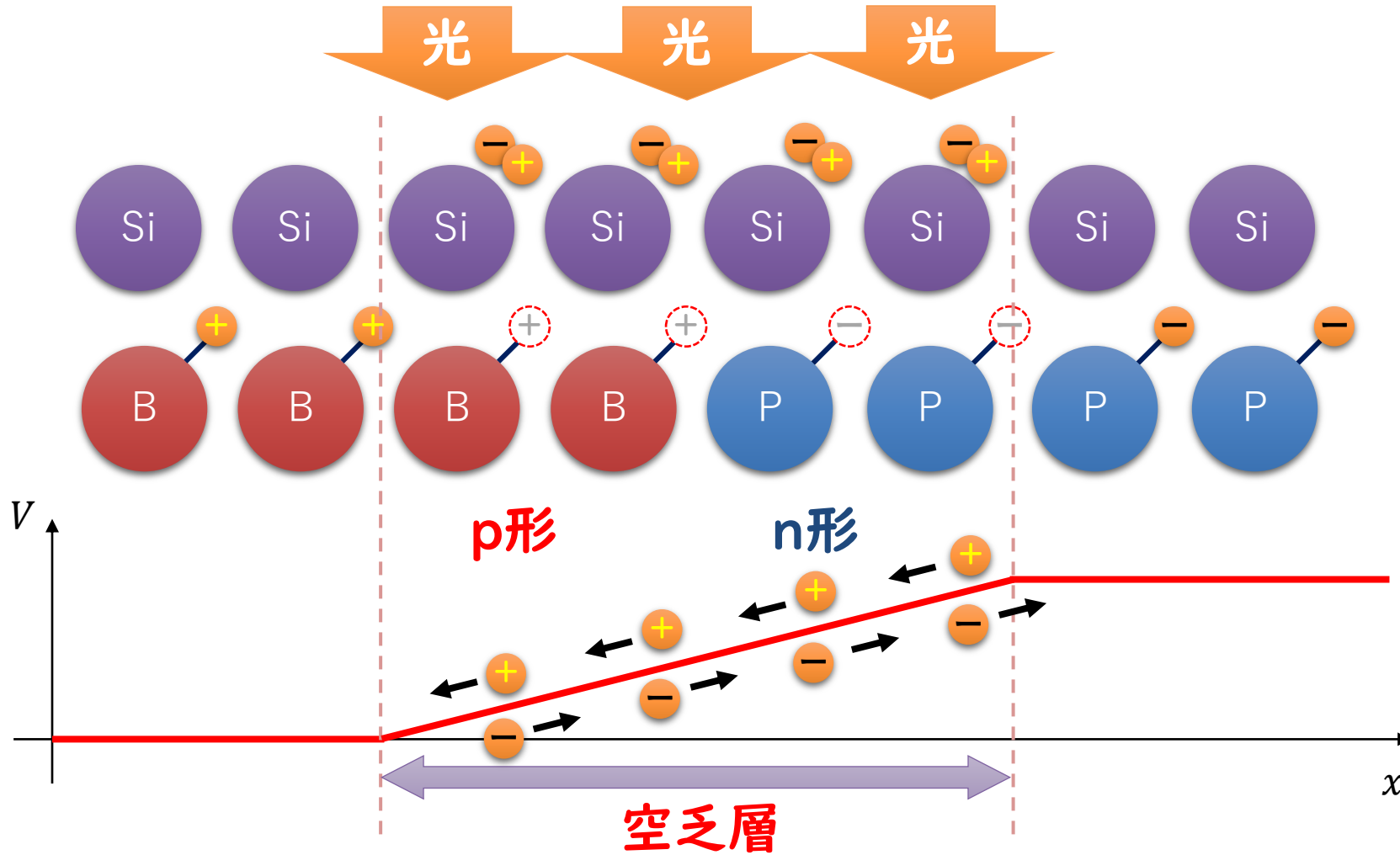
接合面の自由電子と正孔が結合してなくなる

$B^-$  :-に帯電                       $P^+$  :+に帯電



接合面に**電位差**ができる  
この部分を**空乏層**という

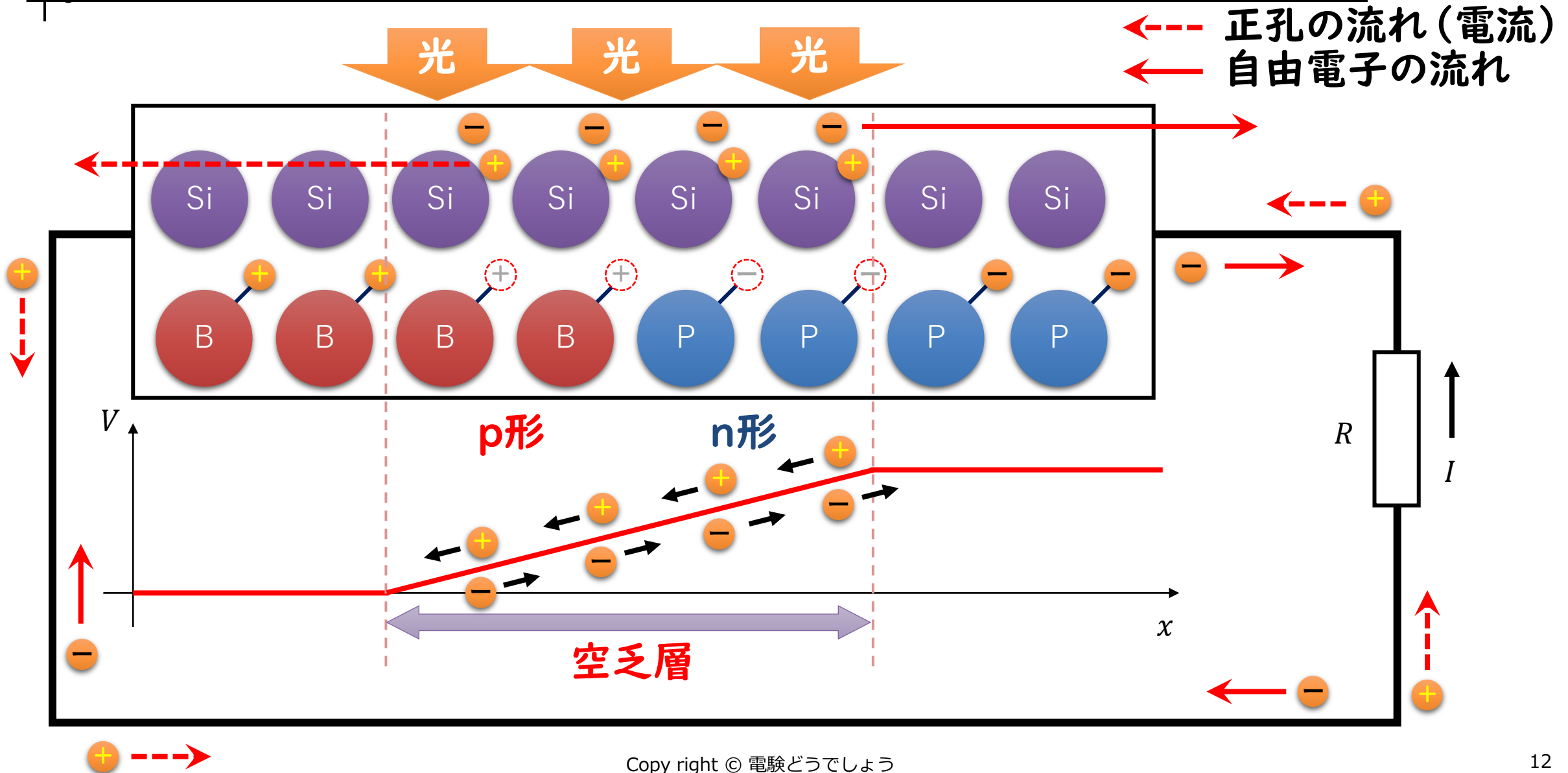
# pn接合の応用（太陽電池）



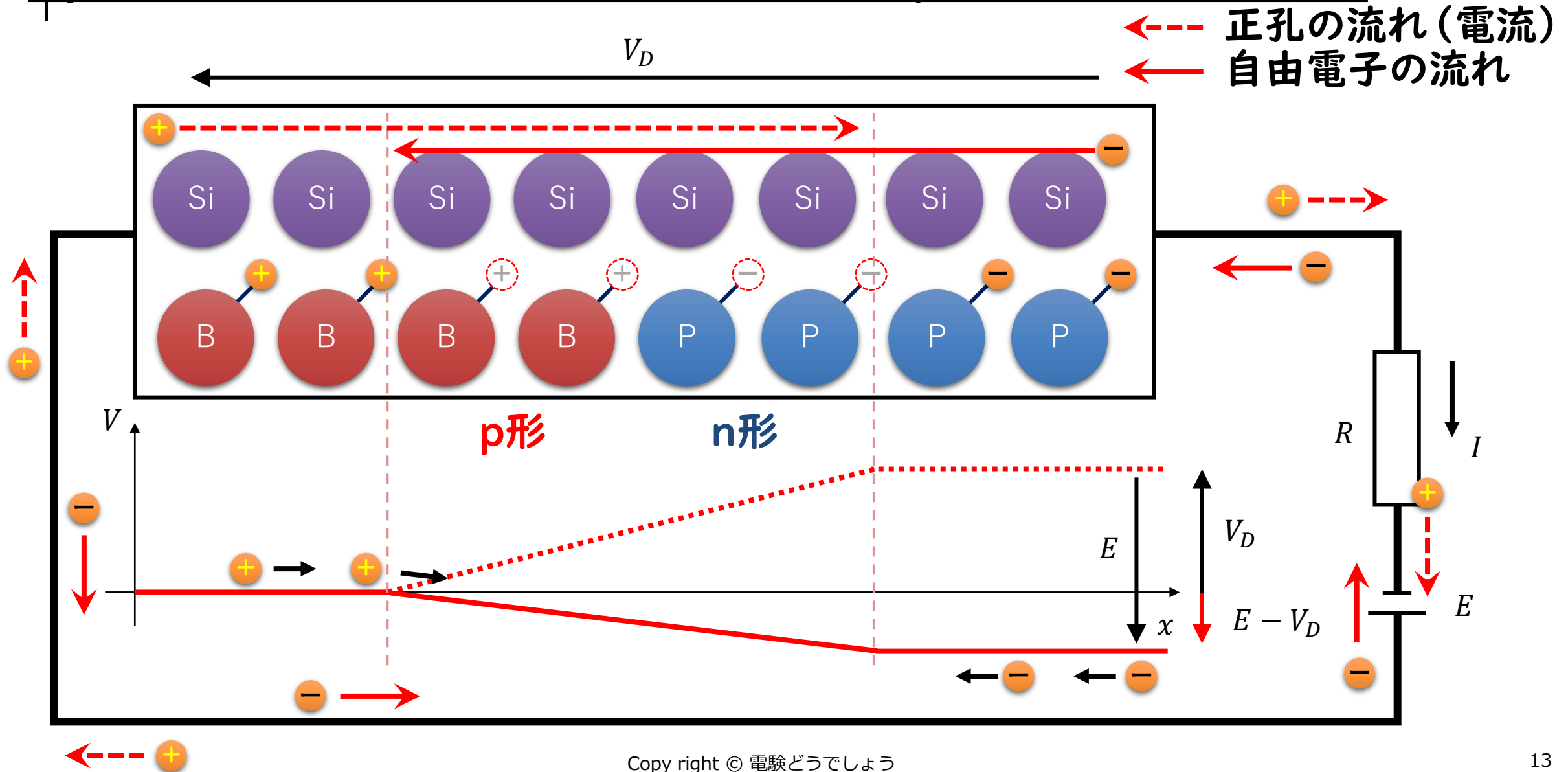
接合面に光をあてると、  
Siから自由電子と正孔  
が発生する

空乏層の電位差により  
自由電子と正孔はそれぞれ  
決まった方向に動こうとする

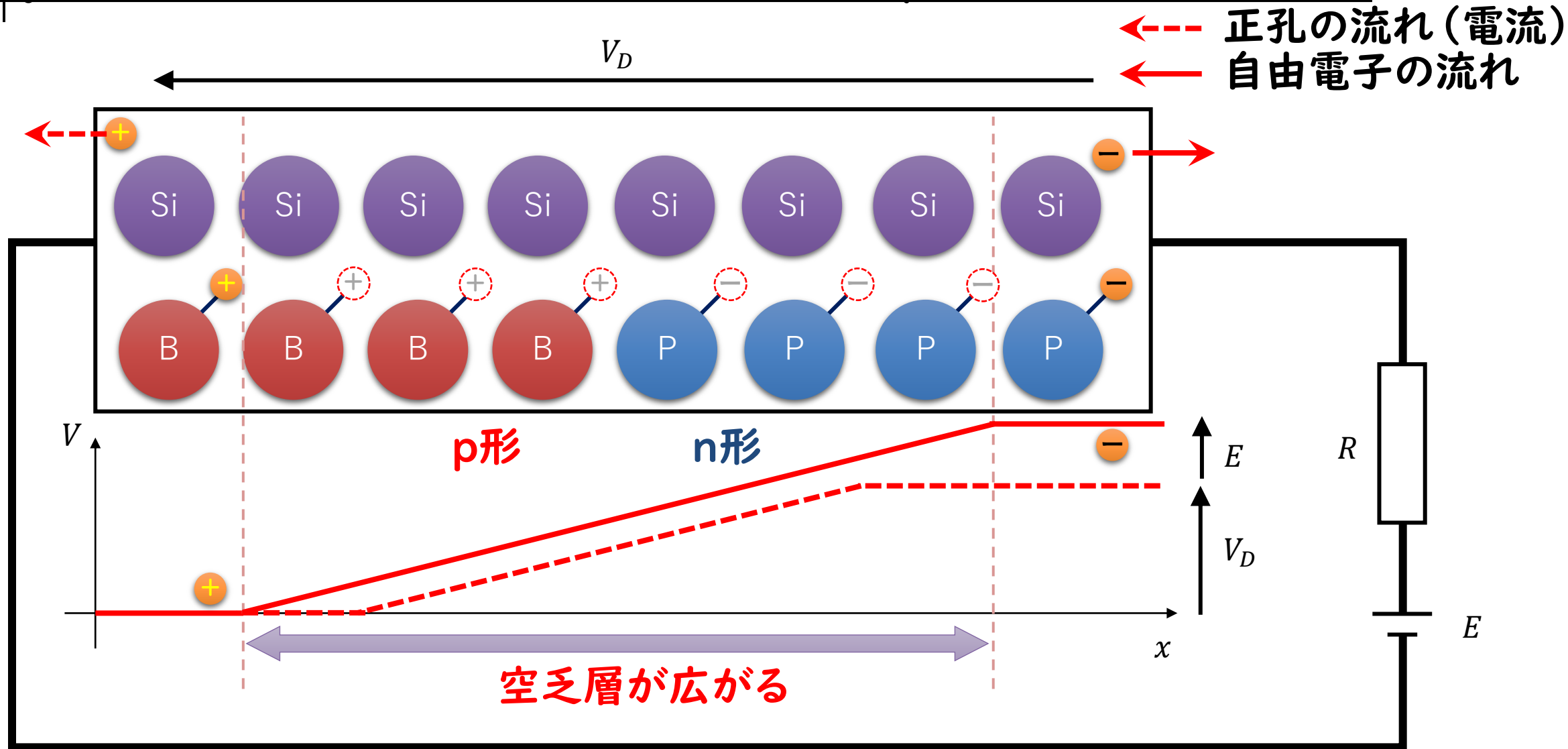
# pn接合の応用（太陽電池）



# pn接合の応用 (ダイオード/整流作用)



# pn接合の応用 (ダイオード/整流作用)



# 演習

## R01 問11

太陽光のエネルギーを電気エネルギーに直接変換するものとして、半導体を用いた太陽電池がある。p 形半導体と n 形半導体による pn 接合を用いているため、構造としては [ア] と同じである。太陽電池に太陽光を照射すると、半導体の中で負の電気をもつ電子と正の電気をもつ [イ] が対になって生成され、電子は n 形半導体の側に、[イ] は p 形半導体の側に、それぞれ引き寄せられる。その結果、p 形半導体に付けられた電極がプラス極、n 形半導体に付けられた電極がマイナス極となるように起電力が生じる。両電極間に負荷抵抗を接続すると太陽電池から取り出された電力が負荷抵抗で消費される。その結果、負荷抵抗を接続する前に比べて太陽電池の温度は [ウ] 。

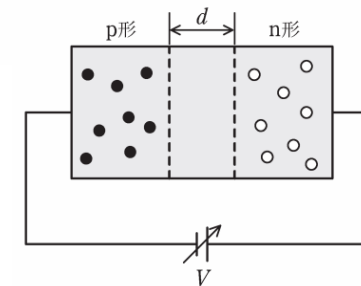
上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	ダイオード	正孔	低くなる
(2)	ダイオード	正孔	高くなる
(3)	トランジスタ	陽イオン	低くなる
(4)	トランジスタ	正孔	高くなる
(5)	トランジスタ	陽イオン	高くなる

## R02 問11

可変容量ダイオードとは、図に示す原理図のように [ア] 電圧  $V$  [V] を加えると静電容量が変化するダイオードである。p 形半導体と n 形半導体を接合すると、p 形半導体のキャリア(図中の●印)と n 形半導体のキャリア(図中の○印)が pn 接合面付近で拡散し、互いに結合すると消滅して [イ] と呼ばれるキャリアがほとんど存在しない領域が生じる。可変容量ダイオードに [ア] 電圧を印加し、その大きさを大きくすると、[イ] の領域の幅  $d$  が [ウ] なり、静電容量の値は [エ] なる。この特性を利用して可変容量ダイオードは [オ] などに用いられている。

上記の記述中の空白箇所(ア)～(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	逆方向	空乏層	広く	小さく	無線通信の同調回路
(2)	順方向	空乏層	狭く	小さく	光通信の受光回路
(3)	逆方向	空乏層	広く	大きく	光通信の受光回路
(4)	順方向	反転層	狭く	大きく	無線通信の変調回路
(5)	逆方向	反転層	広く	小さく	無線通信の同調回路

# 演習

## R01 問11

太陽光のエネルギーを電気エネルギーに直接変換するものとして、半導体を用いた太陽電池がある。p 形半導体と n 形半導体による pn 接合を用いているため、構造としては (ア) と同じである。太陽電池に太陽光を照射すると、半導体の中で負の電気をもつ電子と正の電気をもつ (イ) が対になって生成され、電子は n 形半導体の側に、(イ) は p 形半導体の側に、それぞれ引き寄せられる。その結果、p 形半導体に付けられた電極がプラス極、n 形半導体に付けられた電極がマイナス極となるように起電力が生じる。両電極間に負荷抵抗を接続すると太陽電池から取り出された電力が負荷抵抗で消費される。その結果、負荷抵抗を接続する前に比べて太陽電池の温度は (ウ)。

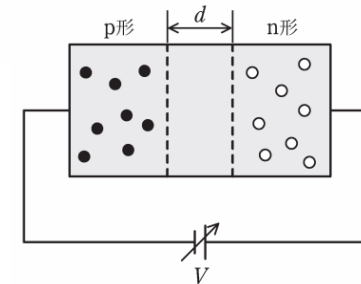
上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	ダイオード	正孔	低くなる
(2)	ダイオード	正孔	高くなる
(3)	トランジスタ	陽イオン	低くなる
(4)	トランジスタ	正孔	高くなる
(5)	トランジスタ	陽イオン	高くなる

## R02 問11

可変容量ダイオードとは、図に示す原理図のように (ア) 電圧  $V$  [V] を加えると静電容量が変化するダイオードである。p 形半導体と n 形半導体を接合すると、p 形半導体のキャリア(図中の●印)と n 形半導体のキャリア(図中の○印)が pn 接合面付近で拡散し、互いに結合すると消滅して (イ) と呼ばれるキャリアがほとんど存在しない領域が生じる。可変容量ダイオードに (ア) 電圧を印加し、その大きさを大きくすると、(イ) の領域の幅  $d$  が (ウ) なり、静電容量の値は (エ) なる。この特性を利用して可変容量ダイオードは (オ) などに用いられている。

上記の記述中の空白箇所(ア)～(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

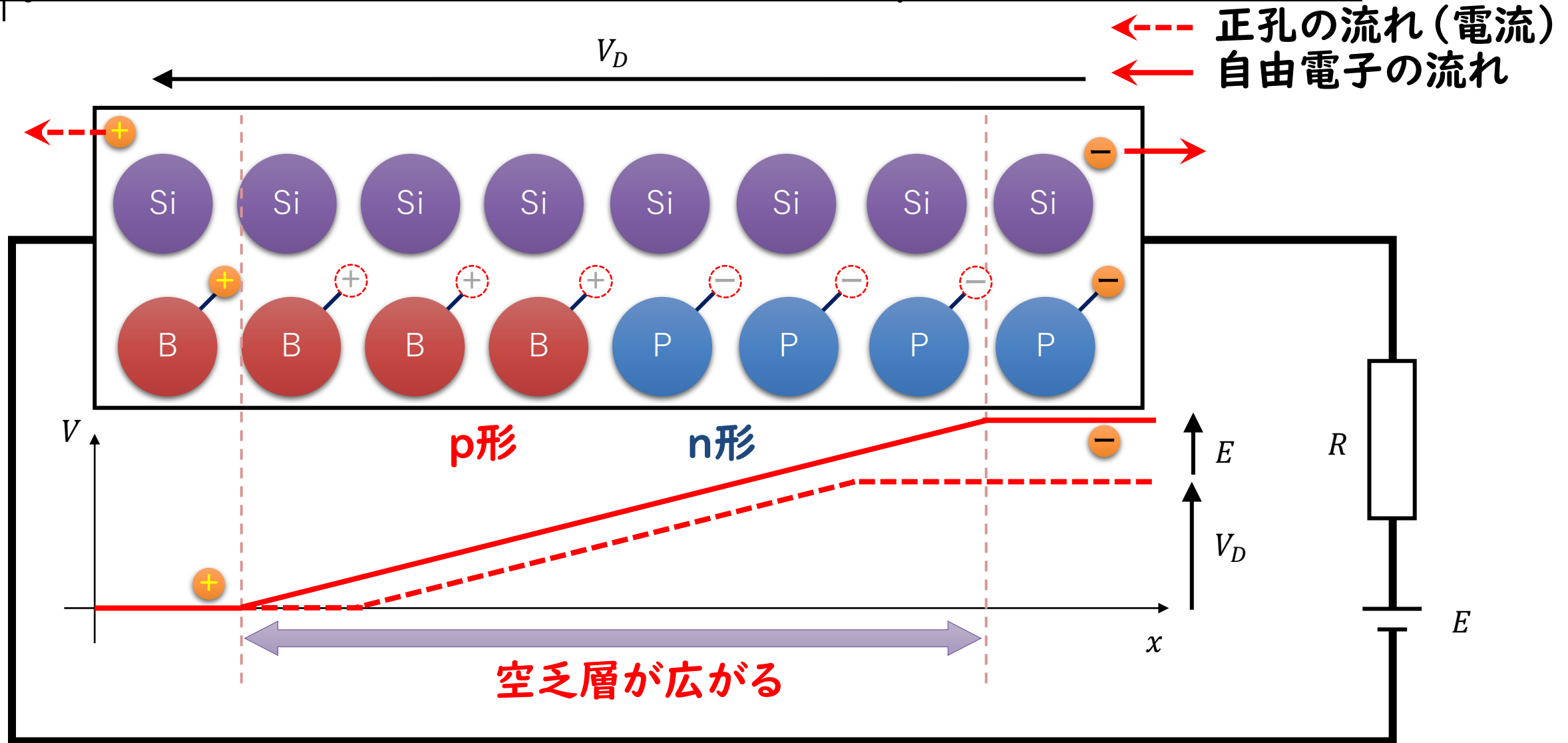


$$C = \epsilon \frac{S}{d}$$

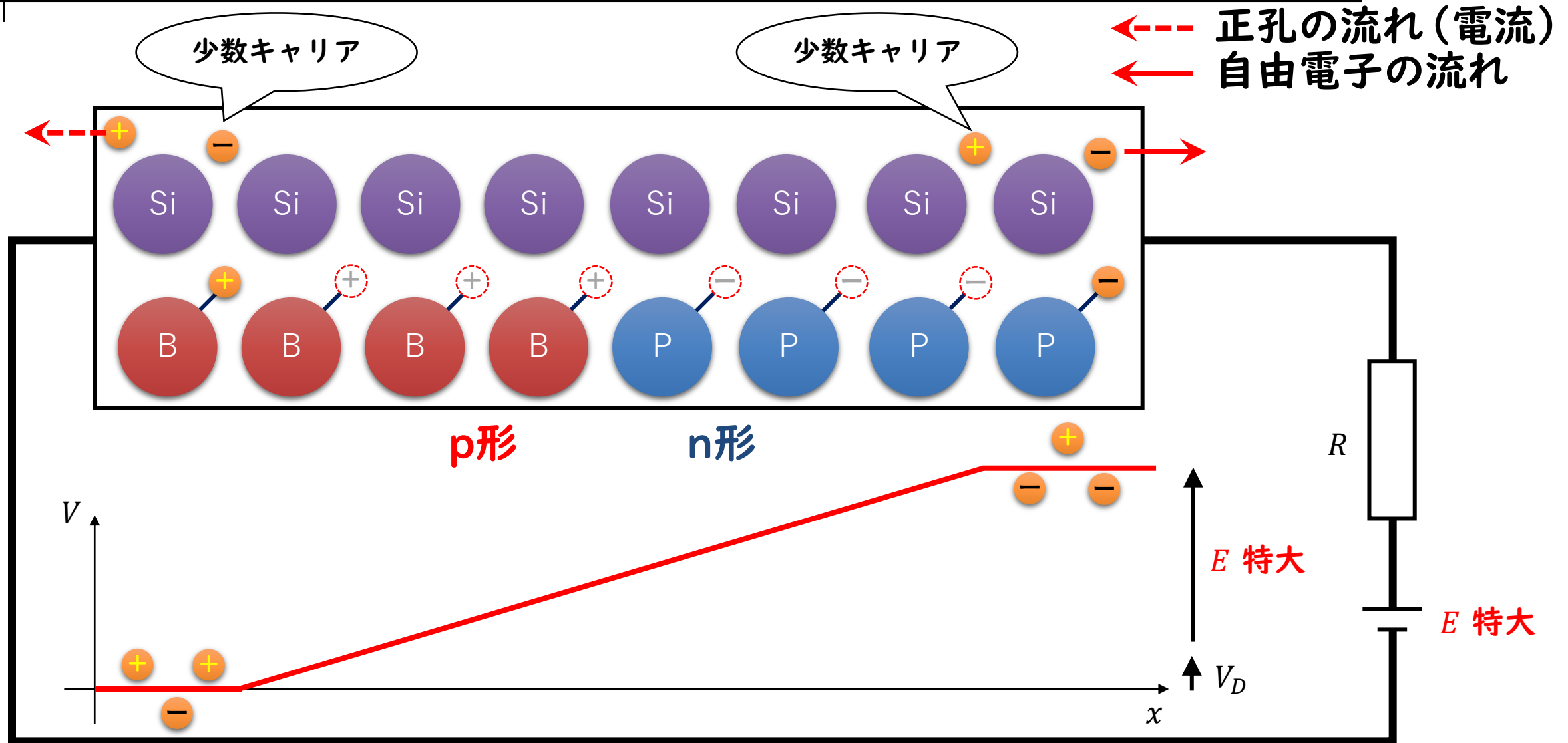
	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	逆方向	空乏層	広く	小さく	無線通信の同調回路
(2)	順方向	空乏層	狭く	小さく	光通信の受光回路
(3)	逆方向	空乏層	広く	大きく	光通信の受光回路
(4)	順方向	反転層	狭く	大きく	無線通信の変調回路
(5)	逆方向	反転層	広く	小さく	無線通信の同調回路



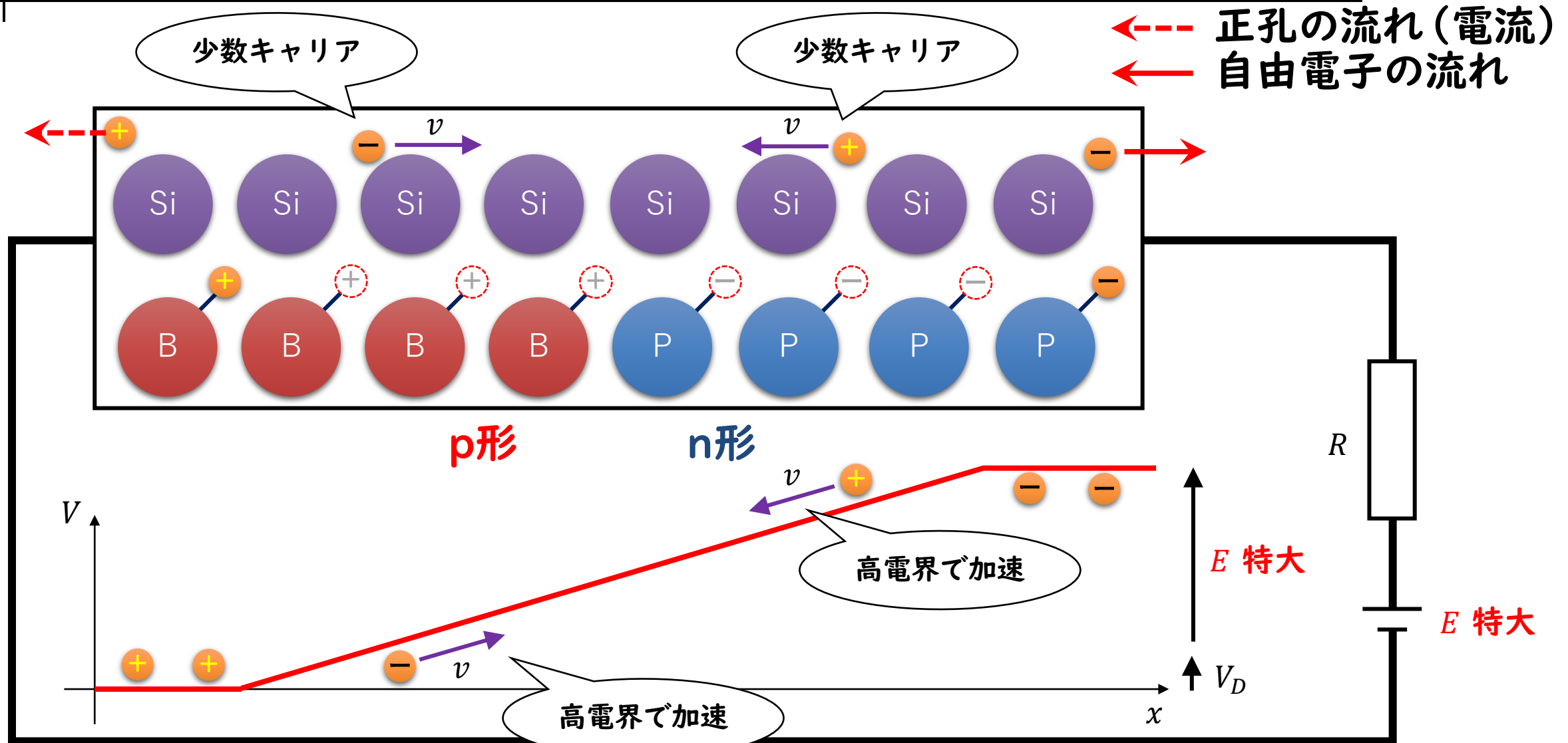
# pn接合の応用 (ダイオード/整流作用)



# 降伏現象

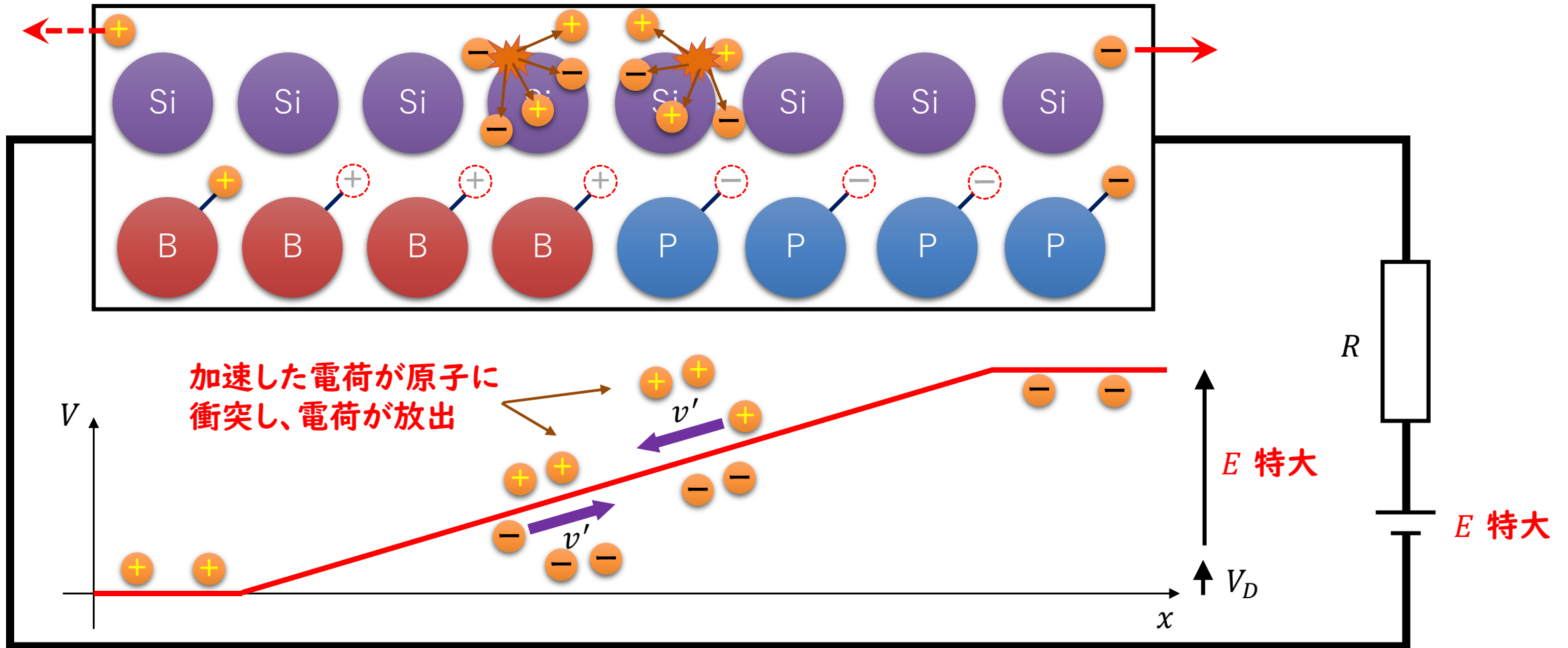


# 降伏現象



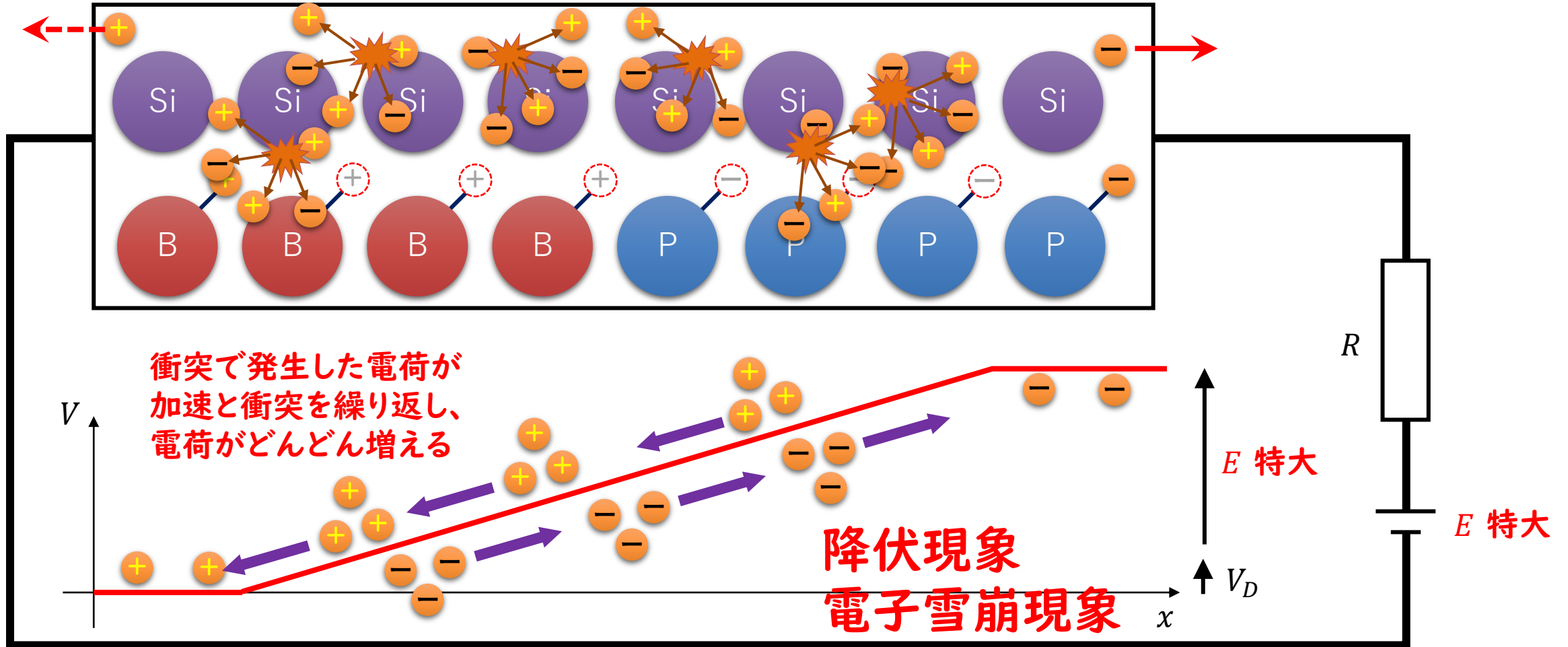
# 降伏現象

←-- 正孔の流れ (電流)  
← 自由電子の流れ



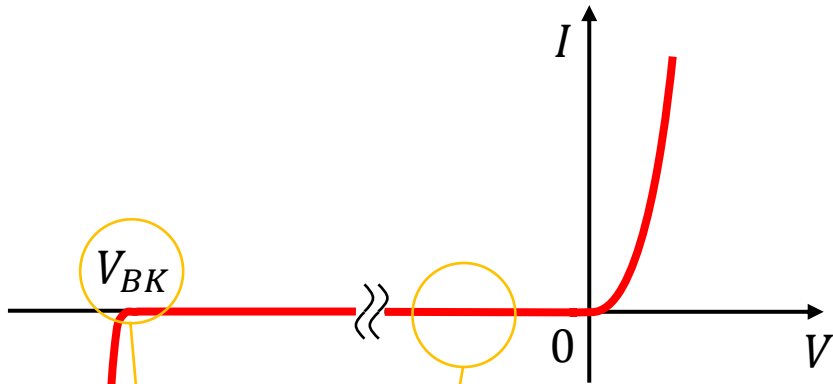
# 降伏現象

←-- 正孔の流れ (電流)  
← 自由電子の流れ



# 降伏現象とその応用

逆方向のI-V特性



拡大すると



マイナス方向に少し電流が流れている → “暗電流”

ある電圧で一気に電流が流れる!  
このときの電圧 → 降伏電圧

ツェナー現象、アバランシェ現象 (電子雪崩現象)

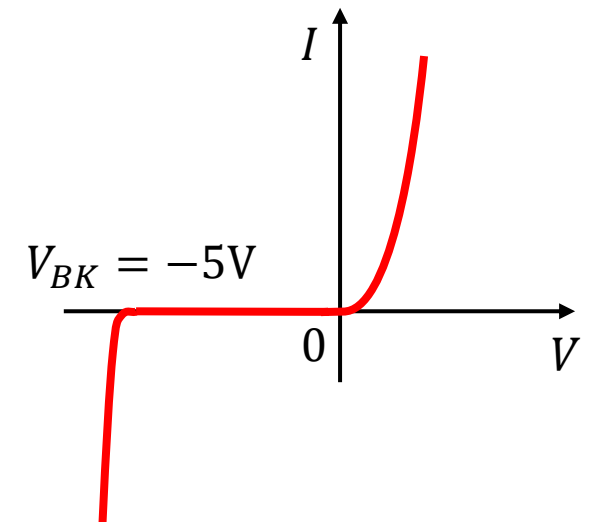
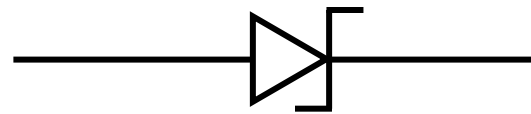
降伏電圧 → 通常 500Vくらい



不純物をうまく添加すると → 数Vくらい

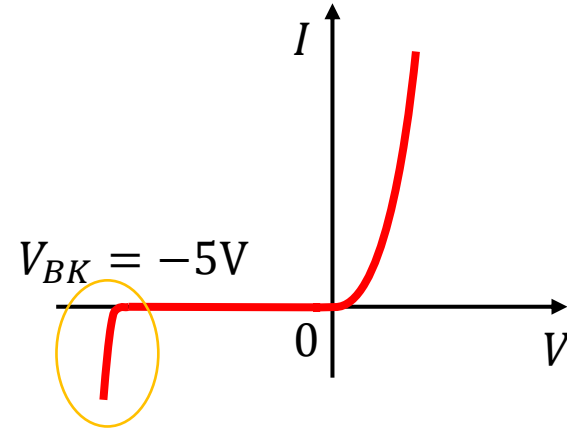
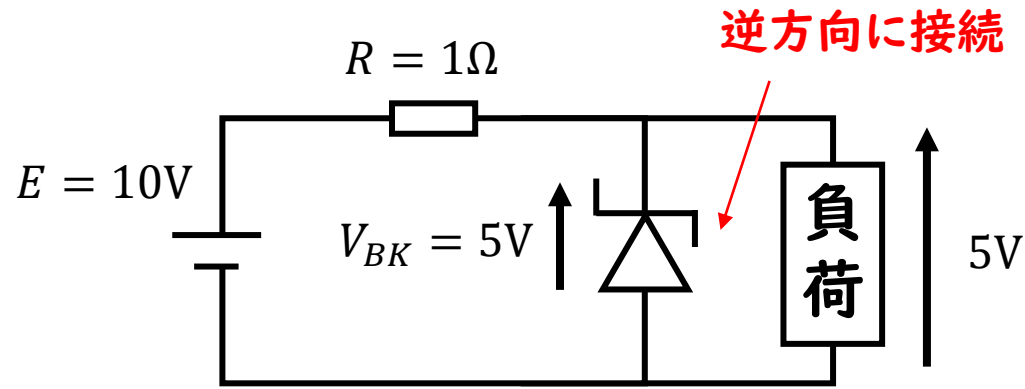


積極的に降伏現象を使う素子 “ツェナーダイオード”

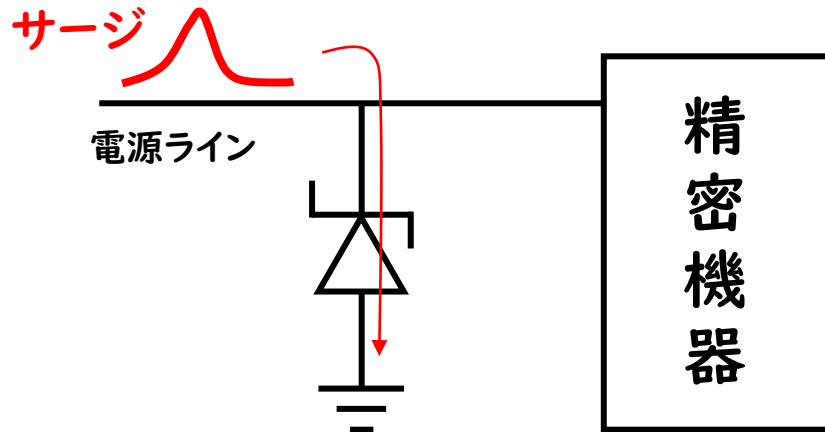


# ツェナーダイオードの使い方

## ① 定電圧回路



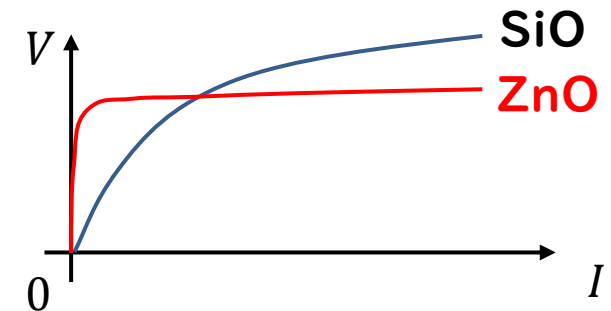
## ② サージ保護



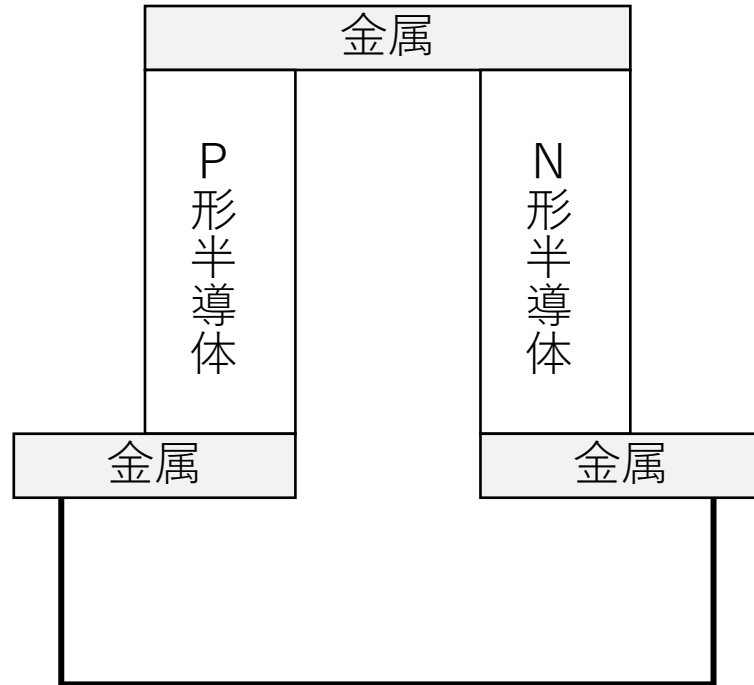
## 酸化亜鉛 (ZnO) 避雷器



変電所の  
保護装置



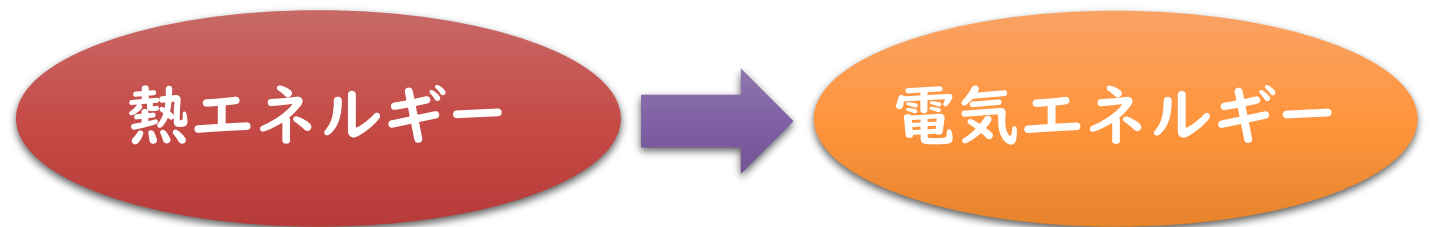
# ゼーベック効果



## ゼーベック効果

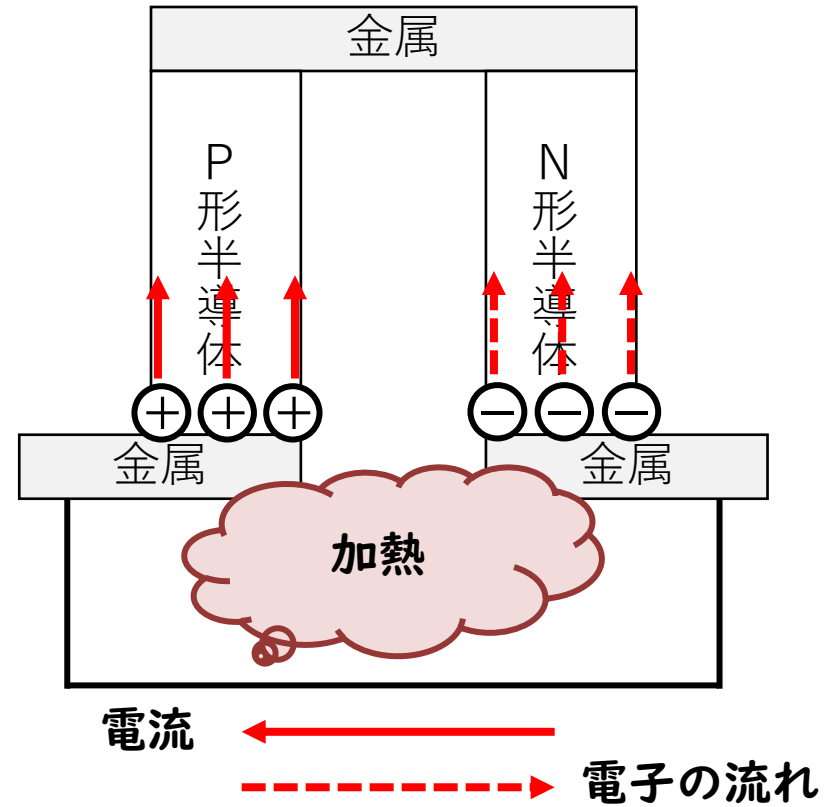
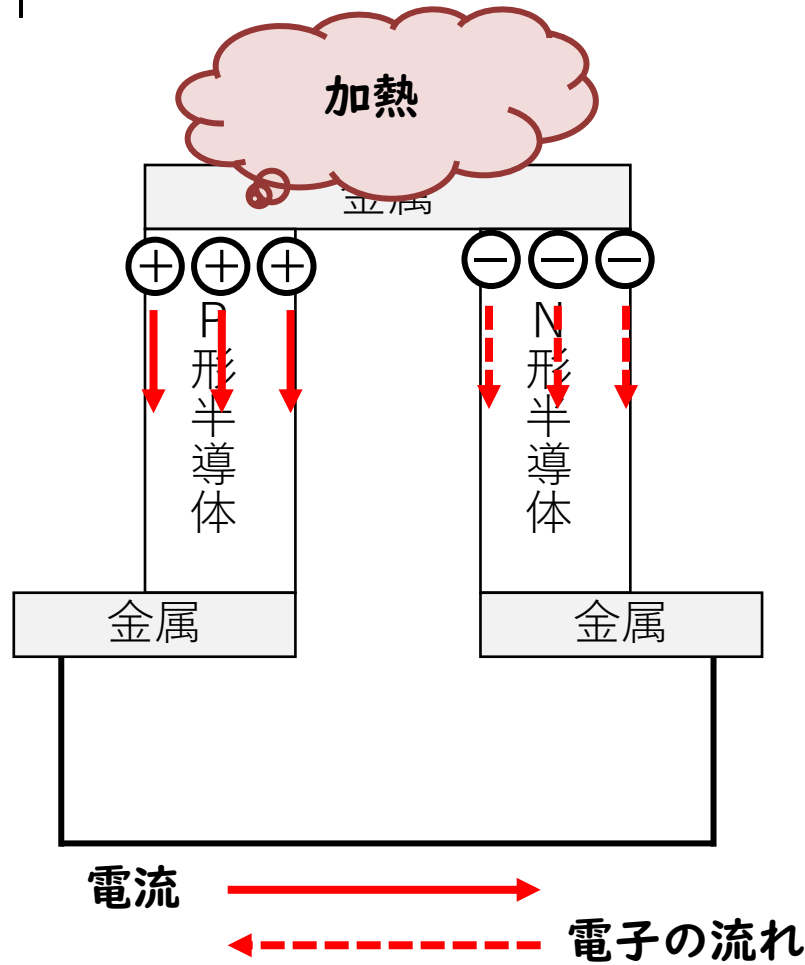
物体の温度差が電圧に直接変換される現象

半導体の場合、過熱するとその部分のキャリアが増加することから、高温部から低温部にキャリアが移動する。

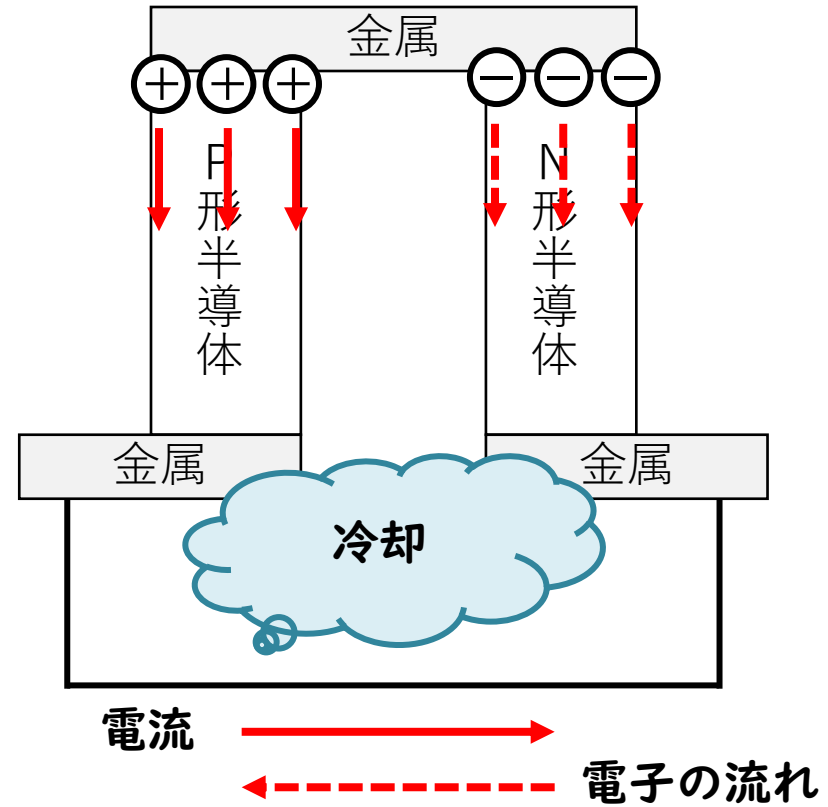
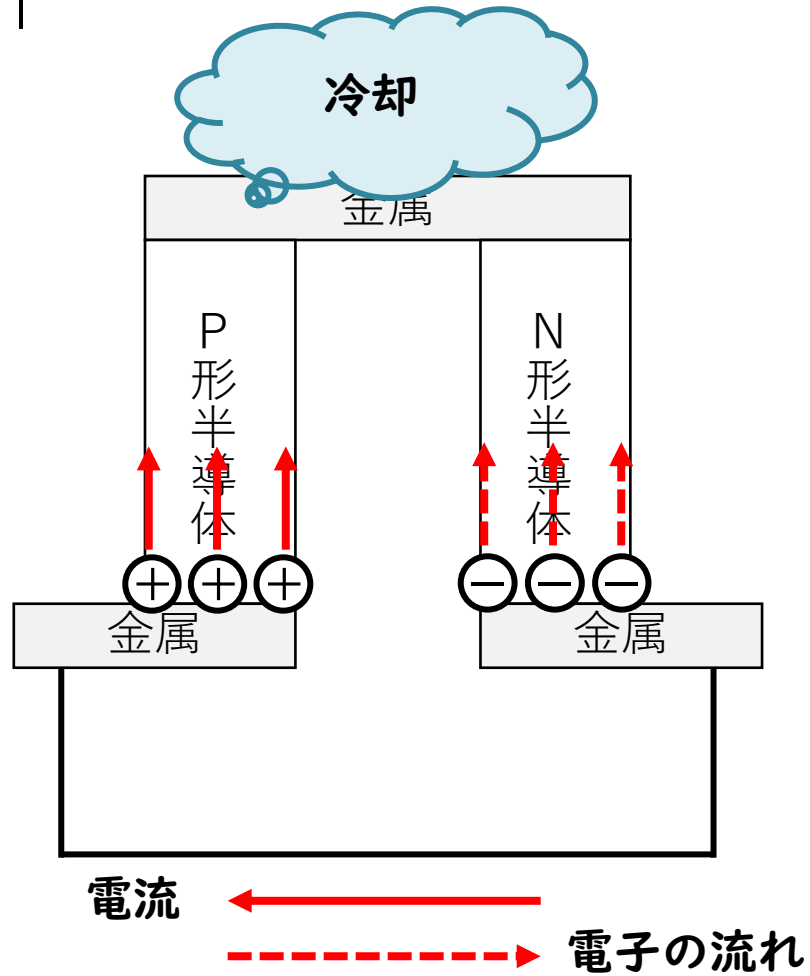




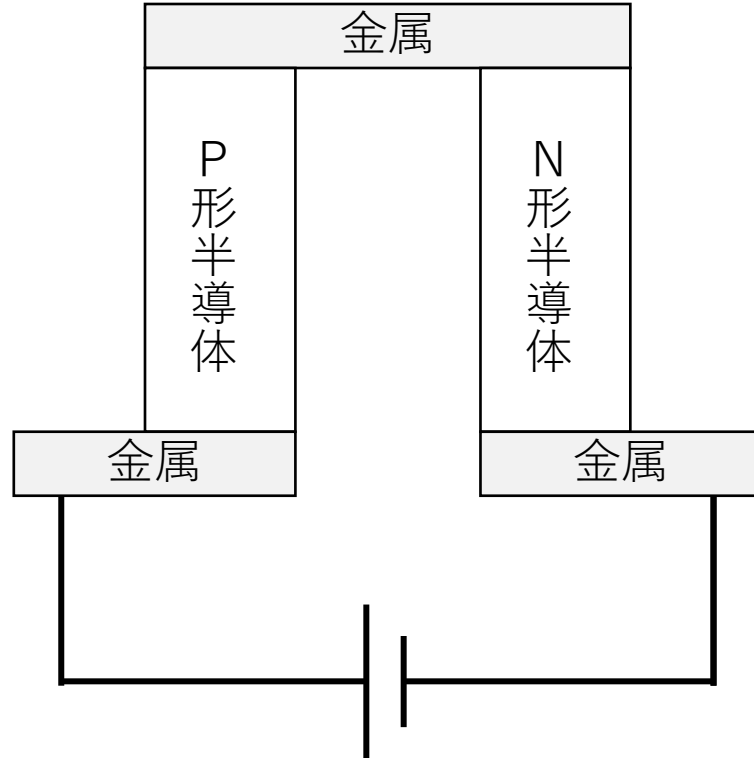
# ゼーベック効果



# ゼーベック効果



# ペルチェ効果



## ペルチェ効果

異なる金属（半導体）を接合し電圧をかけ、電流を流すと、接合点で熱の吸収・放出が起こる効果

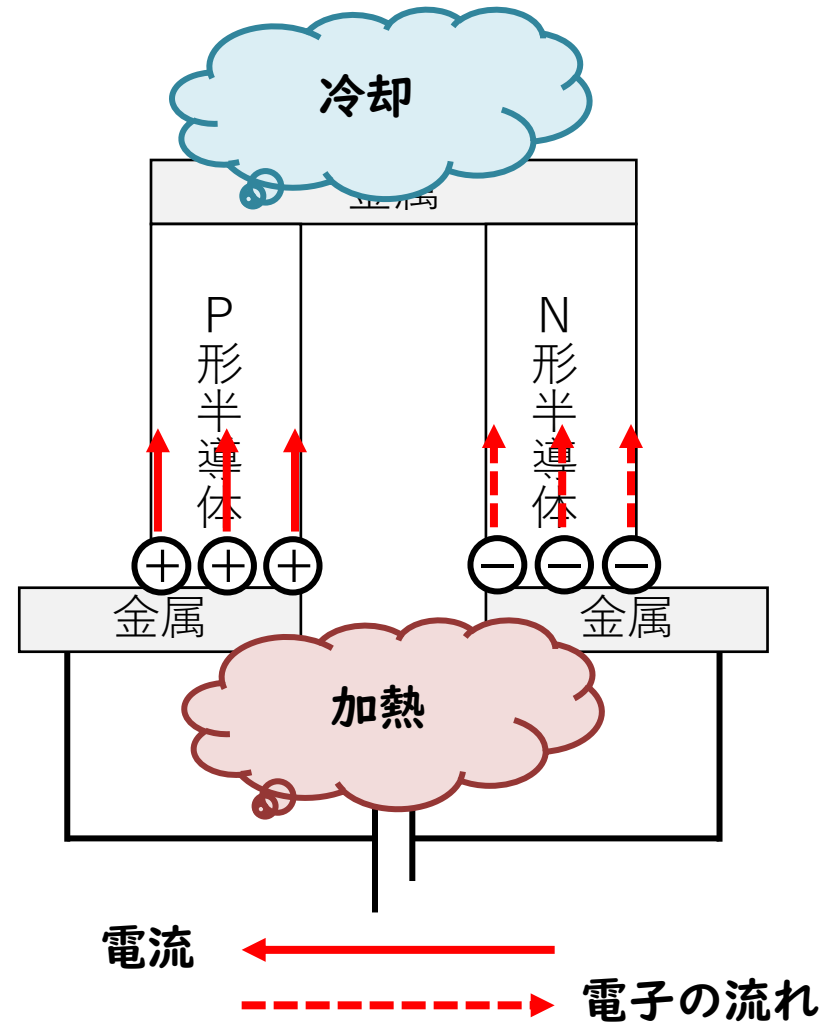
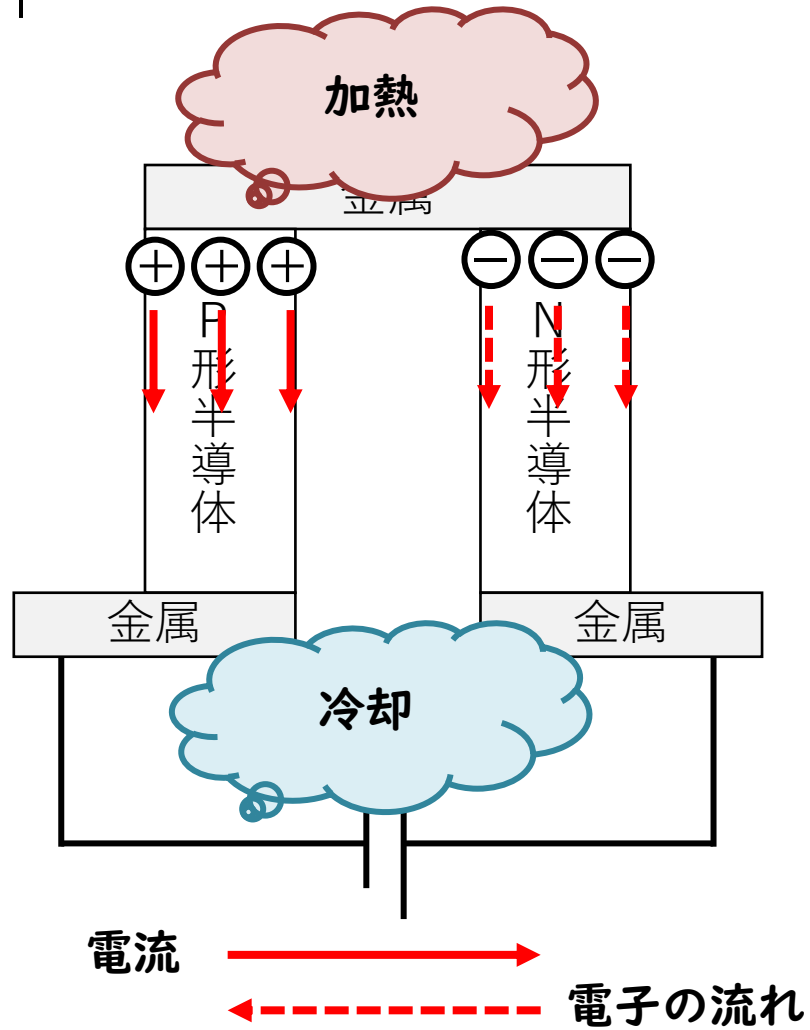
半導体の場合、電流が流れるとキャリア密度が変わり温度勾配が発生し、この温度変化には外部からの熱を利用される。

電気エネルギー

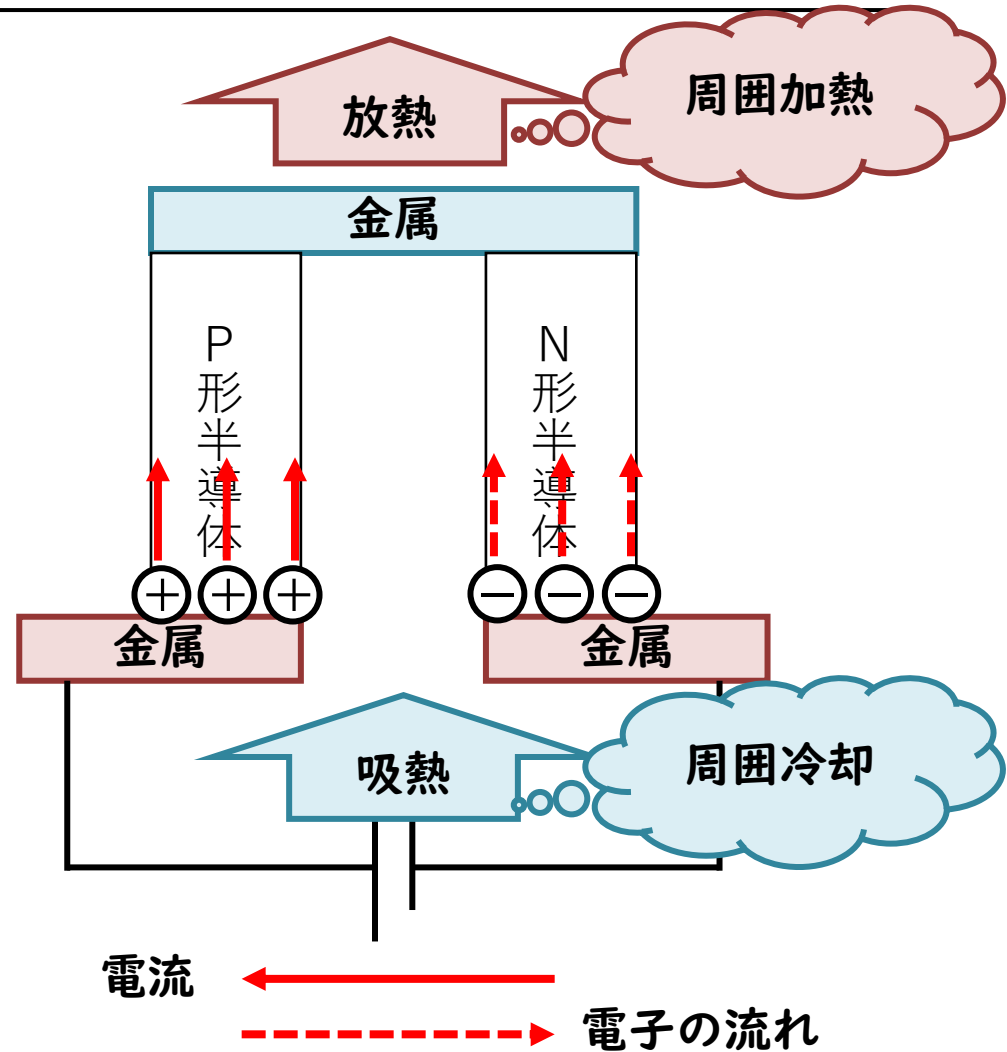
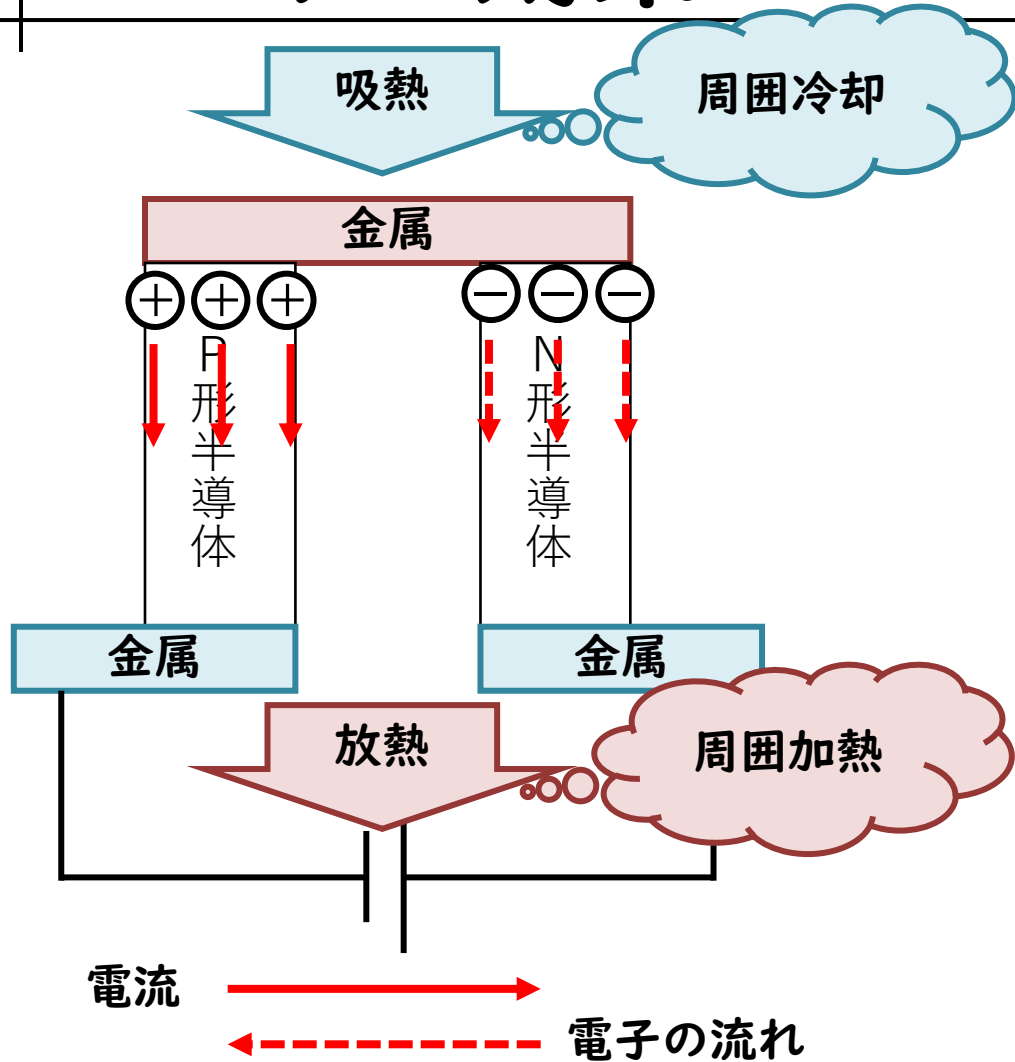


熱エネルギー

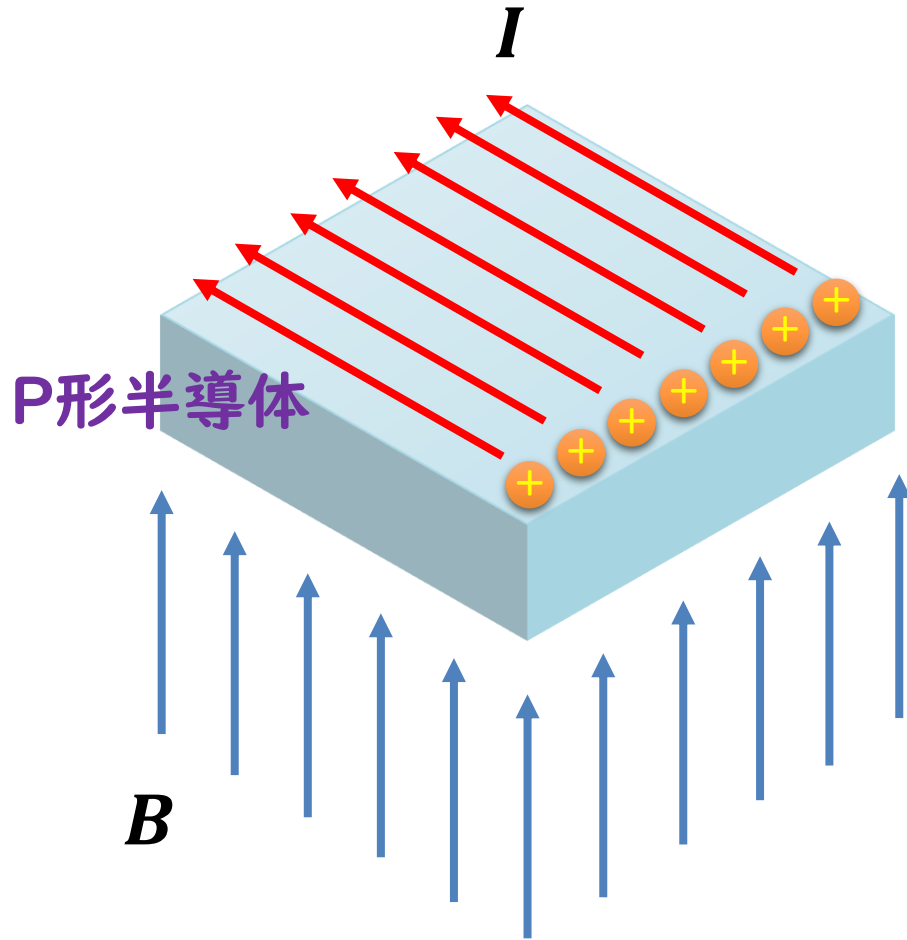
# ペルチェ効果



# ペルチェ効果



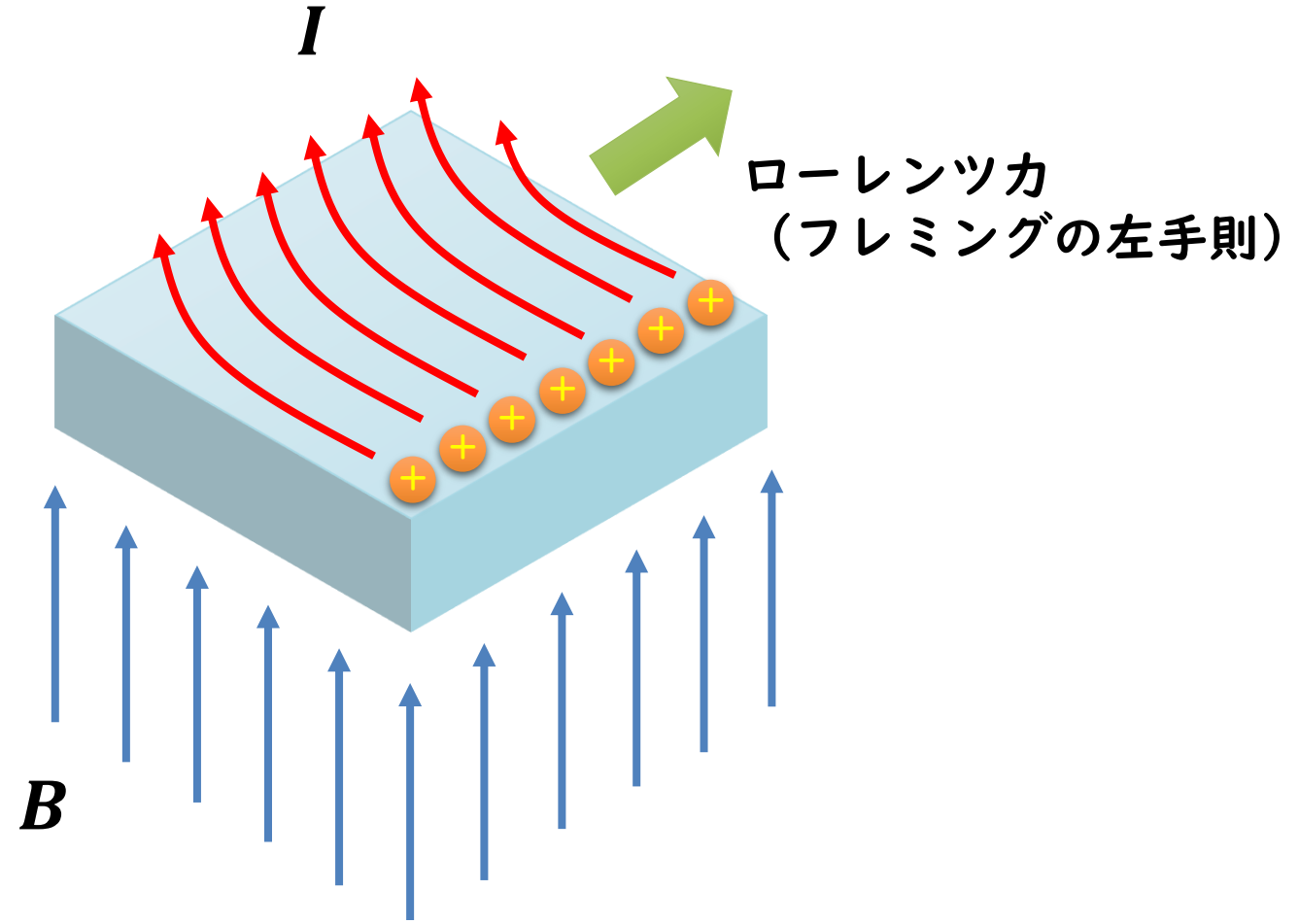
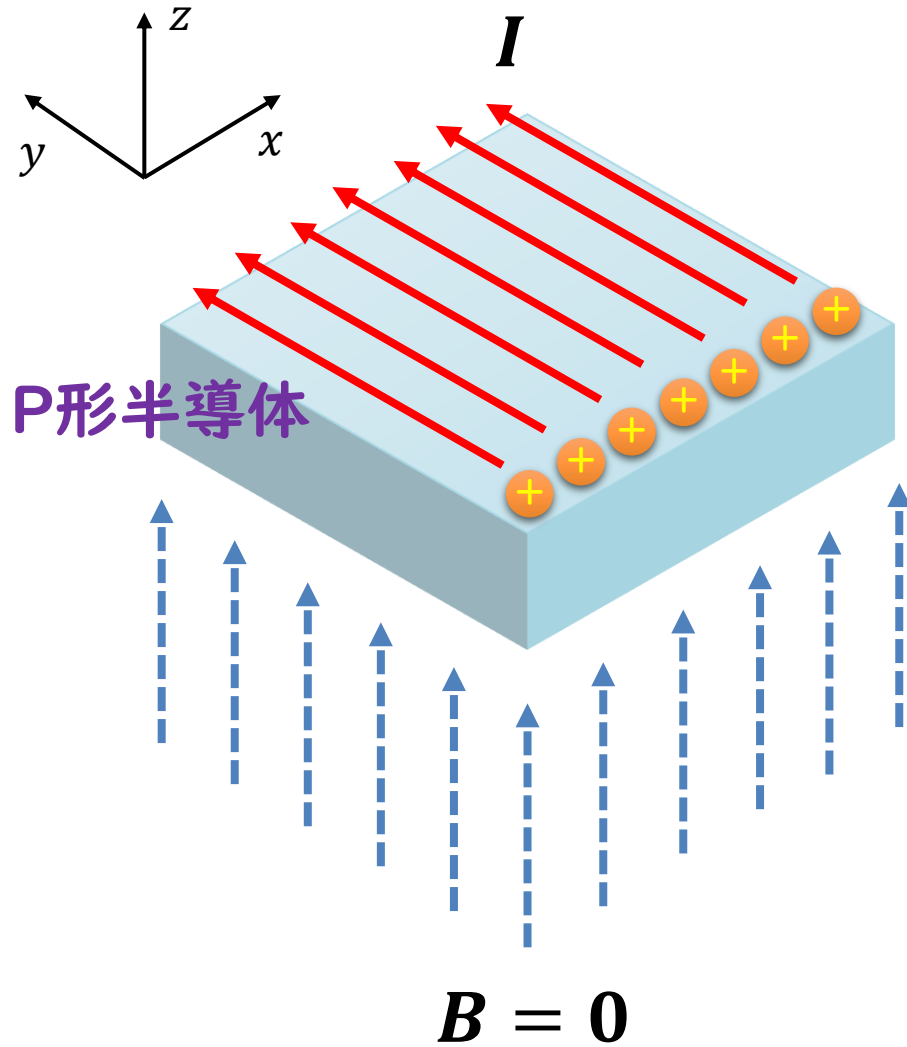
# ホール効果



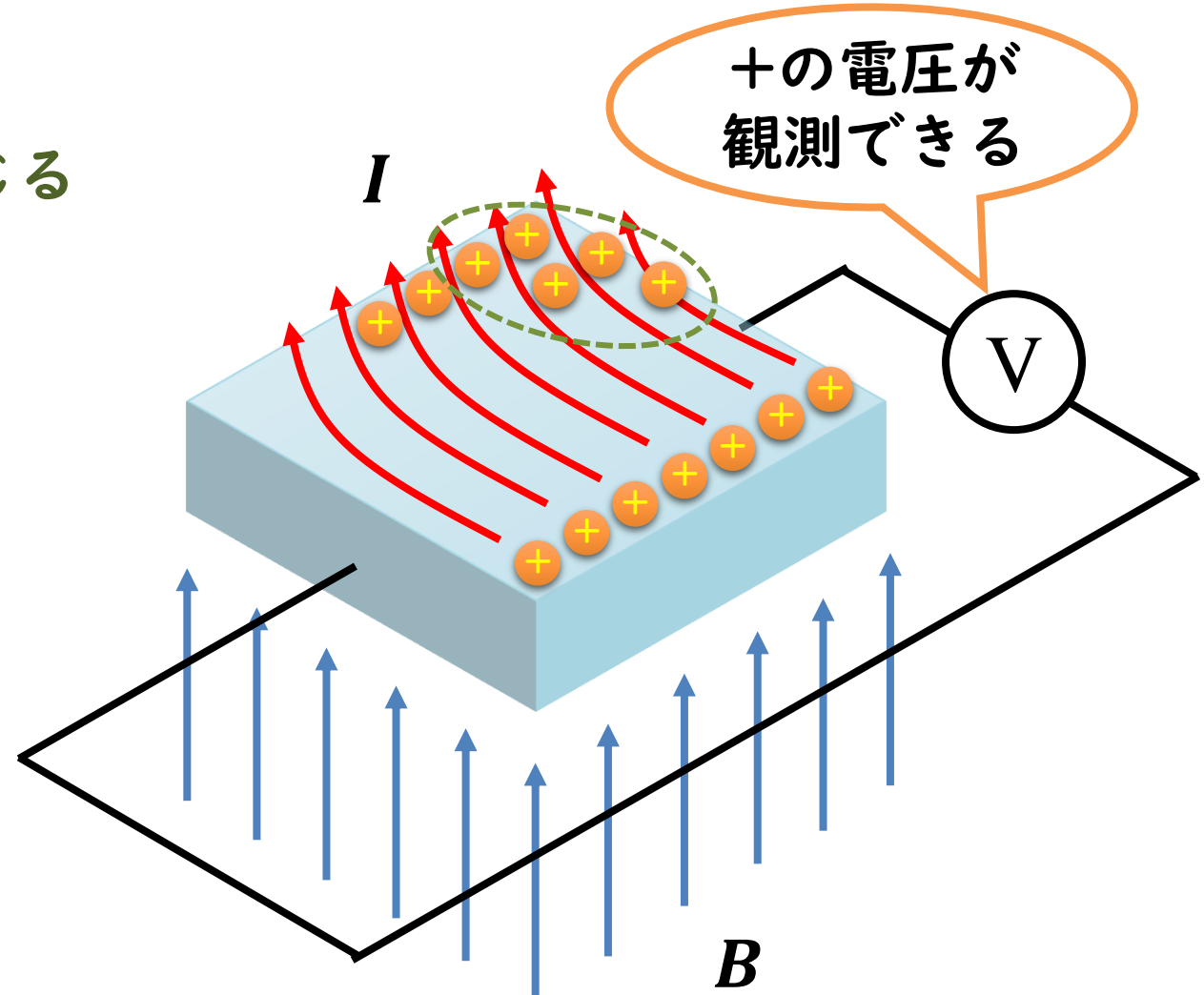
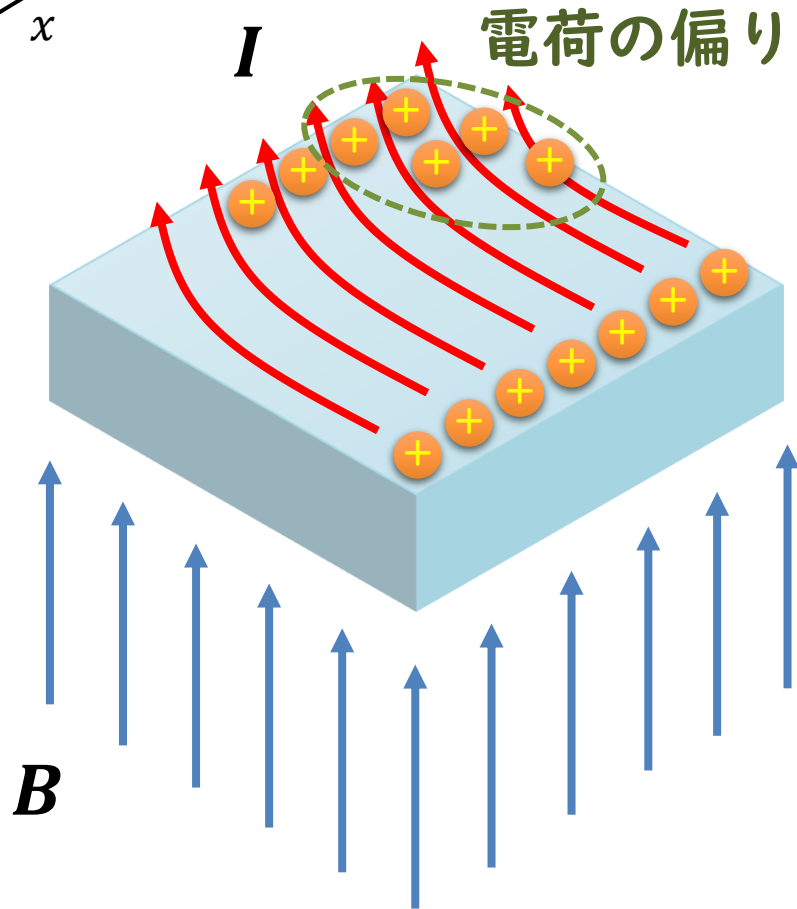
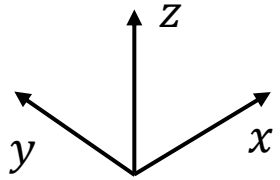
## ホール効果

電流が流れている半導体に磁場を掛けるとローレンツ力が発生し、電荷が物体の端に移動し、電荷の偏りによって起電力が発生する現象。

# ホール効果

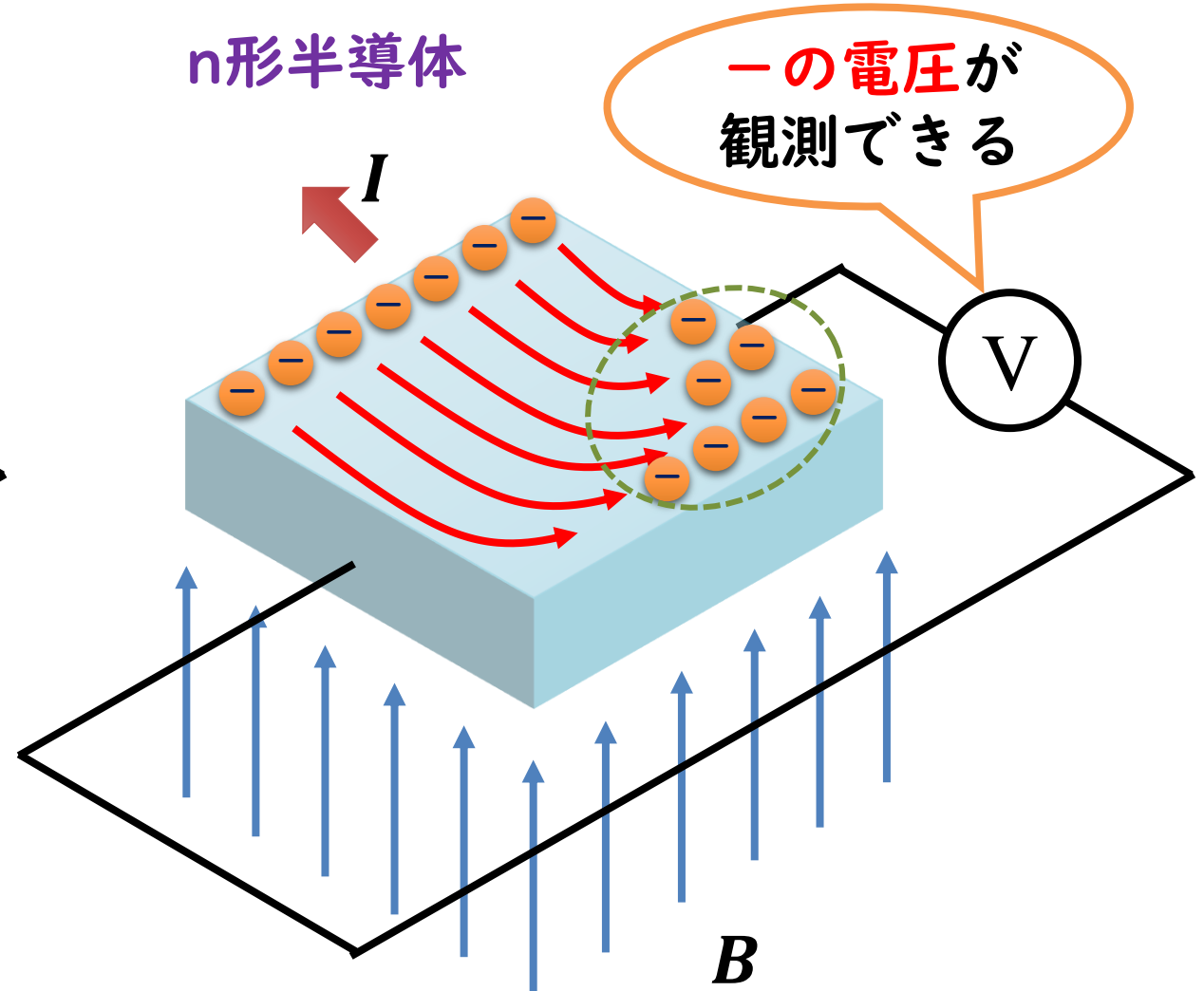
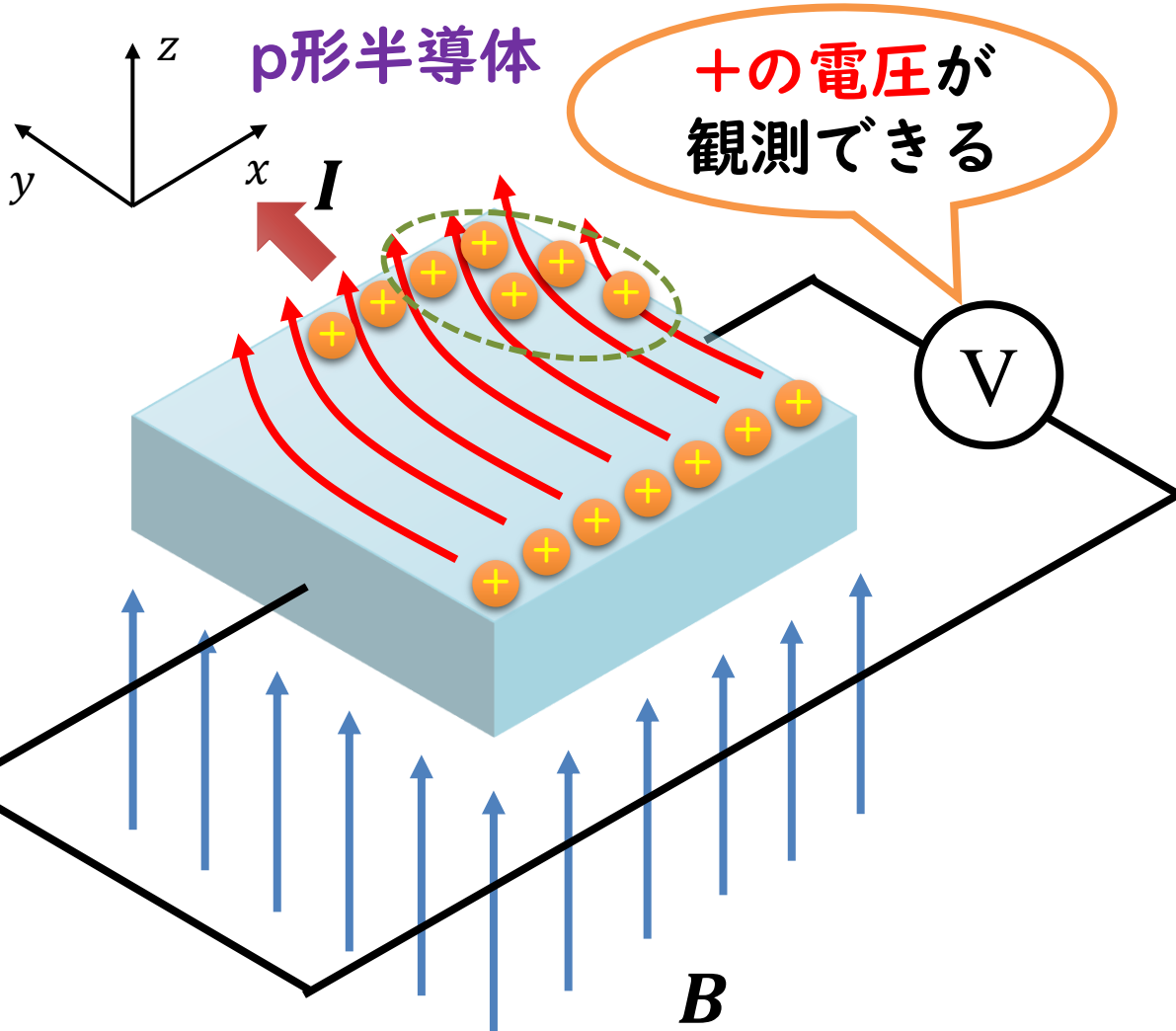


# ホール効果





# ホール効果



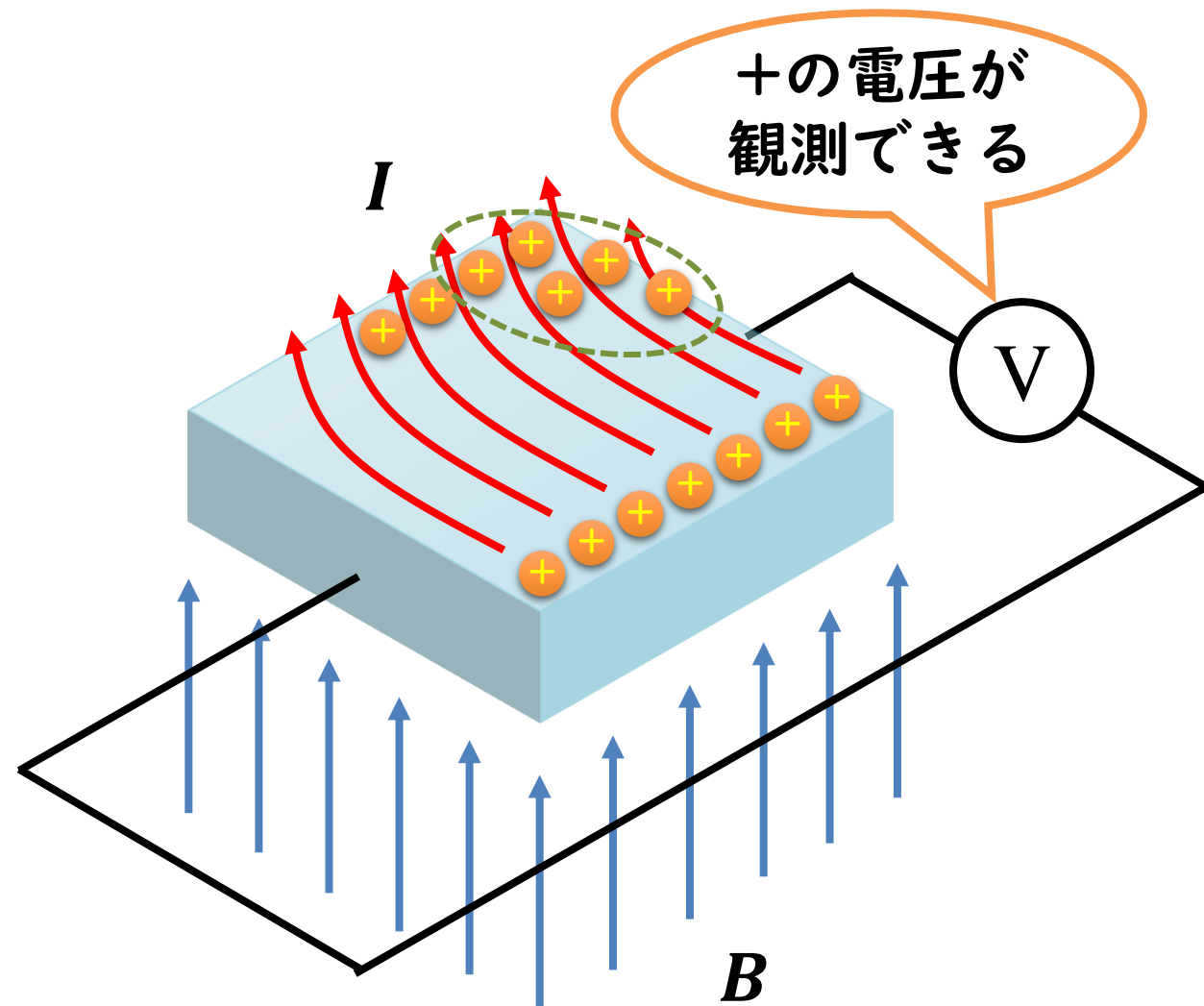
# ホール効果の応用

## デバイスへの応用

- ・磁気センサ
- ・電流センサ

## 半導体の特性評価

- ・キャリア濃度
- ・キャリアの種類

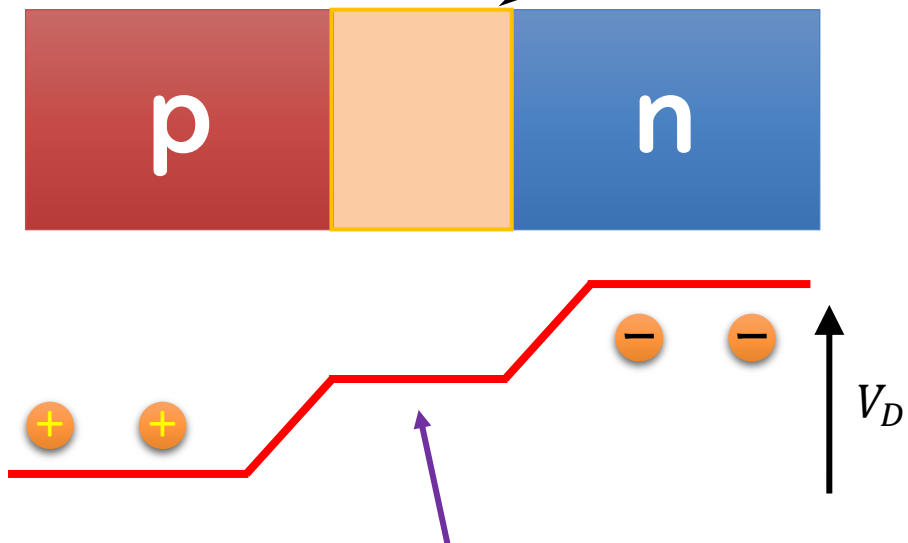


# 発光ダイオード (LED)

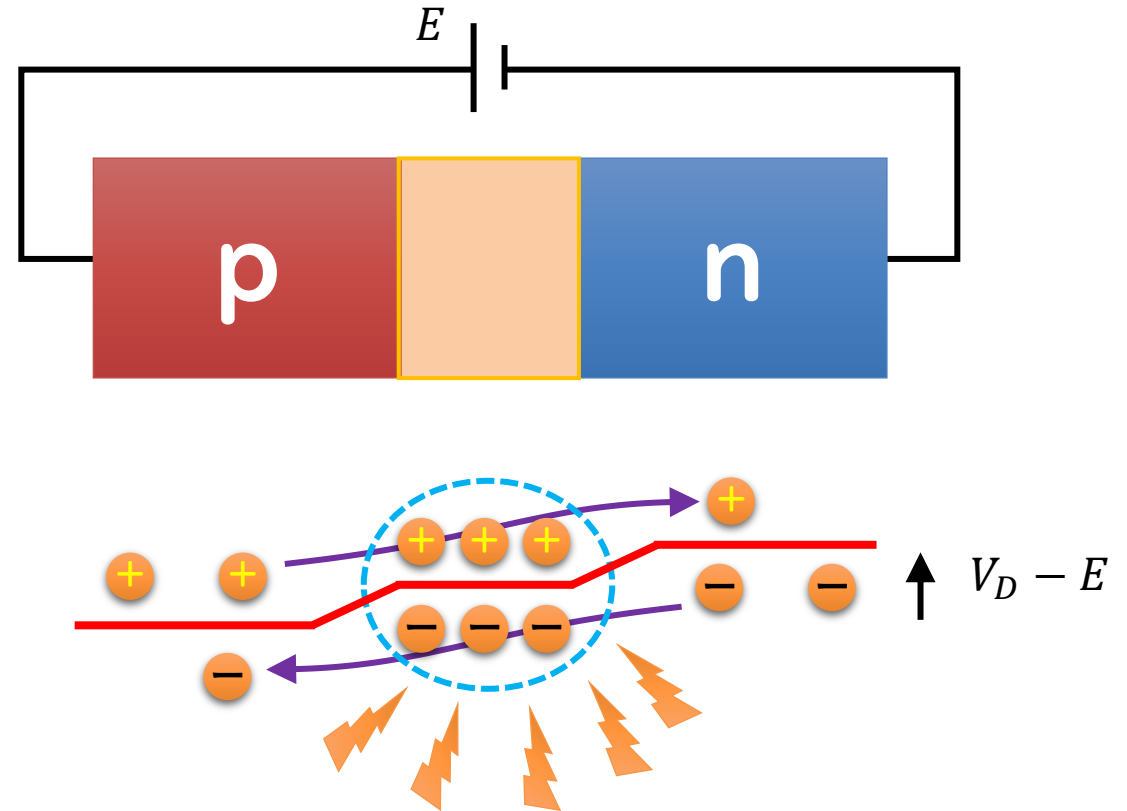
## 発光ダイオード

ダブルヘテロ構造

活性層



p形、n形の不純物に比べて、  
荷電子が高いエネルギーで安定する材料

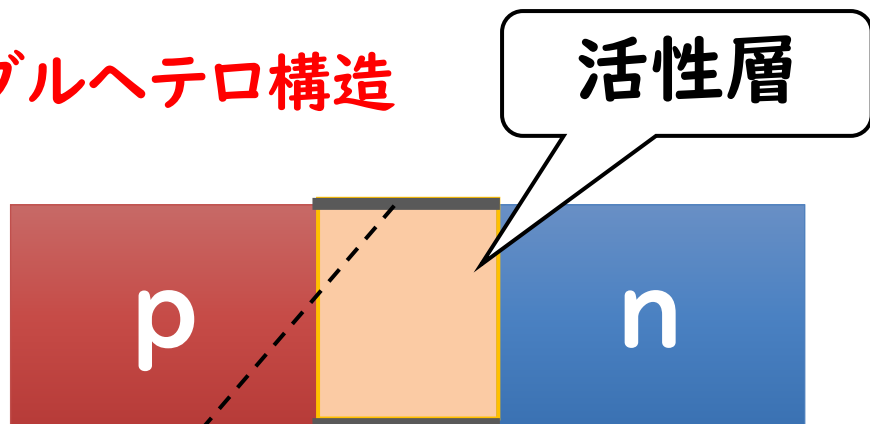


再結合の確率が上がり  
発光効率が向上

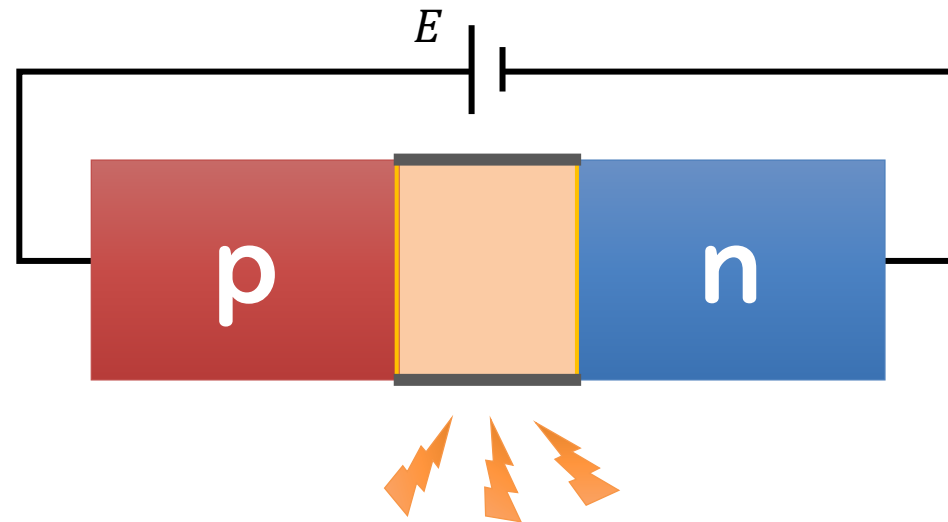
# 半導体レーザー (LD)

## 半導体レーザー

ダブルヘテロ構造



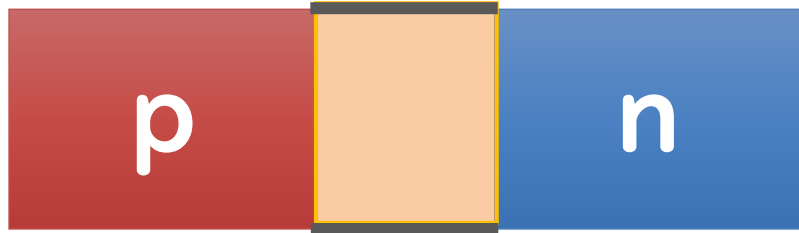
活性層の両端に「鏡」



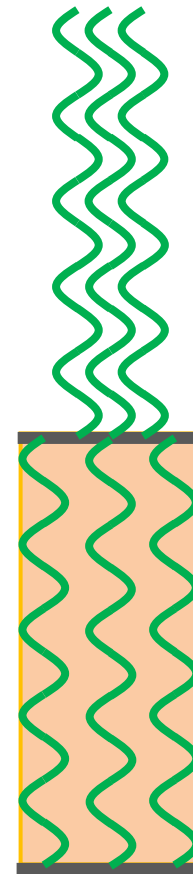
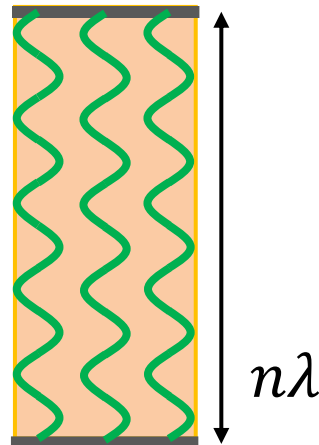
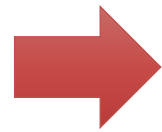
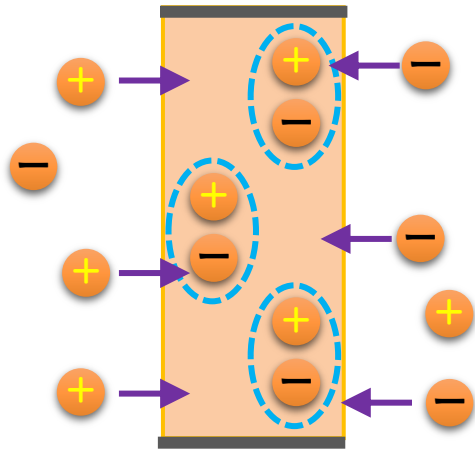
鏡の部分から光が漏れる

→漏れる光に特徴がある!

# 半導体レーザー (LD)



鏡の距離を光の波長の  
の逡倍にしておく  
→光が蓄えられる



Laser (コヒーレント光)

- ・指向性が高い
- ・光の強度が高い
- ・単一周波数 (Q値が高い)

蓄えられたの一部が  
鏡から外部に放出  
→誘導放出

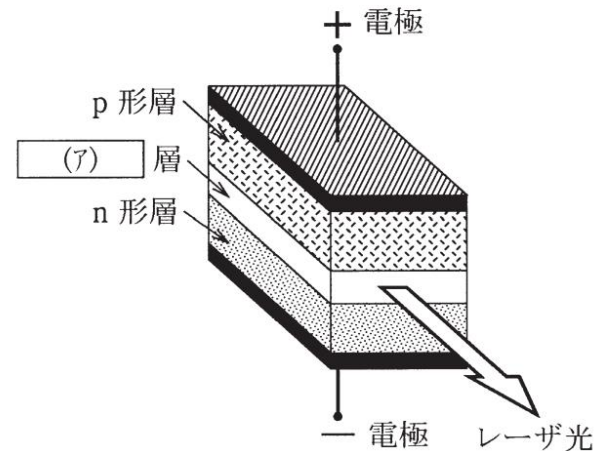
# H27 問11

問11 次の文章は、半導体レーザ（レーザダイオード）に関する記述である。

レーザダイオードは、図のような3層構造を成している。p形層とn形層に挟まれた層を (ア) 層といい、この層は上部のp形層及び下部のn形層とは性質の異なる材料で作られている。前後の面は半導体結晶による自然な反射鏡になっている。

レーザダイオードに (イ) を流すと、(ア) 層の自由電子が正孔と再結合して消滅するとき光を放出する。

この光が二つの反射鏡の間に閉じ込められることによって、(ウ) 放出が起き、同じ波長の光が多量に生じ、外部にその一部が出力される。光の特別な波長だけが共振状態となって (ウ) 放出が誘起されるので、強い同位相のコヒーレントな光が得られる。



上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	空 乏	逆電流	二 次
(2)	活 性	逆電流	誘 導
(3)	活 性	順電流	二 次
(4)	活 性	順電流	誘 導
(5)	空 乏	順電流	二 次

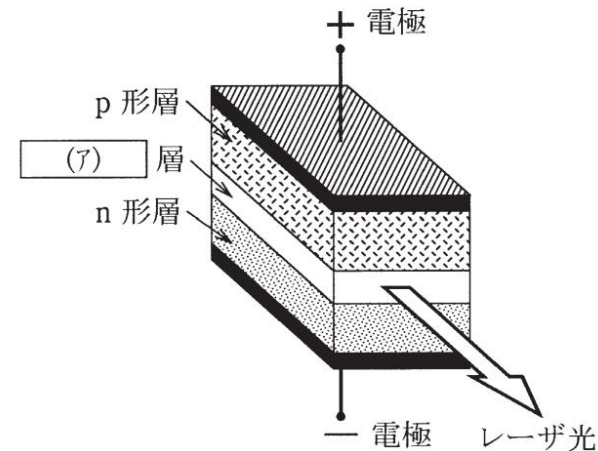
# H27 問11

問11 次の文章は、半導体レーザ（レーザダイオード）に関する記述である。

レーザダイオードは、図のような3層構造を成している。p形層とn形層に挟まれた層を (ア) 層といい、この層は上部のp形層及び下部のn形層とは性質の異なる材料で作られている。前後の面は半導体結晶による自然な反射鏡になっている。

レーザダイオードに (イ) を流すと、(ア) 層の自由電子が正孔と再結合して消滅するとき光を放出する。

この光が二つの反射鏡の間に閉じ込められることによって、(ウ) 放出が起き、同じ波長の光が多量に生じ、外部にその一部が出力される。光の特別な波長だけが共振状態となって (ウ) 放出が誘起されるので、強い同位相のコヒーレントな光が得られる。



上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)及び(ウ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)
(1)	空 乏	逆電流	二 次
(2)	活 性	逆電流	誘 導
(3)	活 性	順電流	二 次
(4)	活 性	順電流	誘 導
(5)	空 乏	順電流	二 次

# トランジスタ

## ・バイポーラトランジスタ

$$I_B + I_C = I_E$$

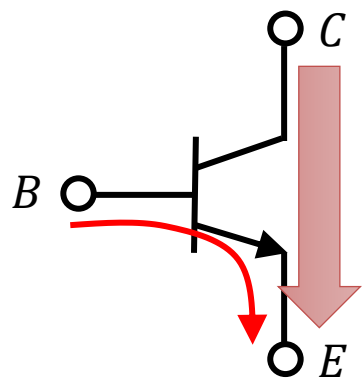
$$I_B \ll I_C < I_E$$

### NPNトランジスタ

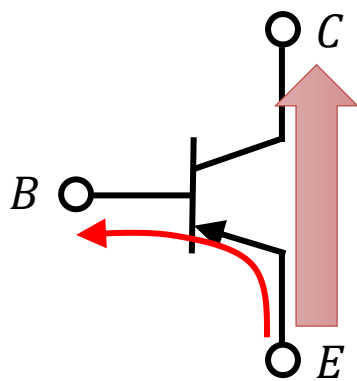
ベースとコレクタからエミッタへ電流が流れる

### PNPトランジスタ

エミッタからベースとコレクタへ電流が流れる

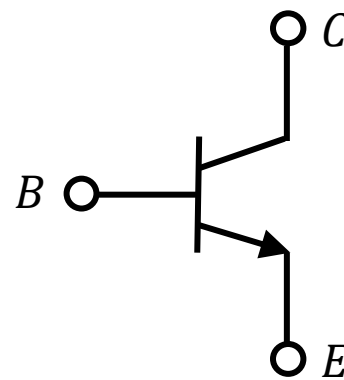


NPNトランジスタ

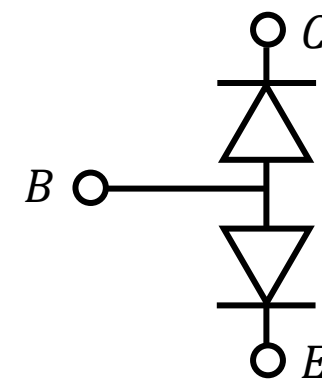
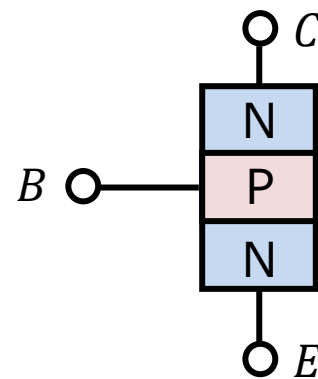


PNPトランジスタ

## NPNトランジスタの構造

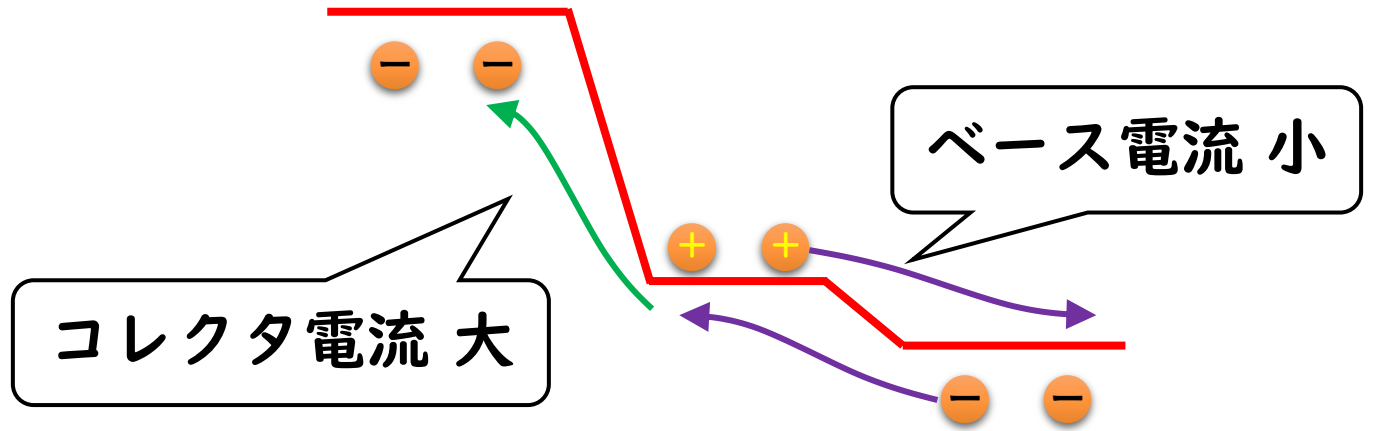
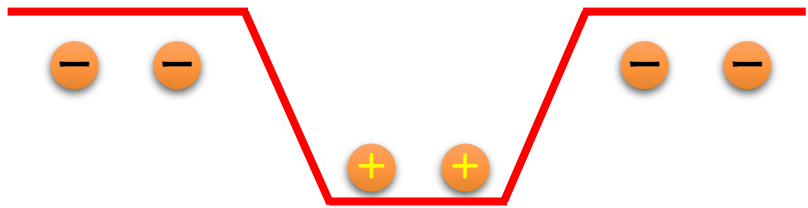
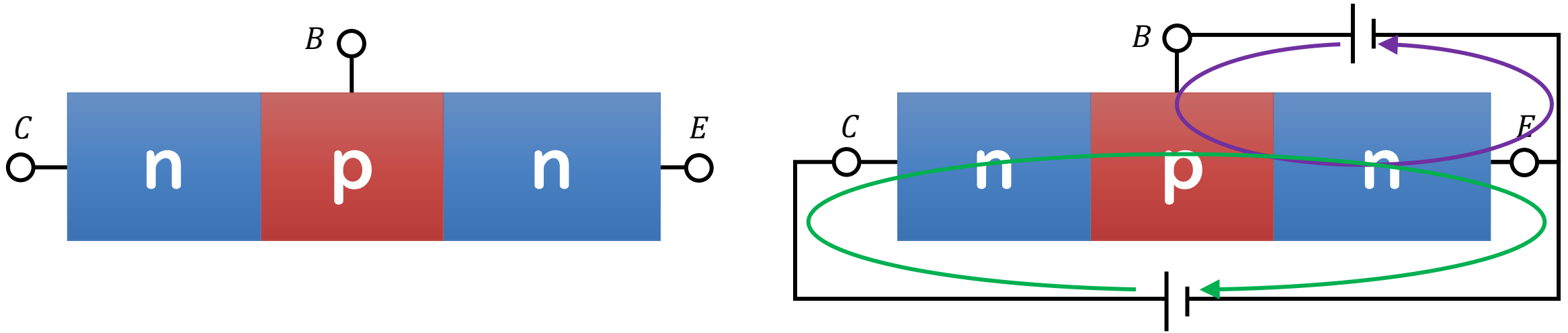


B:ベース  
E:エミッタ  
C:コレクタ

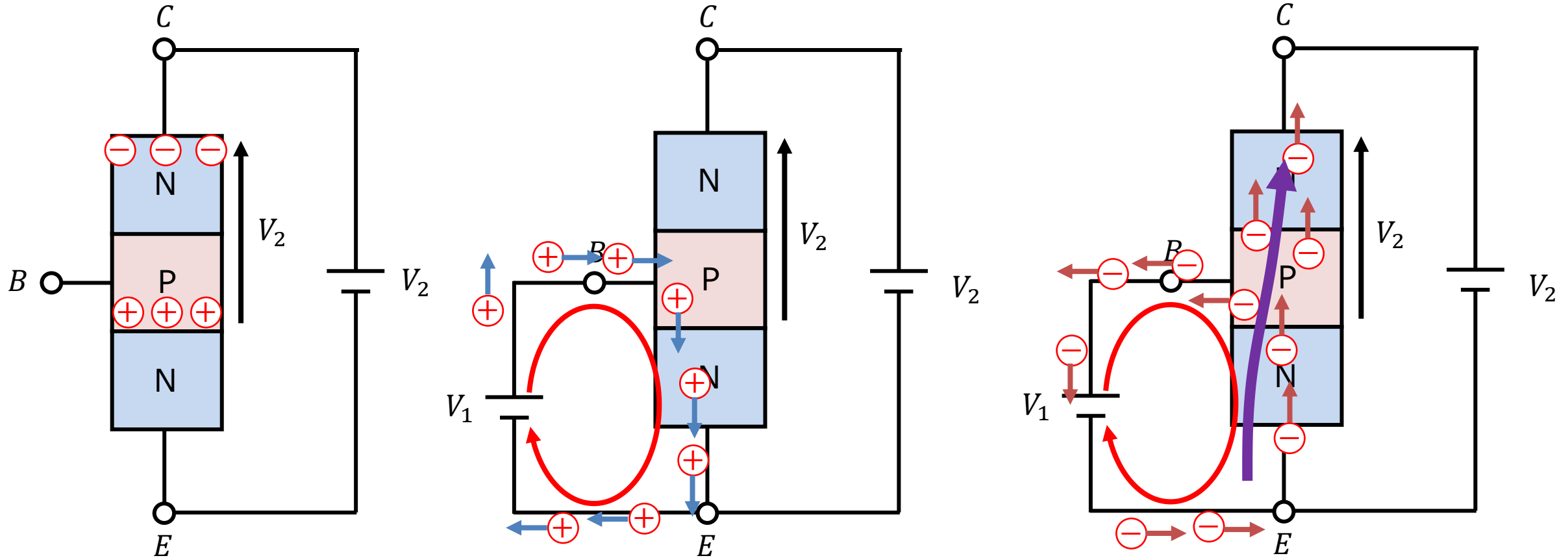




# トランジスタの電流の流れ



# トランジスタの電流の流れ



# FET (Field Effect Transistor)

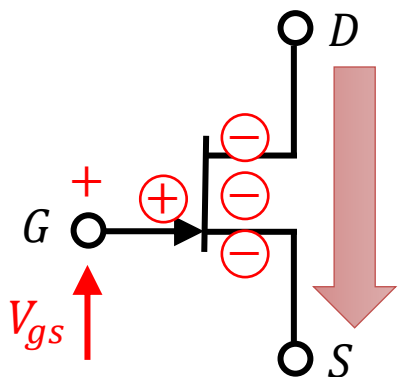
電界効果形トランジスタ (Field Effect Transistor) (通称 FET)

→ゲートの電圧により、ドレイン-ソース間の電流を制御する

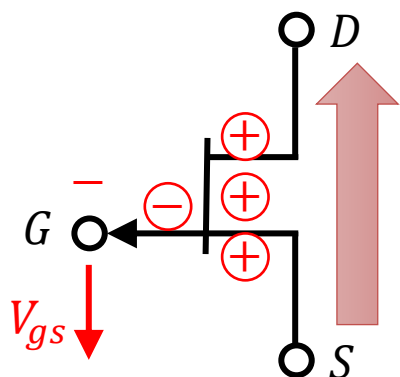
FET

N-ch FET: 電子の道を作る ( $V_{gs} > 0$ )

P-ch FET: 正孔の道を作る ( $V_{gs} < 0$ )



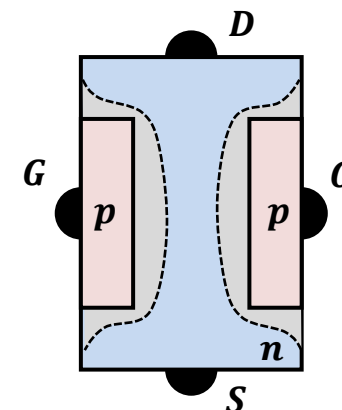
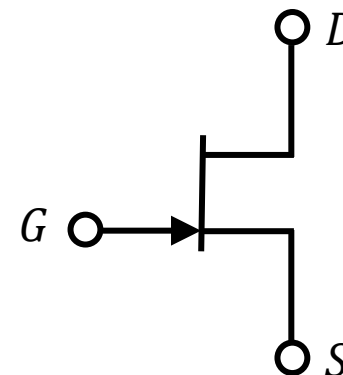
N-ch FET



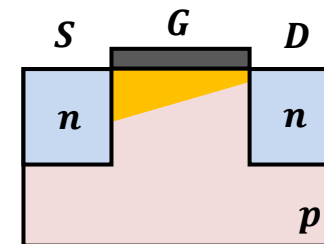
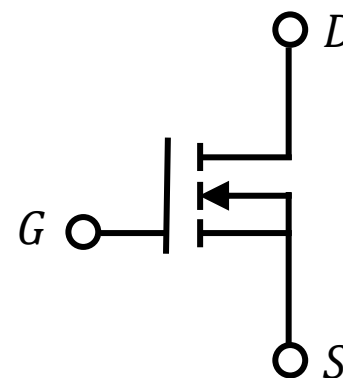
P-ch FET

G:ゲート  
S:ソース  
D:ドレイン

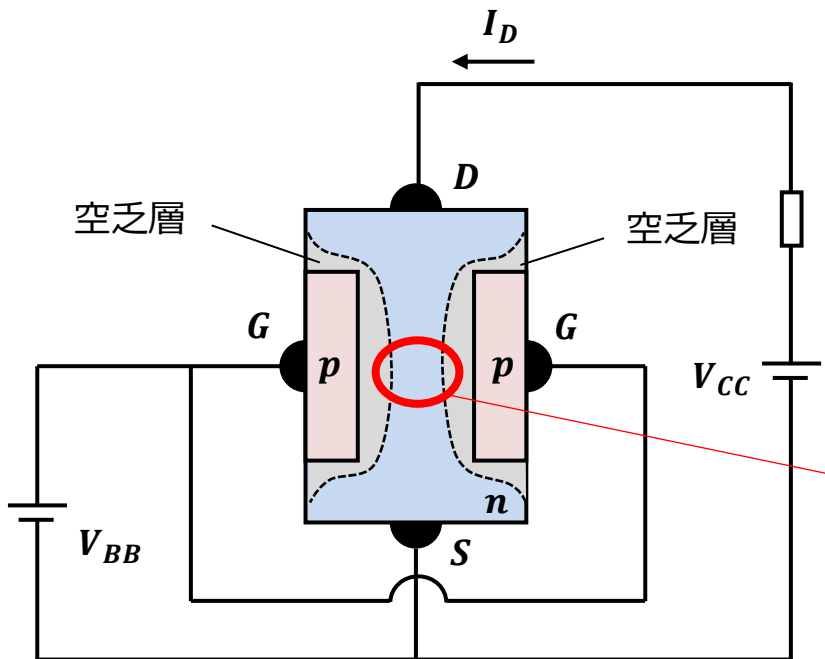
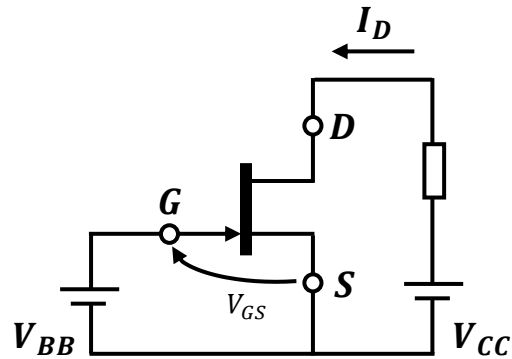
接合形FET



MOSFET



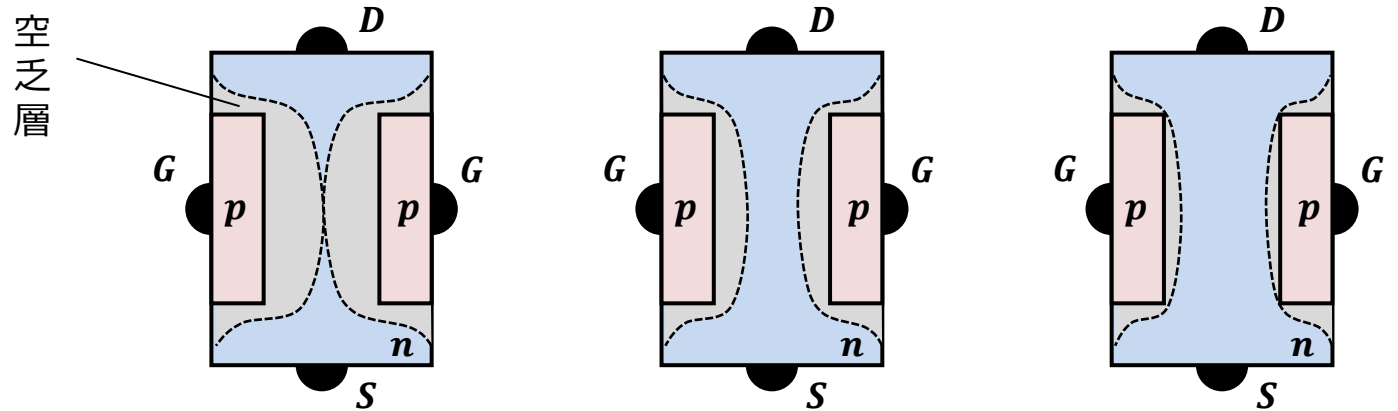
# 接合形FET (J-FET)



$V_{GS}$  小  
 $V_{BB} = -2V$

$V_{GS}$  中  
 $V_{BB} = -1V$

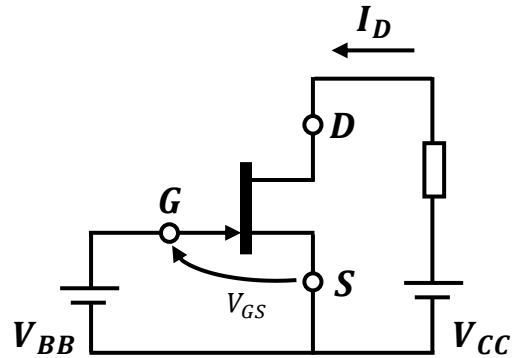
$V_{GS}$  大  
 $V_{BB} = 0V$



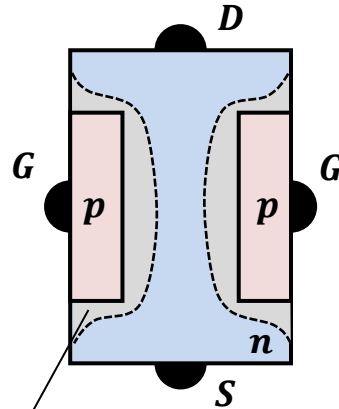
$V_{GS}$  を大きくすると空乏層の幅が変わる  
→ D-S間に電流が流れやすくなる

電流の通り道「チャンネル」

# 接合形FET (J-FET)

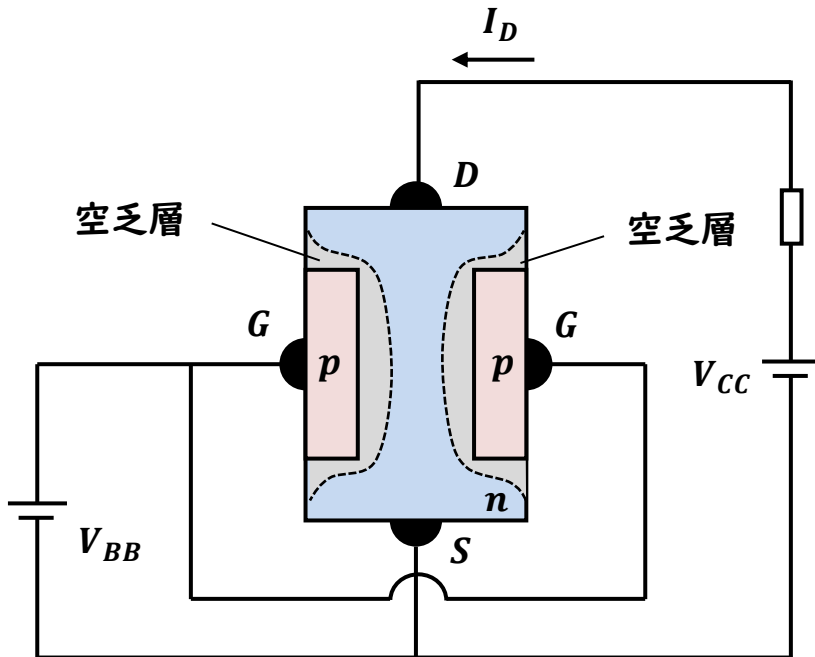
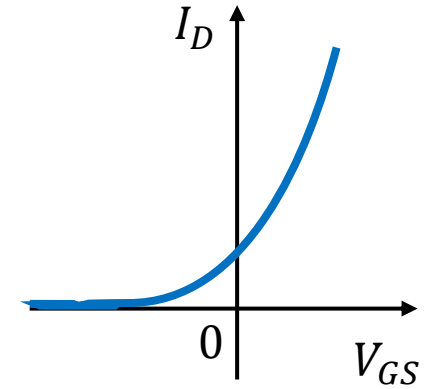


$V_{GS} = V_{BB} = 0$  のとき

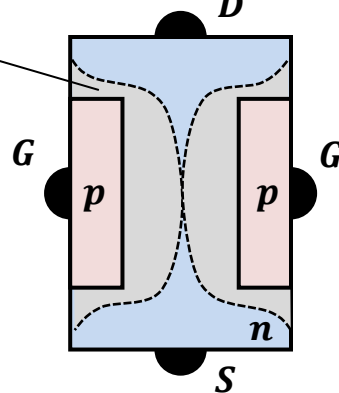


$V_{GS}$  を印加しなくても  
ドレイン電流  $I_D$  が流れる  
素子

ディプレッション形

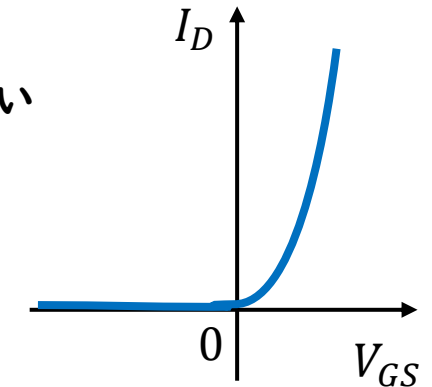


空乏層

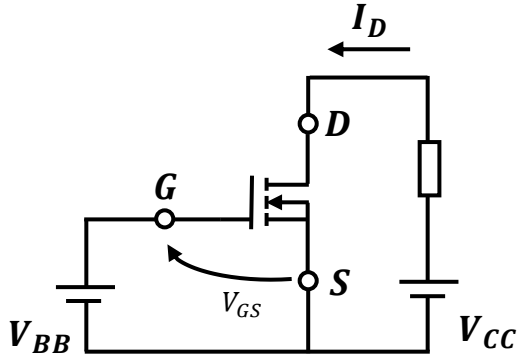


$V_{GS}$  を印加しないと  
ドレイン電流  $I_D$  が流れない  
素子

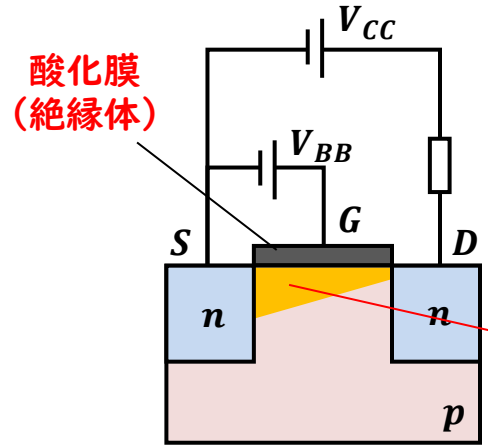
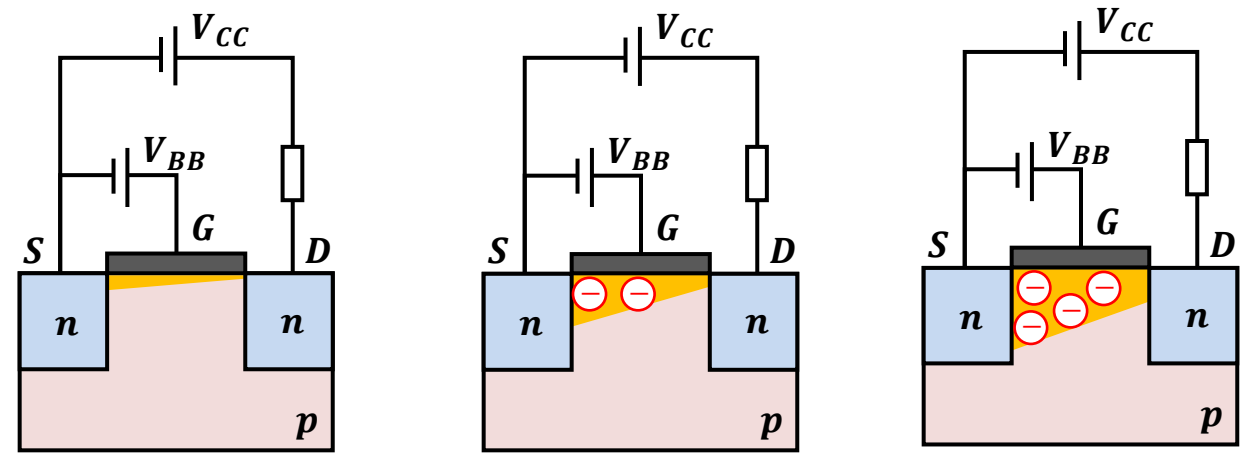
エンハンスメント形



# MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor)



$V_{GS}$  小  $V_{BB} = 0V$      
  $V_{GS}$  中  $V_{BB} = 1V$      
  $V_{GS}$  大  $V_{BB} = 2V$

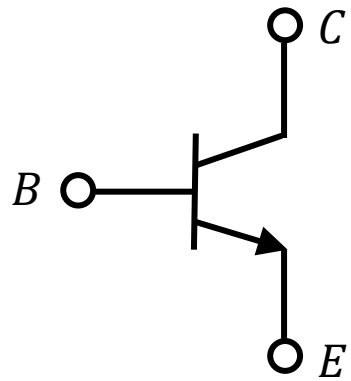


$V_{GS}$  を大きくするとG付近に電子が集まる  
 → D-S間に電流が流れやすくなる

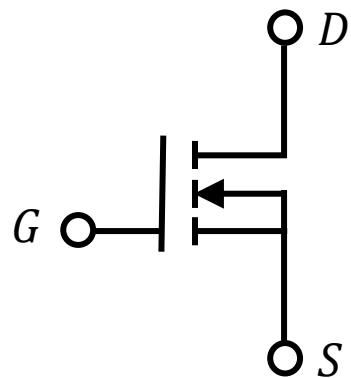
電流の通り道「チャンネル」

# IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

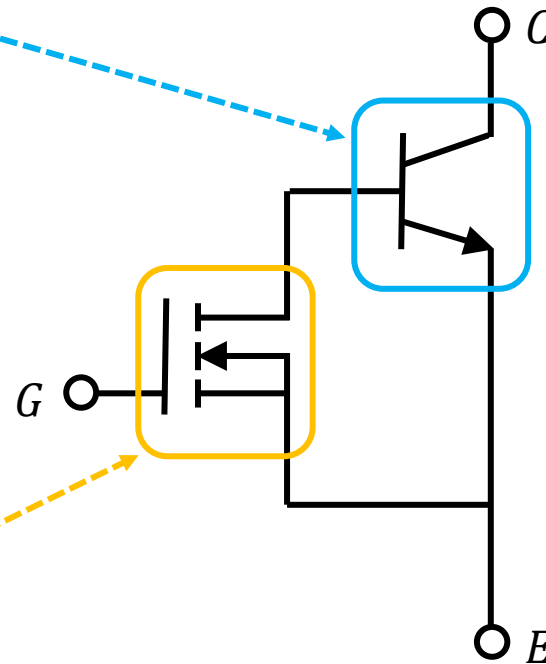
## トランジスタ



## MOSFET



## IGBT



MOSFETとトランジスタの  
ダーリントン接続

## IGBT

(絶縁ゲート形バイポーラトランジスタ)

- ゲートエミッタ間の電圧 $V_{GE}$ でコレクタ電流 $I_C$ を制御する
- MOSFETやトランジスタに比べ大きな電流を制御できる
- ゲート制御の電荷の充放電に時間がかかるのでMOSFETに比べて、ON/OFFの動作が遅い

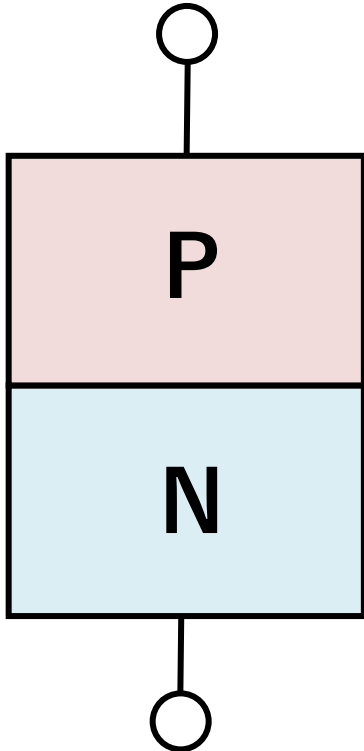
MOSFET : ~ 100kHz, 1 MHz

IGBT : ~ 20kHz

# サイリスタ

## ダイオード

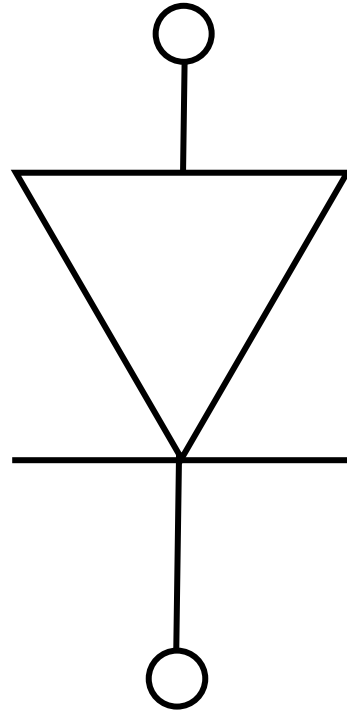
A (アノード)



K (カソード)

構造

A (アノード)

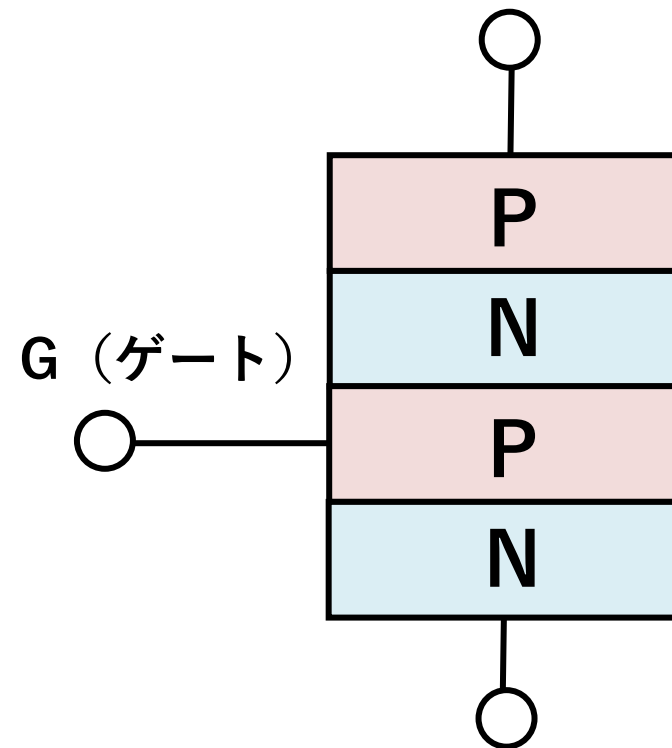


K (カソード)

記号

## サイリスタ

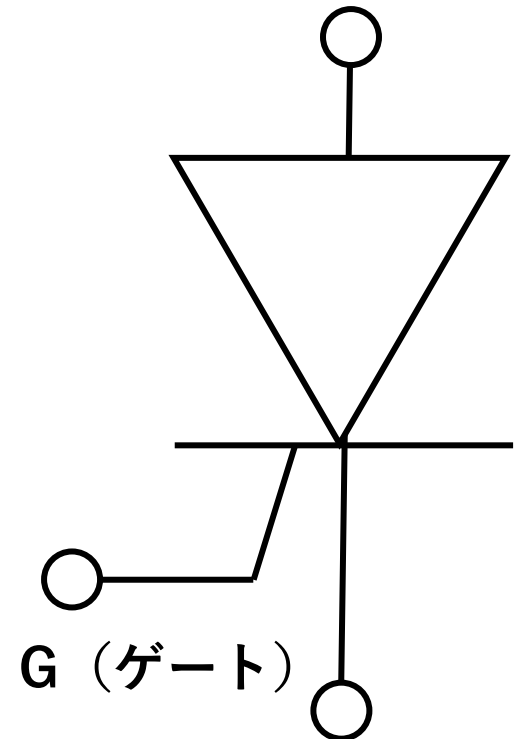
A (アノード)



K (カソード)

構造

A (アノード)

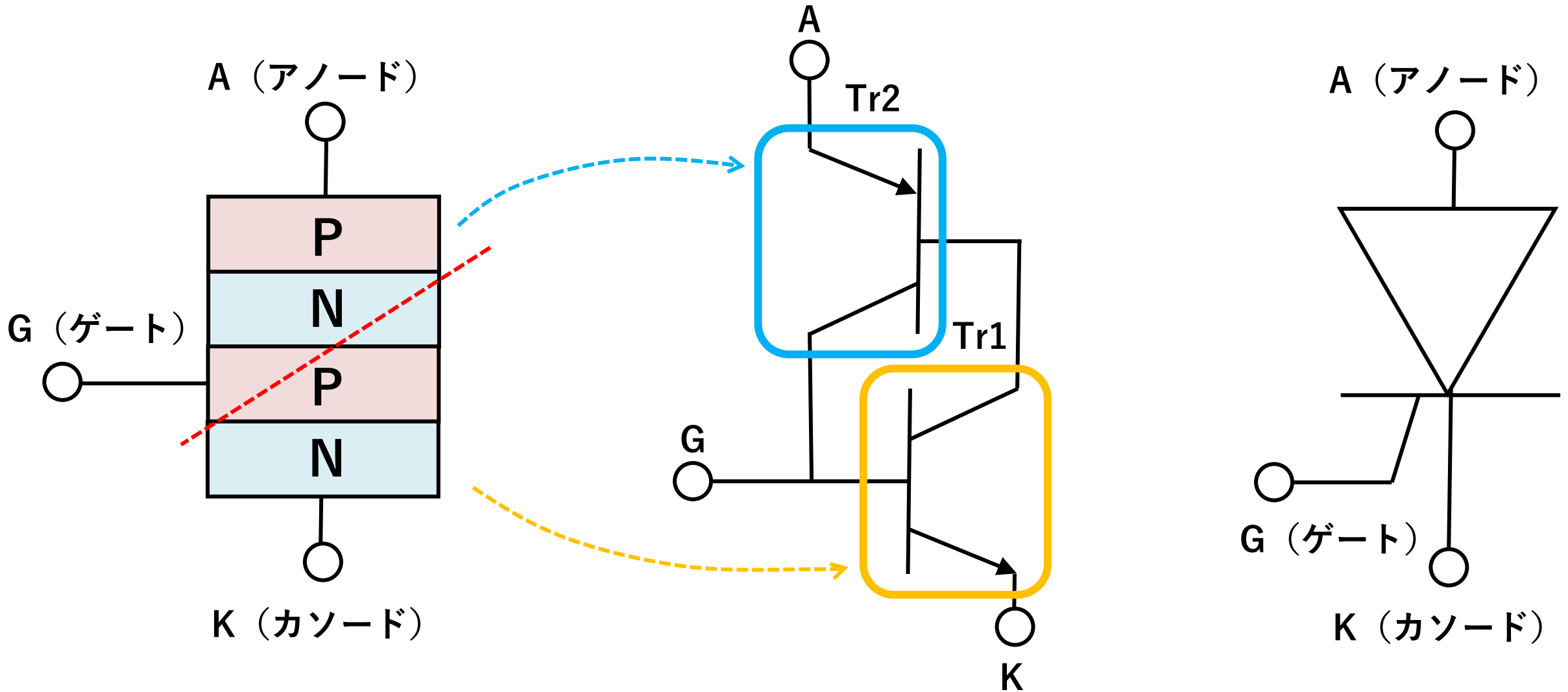


K (カソード)

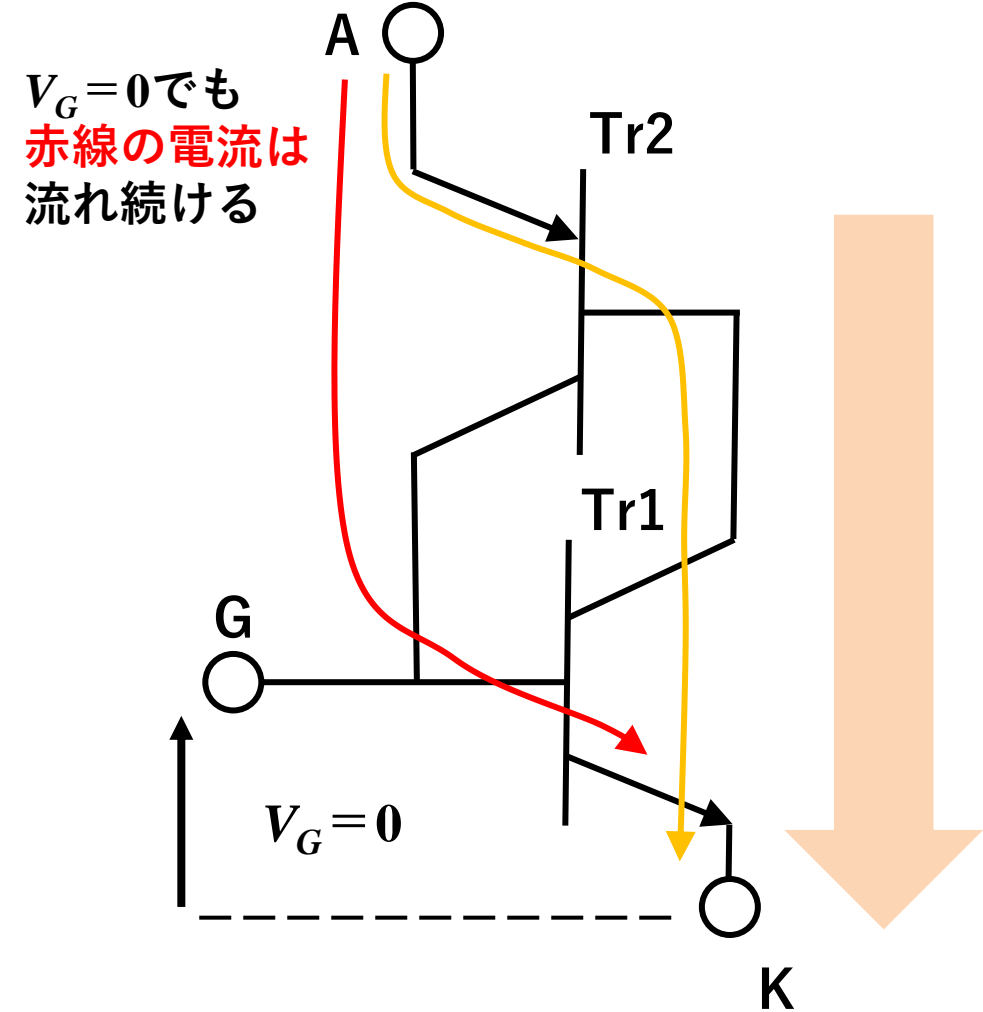
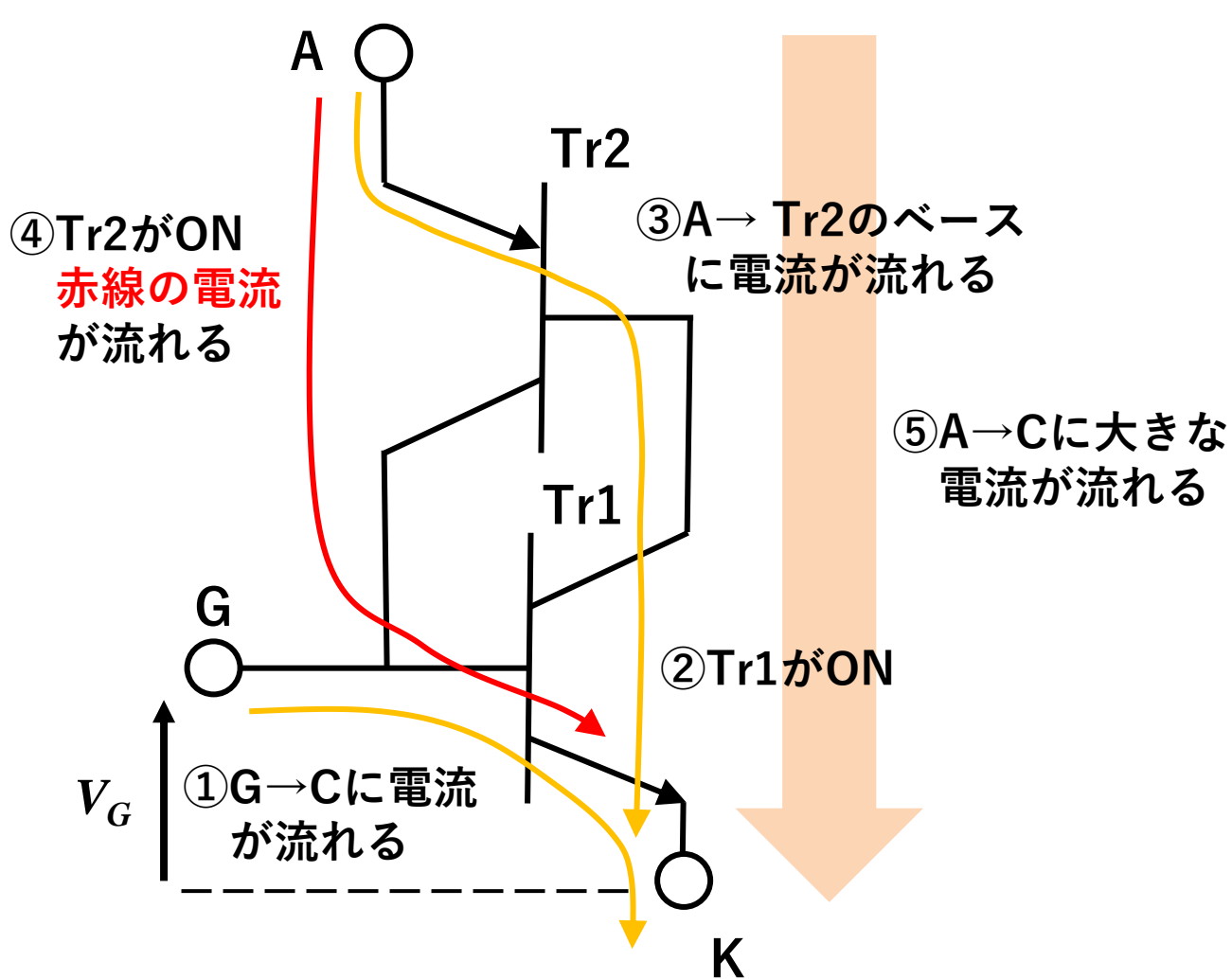
記号



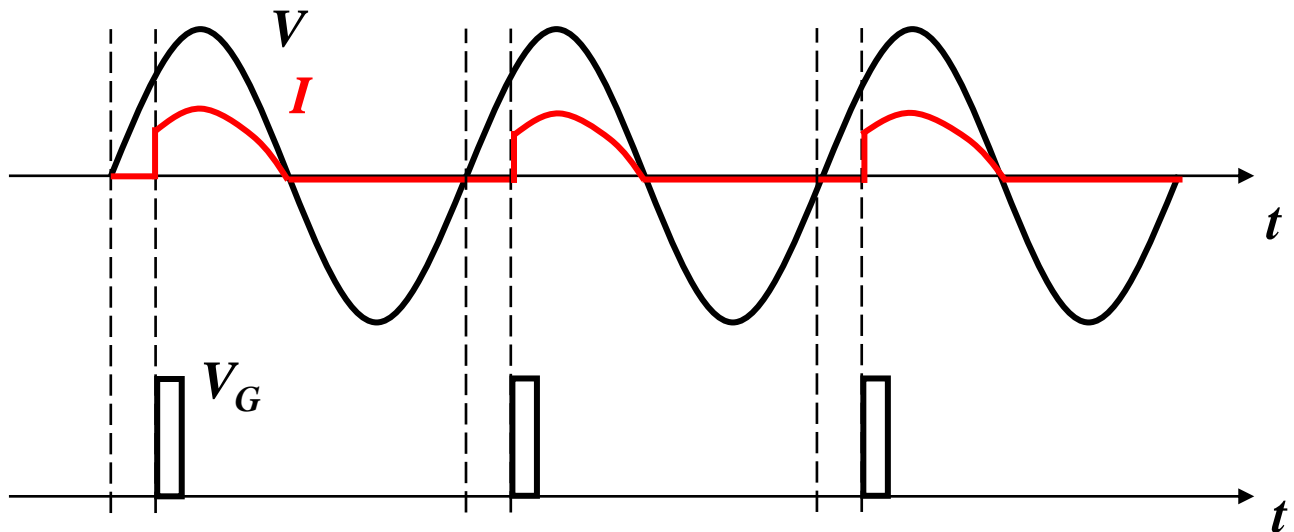
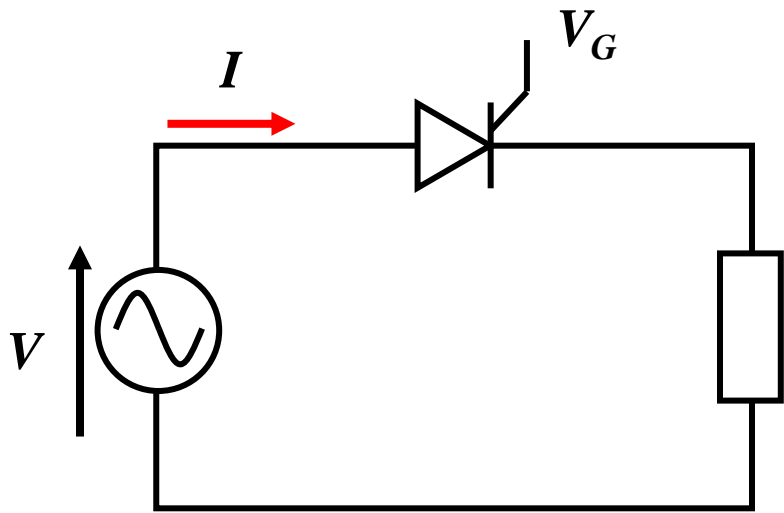
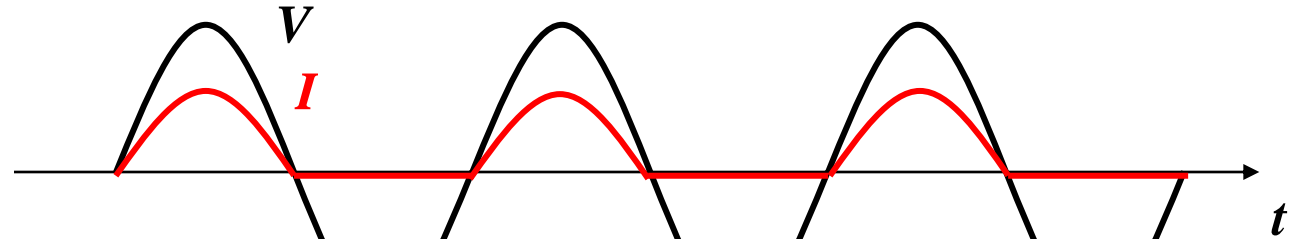
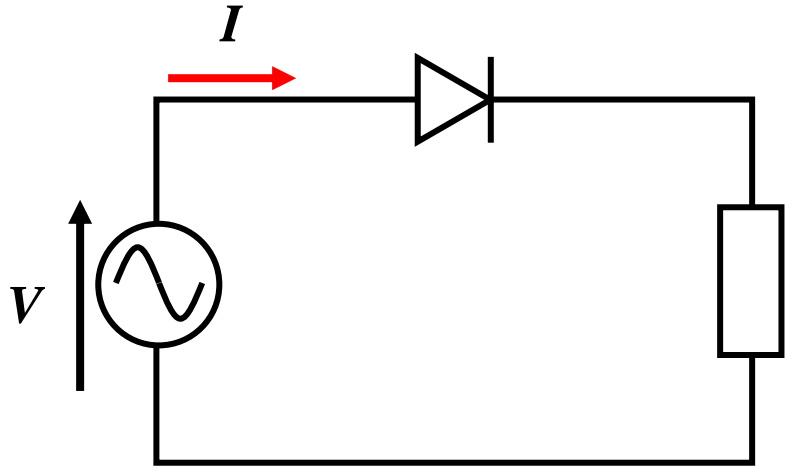
# サイリスタ



# サイリスタの動作



# サイリスタの電流制御



# H30 問11



問 11 半導体素子に関する記述として、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) pn 接合ダイオードは、それに順電圧を加えると電子が素子中をアノードからカソードへ移動する 2 端子素子である。
- (2) LED は、pn 接合領域に逆電圧を加えたときに発光する素子である。
- (3) MOSFET は、ゲートに加える電圧によってドレーン電流を制御できる電圧制御形の素子である。
- (4) 可変容量ダイオード(バリキャップ)は、加えた逆電圧の値が大きくなるとその静電容量も大きくなる 2 端子素子である。
- (5) サイリスタは、p 形半導体と n 形半導体の 4 層構造からなる 4 端子素子である。

# H30 問11

問 11 半導体素子に関する記述として、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

(1) pn 接合ダイオードは、それに順電圧を加えると電子が素子中をアノードからカソードへ移動する 2 端子素子である。 **正孔**

(2) LED は、pn 接合領域に逆電圧を加えたときに発光する素子である。 **順方向**

(3) MOSFET は、ゲートに加える電圧によってドレーン電流を制御できる電圧制御形の素子である。

(4) 可変容量ダイオード(バリキャップ)は、加えた逆電圧の値が大きくなるとその静電容量も大きくなる 2 端子素子である。

**逆電圧を大きくすると静電容量は小さくなる**

(5) サイリスタは、p 形半導体と n 形半導体の 4 層構造からなる 4 端子素子である。 **3端子素子**

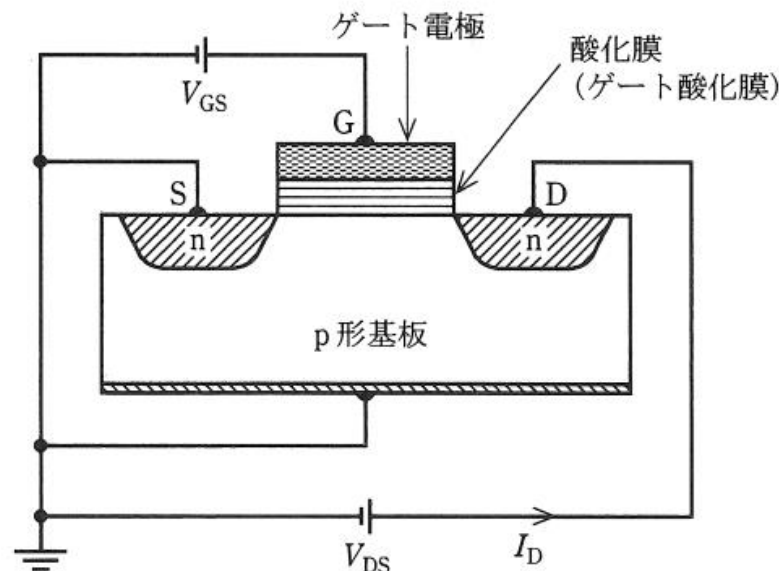
# H23 問11

問11 次の文章は、電界効果トランジスタに関する記述である。

図に示す MOS 電界効果トランジスタ (MOSFET) は、p 形基板表面に n 形のソースとドレイン領域が形成されている。また、ゲート電極は、ソースとドレイン間の p 形基板表面上に薄い酸化膜の絶縁層 (ゲート酸化膜) を介して作られている。ソース S と p 形基板の電位を接地電位とし、ゲート G にしきい値電圧以上の正の電圧  $V_{GS}$  を加えることで、絶縁層を隔てた p 形基板表面近くでは、 が除去され、チャンネルと呼ばれる  の薄い層ができる。これによりソース S とドレイン D が接続される。この  $V_{GS}$  を上昇させるとドレイン電流  $I_D$  は  する。

また、この FET は  チャンネル MOSFET と呼ばれている。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)、(ウ)及び(エ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	正孔	電子	増加	n
(2)	電子	正孔	減少	p
(3)	正孔	電子	減少	n
(4)	電子	正孔	増加	n
(5)	正孔	電子	増加	p

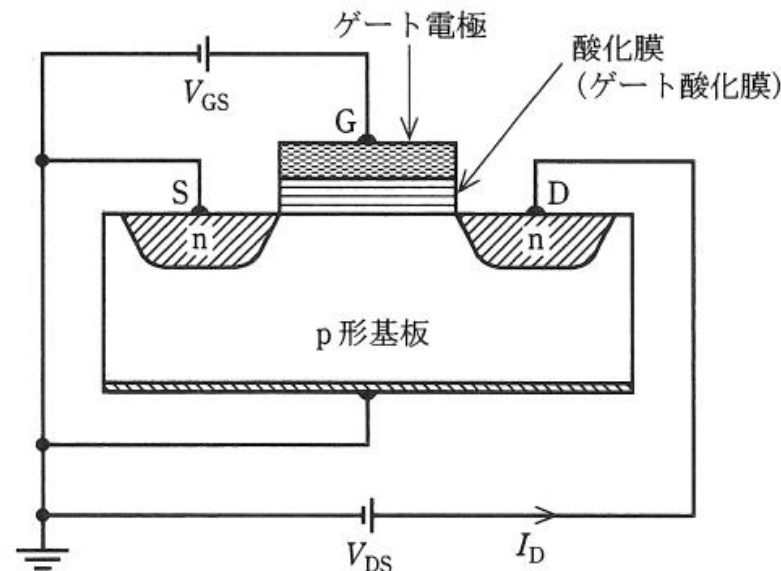
# H23 問11

問11 次の文章は、電界効果トランジスタに関する記述である。

図に示す MOS 電界効果トランジスタ (MOSFET) は、p 形基板表面に n 形のソースとドレイン領域が形成されている。また、ゲート電極は、ソースとドレイン間の p 形基板表面上に薄い酸化膜の絶縁層 (ゲート酸化膜) を介して作られている。ソース S と p 形基板の電位を接地電位とし、ゲート G にしきい値電圧以上の正の電圧  $V_{GS}$  を加えることで、絶縁層を隔てた p 形基板表面近くでは、 が除去され、チャンネルと呼ばれる  の薄い層ができる。これによりソース S とドレイン D が接続される。この  $V_{GS}$  を上昇させるとドレイン電流  $I_D$  は  する。

また、この FET は  チャンネル MOSFET と呼ばれている。

上記の記述中の空白箇所 (ア)、(イ)、(ウ) 及び (エ) に当てはまる組合せとして、正しいものを次の (1) ~ (5) のうちから一つ選べ。

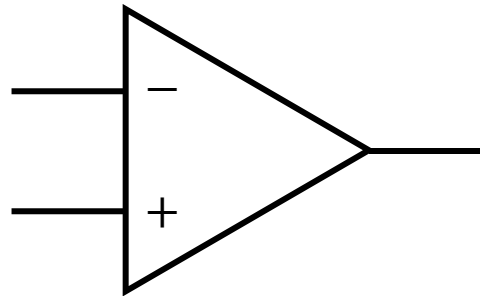


	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	正孔	電子	増加	n
(2)	電子	正孔	減少	p
(3)	正孔	電子	減少	n
(4)	電子	正孔	増加	n
(5)	正孔	電子	増加	p

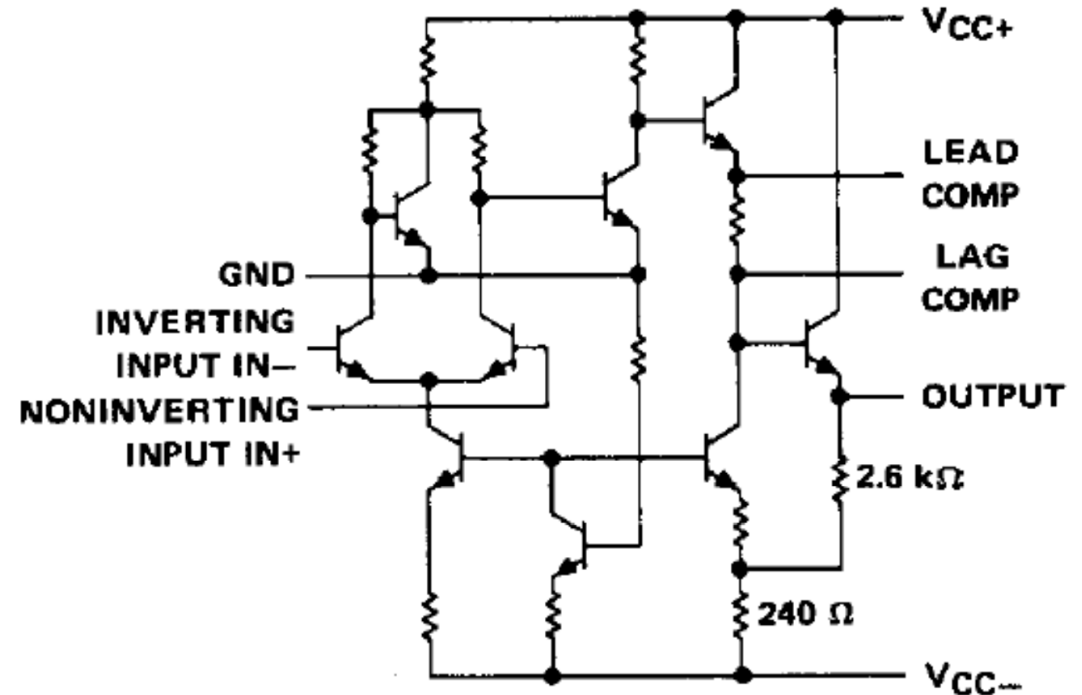
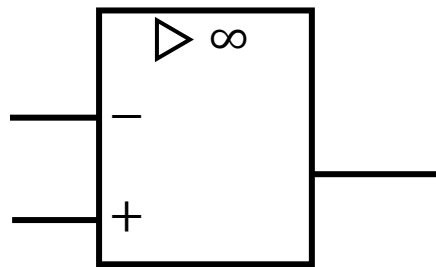
# 演算増幅器 (オペアンプ)

- ・入力電圧を増幅したり、複数の入力電圧の足算や引算を行う

シンボル (一般)



シンボル (電験)

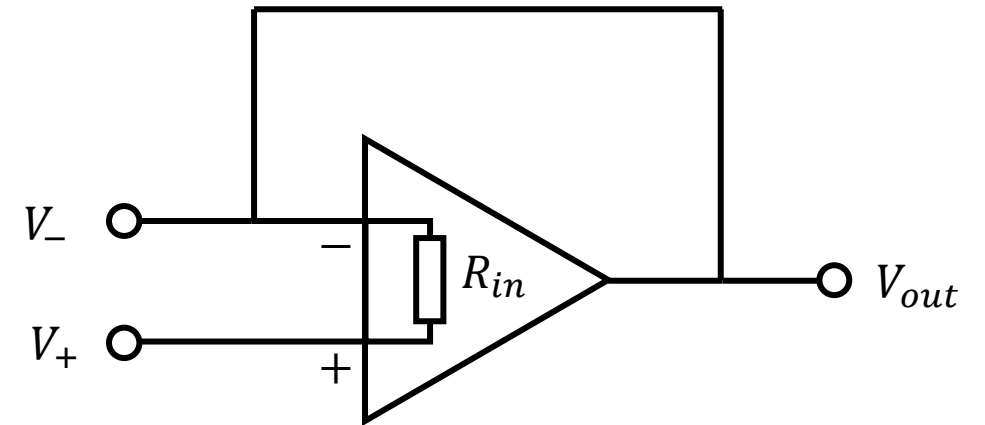
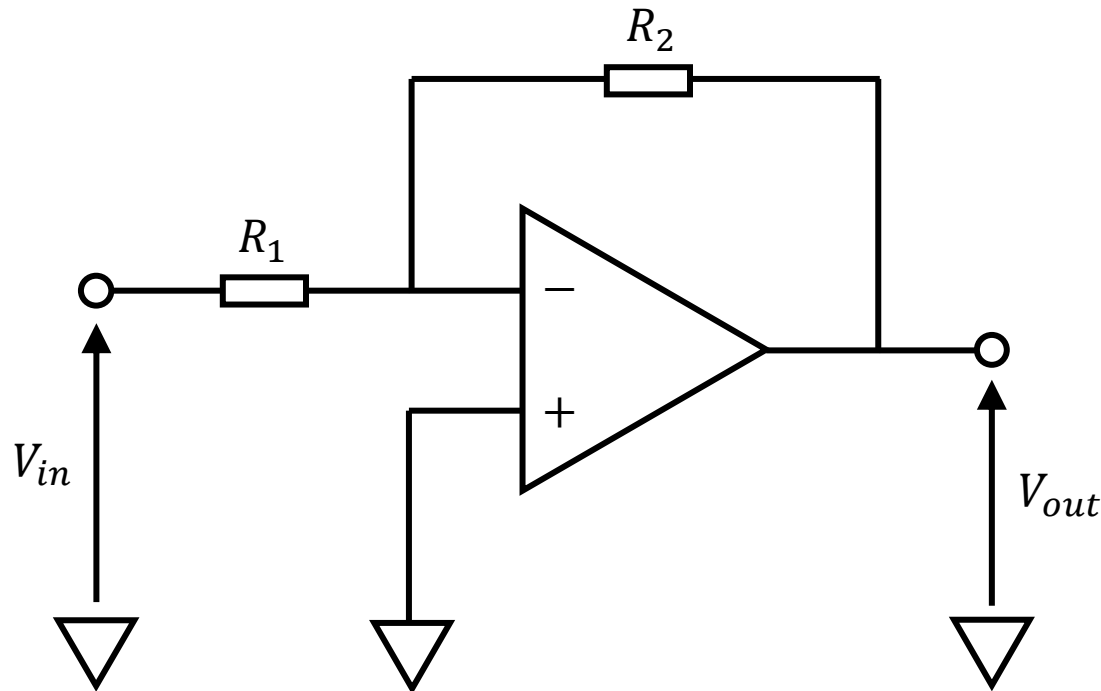


オペアンプの内部回路  
(TIの $\mu A702$ )



# 演算増幅器（オペアンプ）の特徴

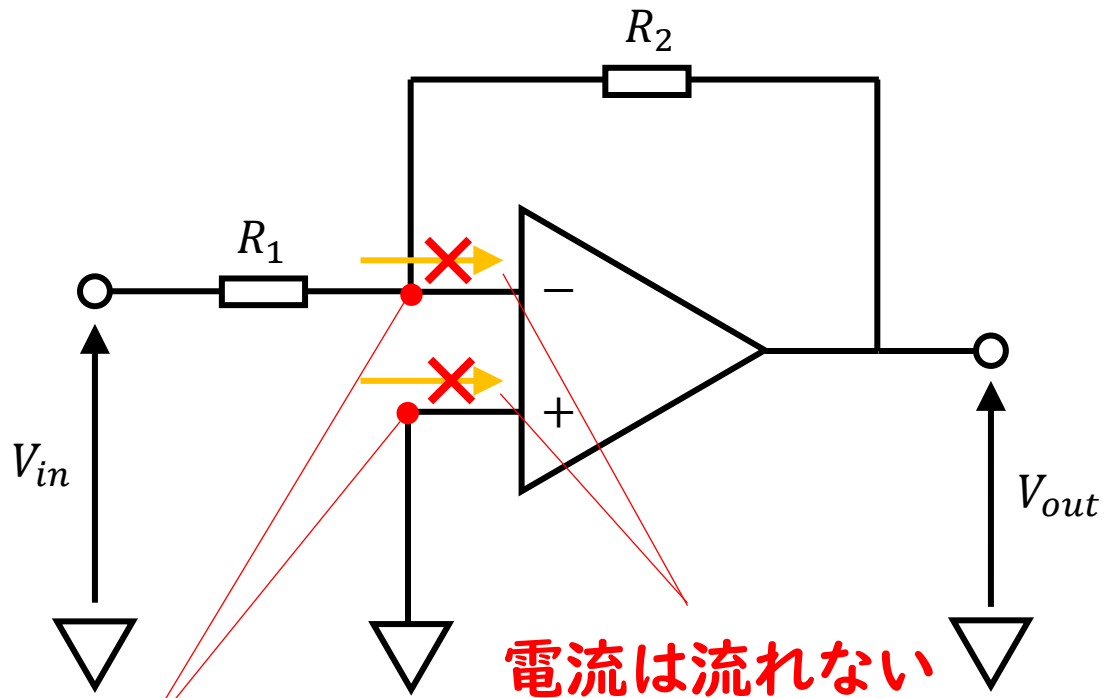
- ・入力電圧を増幅したり、複数の入力電圧の足算や引算を行う
- ・**イマジナリーショート（仮想短絡）**が成り立つ
  - +端子と-端子は電圧が同じ（短絡？）
  - +端子と-端子の間には電流が流れない（開放？）



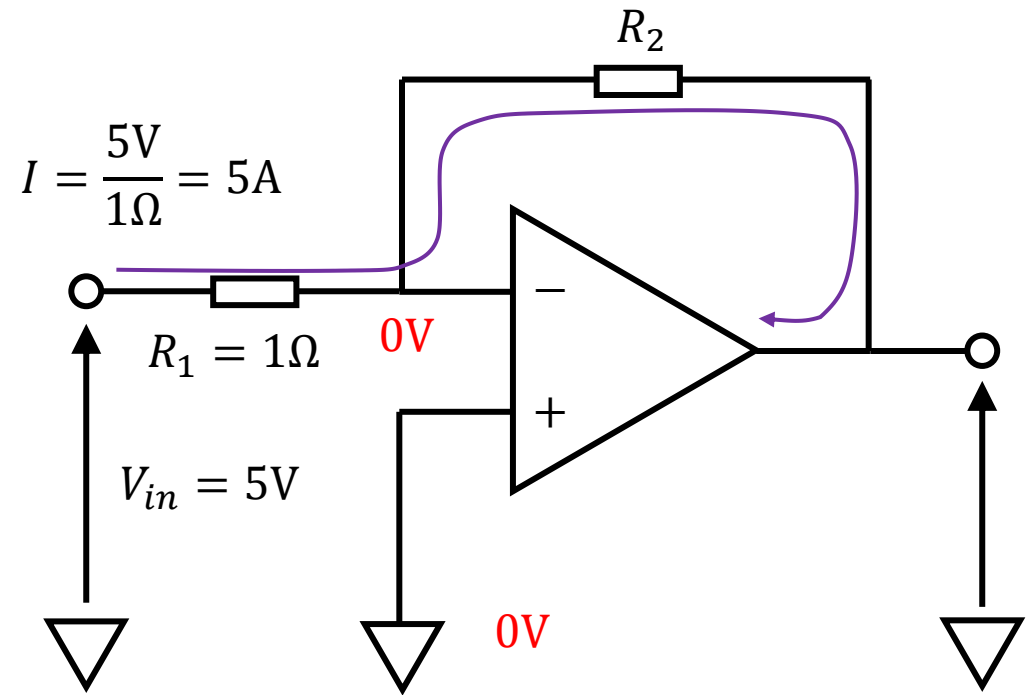
$$V_+ = V_-$$

$$R_{in} = \infty$$

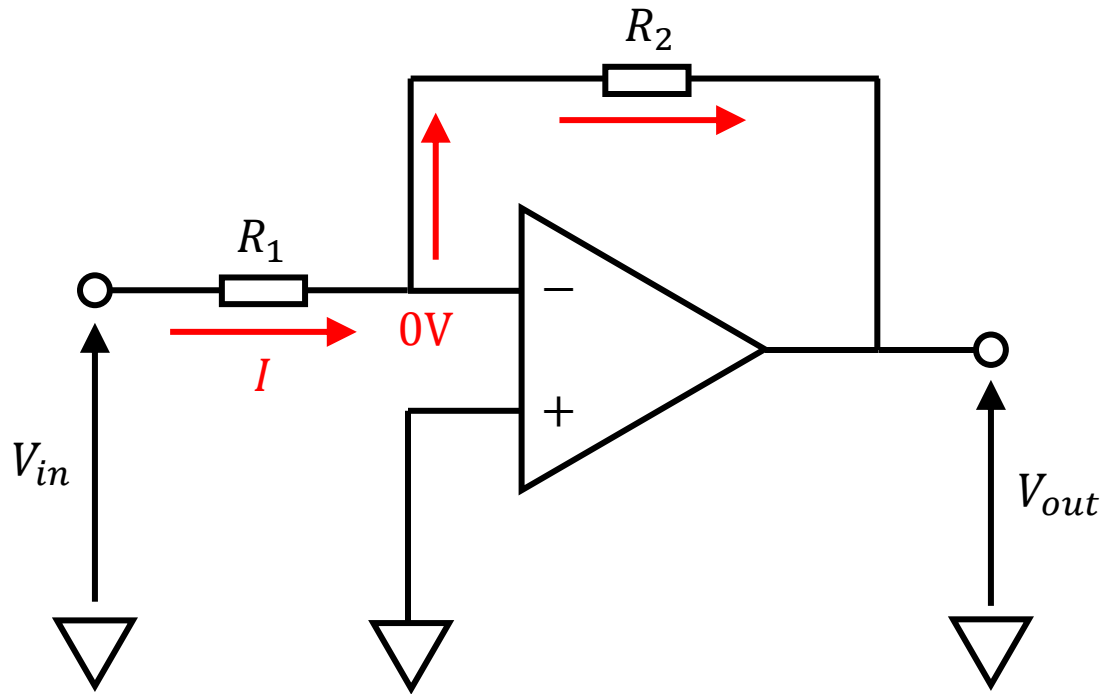
# イマジナリーショート



同じ電圧



# 反転増幅回路



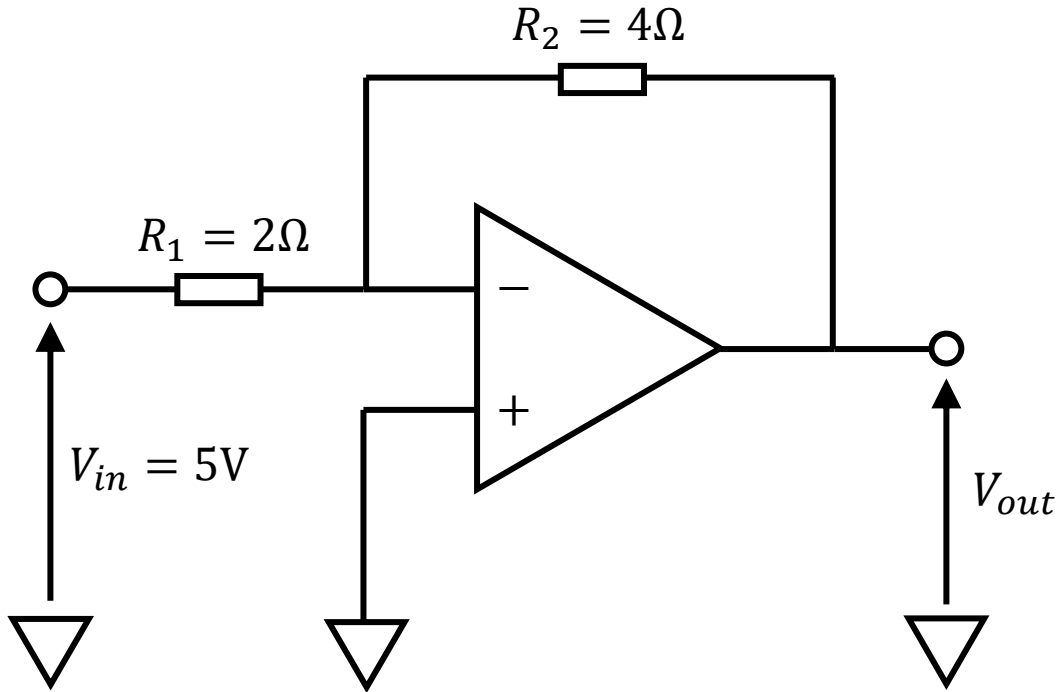
$$\frac{V_{in} - 0}{R_1} = \frac{0 - V_{out}}{R_2}$$

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

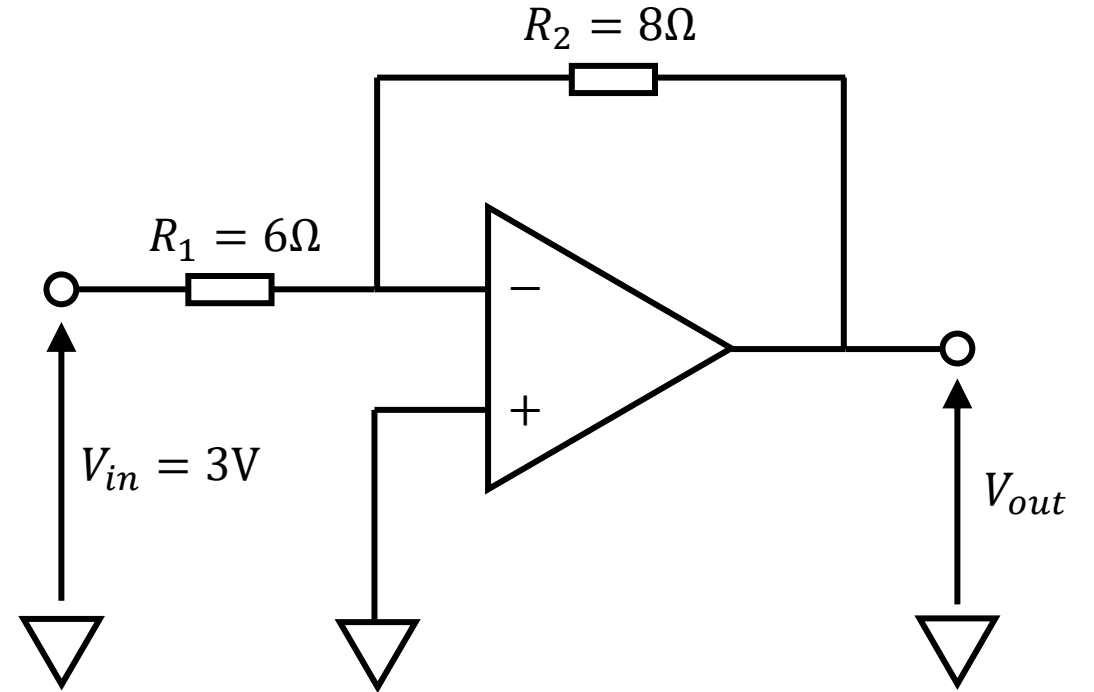
$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

# 例題 (反転増幅回路)

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



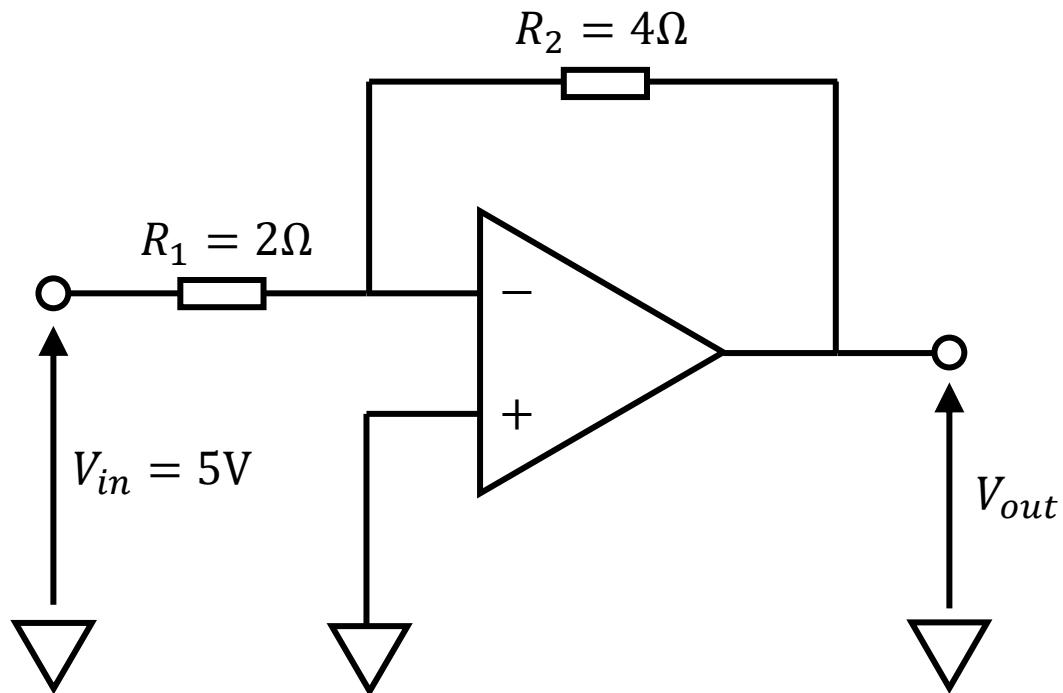
$$V_{out} =$$



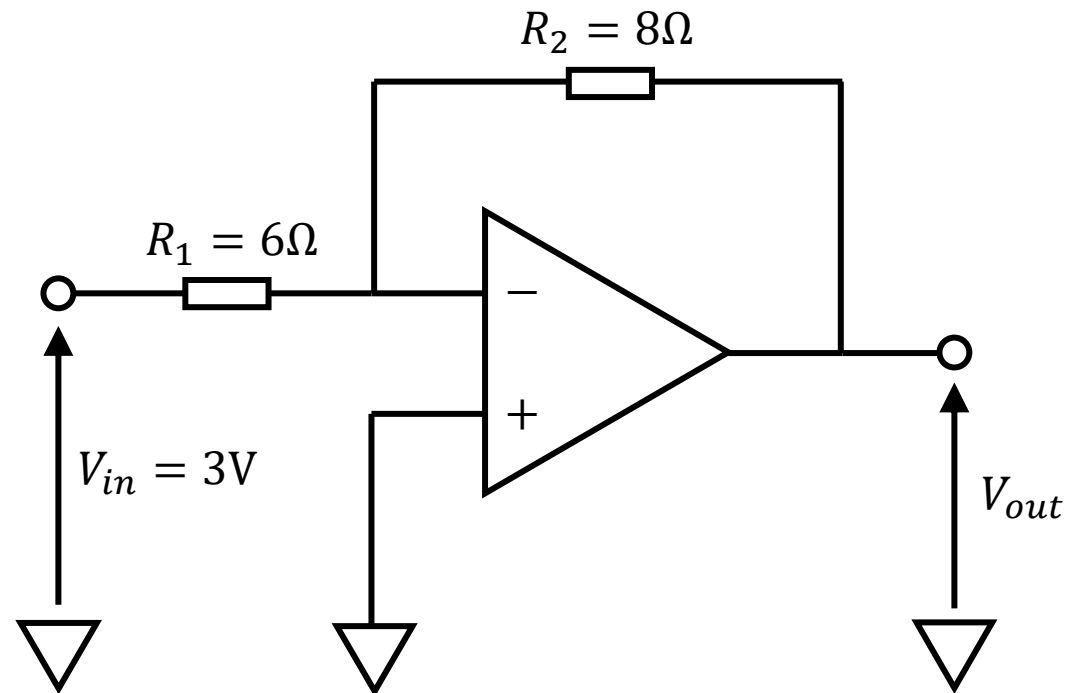
$$V_{out} =$$

# 例題 (反転増幅回路)

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

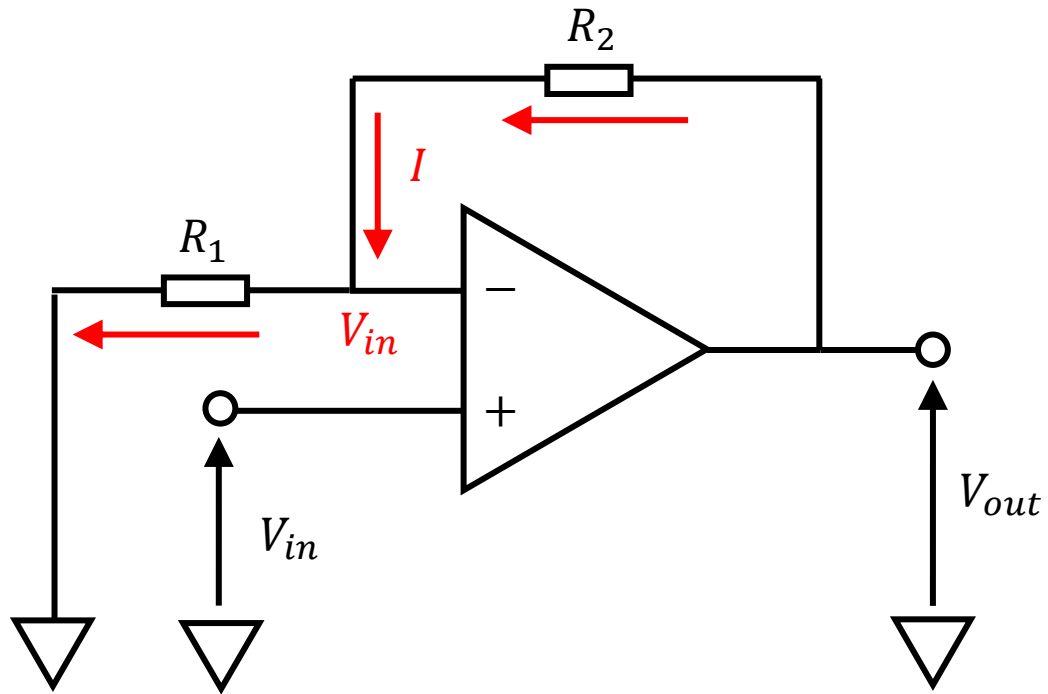


$$V_{out} = -\frac{4}{2} \times 5 = -10 \text{ V}$$



$$V_{out} = -\frac{8}{6} \times 3 = -4 \text{ V}$$

# 非反転増幅回路



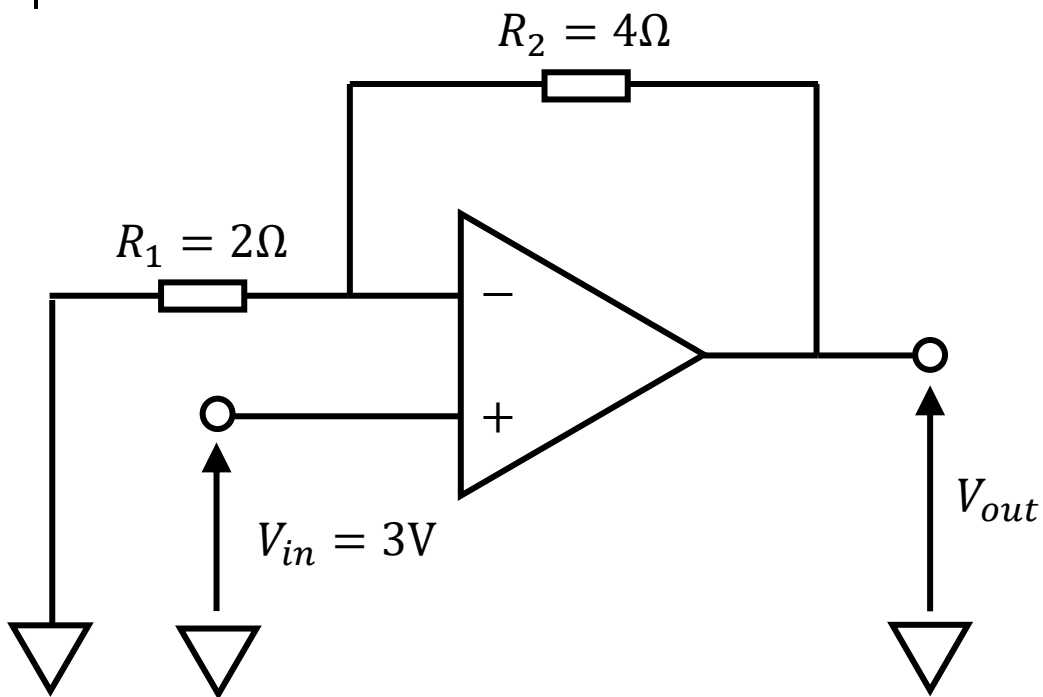
$$\frac{V_{in} - 0}{R_1} = \frac{V_{out} - V_{in}}{R_2}$$

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

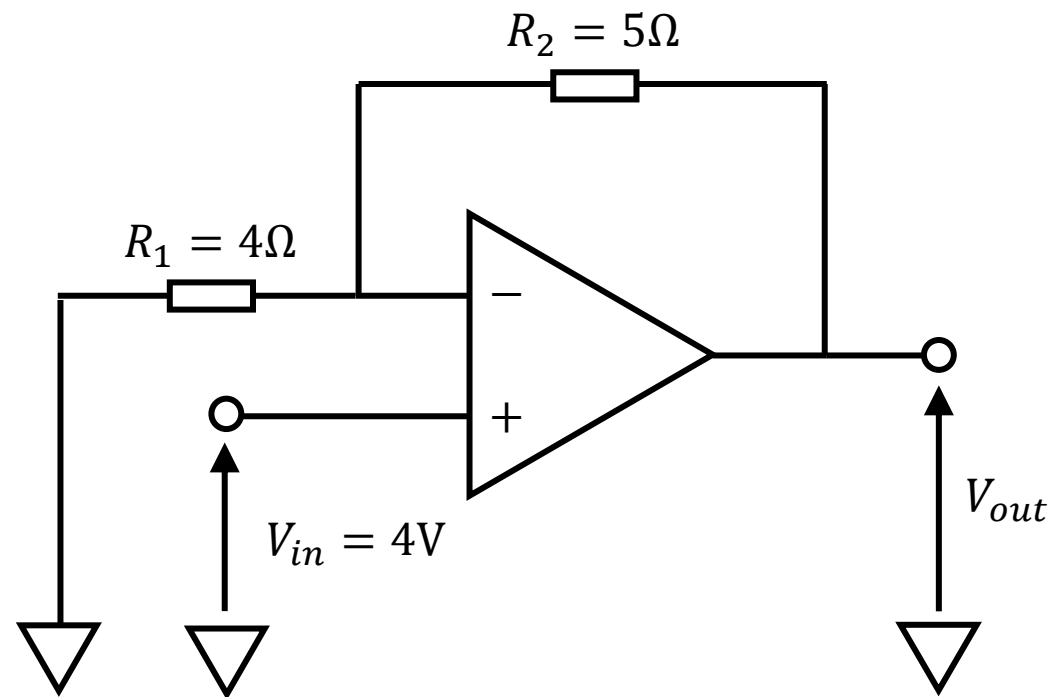
$$V_{out} = \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) V_{in}$$

# 例題 (非反転増幅回路)

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



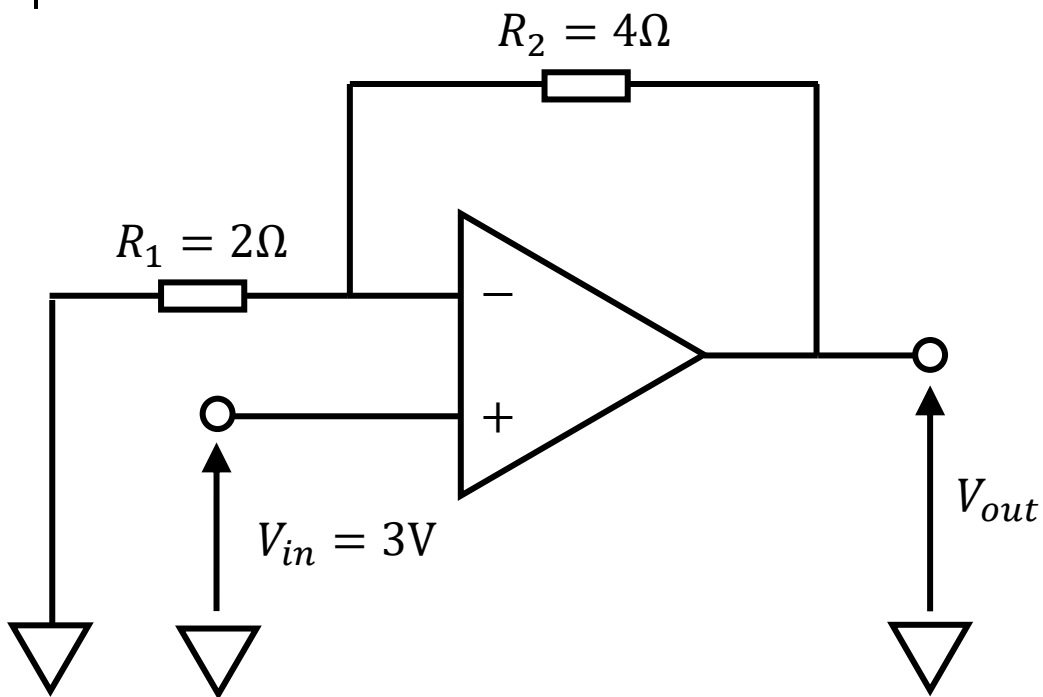
$V_{out} =$



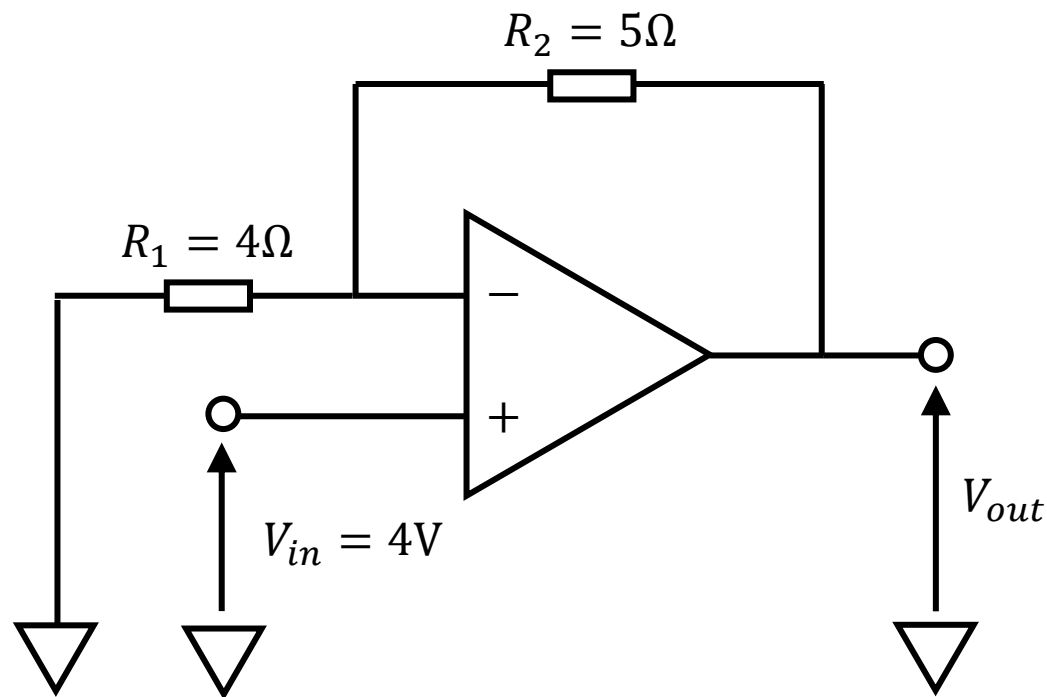
$V_{out} =$

# 例題 (非反転増幅回路)

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



$$V_{out} = \left( \frac{4}{2} + 1 \right) \times 3 = 9 \text{ V}$$



$$V_{out} = \left( \frac{5}{4} + 1 \right) \times 4 = \frac{9}{4} \times 4 = 9 \text{ V}$$



# H22 問18

(b) 図1及び図2のような直流増幅回路がある。それぞれの出力電圧  $V_{o1}$  [V],  $V_{o2}$  [V] の値として、正しいものを組み合わせたのは次のうちどれか。

ただし、演算増幅器は理想的なものとし、 $V_{i1} = 0.6$  [V] 及び  $V_{i2} = 0.45$  [V] は入力電圧である。

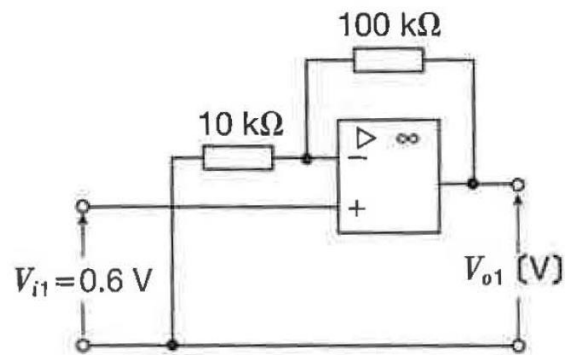


図1

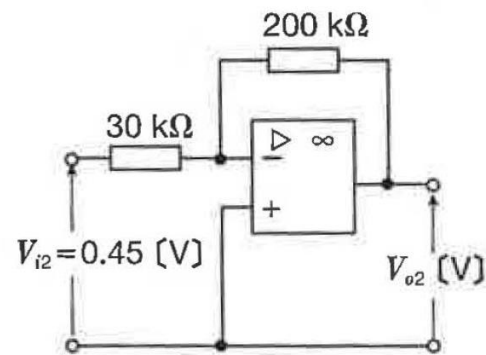


図2

	$V_{o1}$	$V_{o2}$
(1)	6.6	3.0
(2)	6.6	-3.0
(3)	-6.6	3.0
(4)	-4.5	9.0
(5)	4.5	-9.0

# H22 問18

(b) 図1及び図2のような直流増幅回路がある。それぞれの出力電圧  $V_{o1}$  [V],  $V_{o2}$  [V] の値として、正しいものを組み合わせたのは次のうちどれか。

ただし、演算増幅器は理想的なものとし、 $V_{i1} = 0.6$  [V] 及び  $V_{i2} = 0.45$  [V] は入力電圧である。

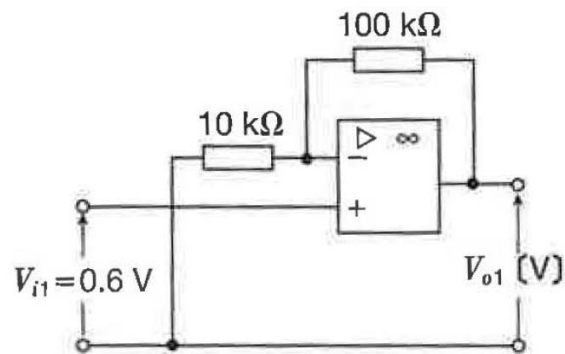


図1

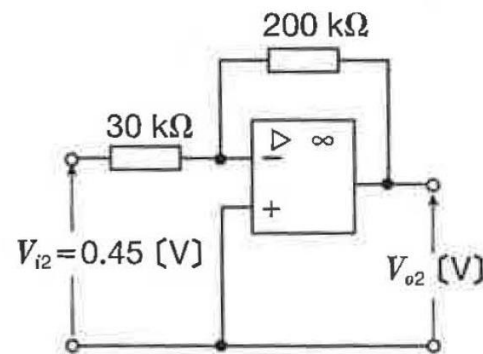


図2

$$V_{o1} = \left( \frac{100\text{k}}{10\text{k}} + 1 \right) \times 0.6 = 11 \times 0.6 = 6.6 \text{ V}$$

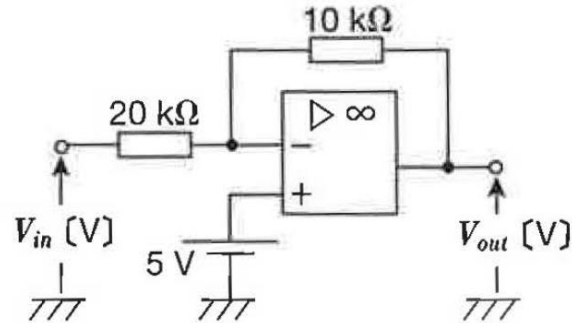
$$V_{o2} = -\frac{200\text{k}}{30\text{k}} \times 0.45 = -3 \text{ V}$$

	$V_{o1}$	$V_{o2}$
(1)	6.6	3.0
(2)	6.6	-3.0
(3)	-6.6	3.0
(4)	-4.5	9.0
(5)	4.5	-9.0

# H26 問13

図のような、演算増幅器を用いた能動回路がある。直流入力電圧  $V_{in}$  [V] が 3 V のとき、出力電圧  $V_{out}$  [V] として、最も近い  $V_{out}$  の値を次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

ただし、演算増幅器は、理想的なものとする。

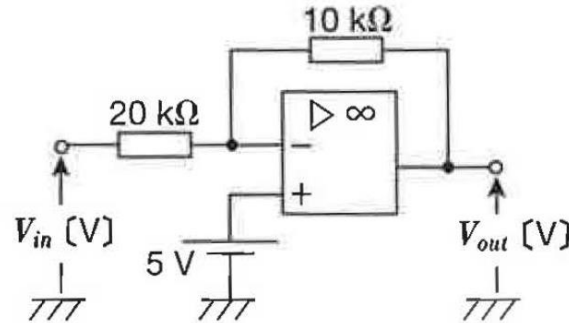


- (1) 1.5      (2) 5      (3) 5.5      (4) 6      (5) 6.5

# H26 問13

図のような、演算増幅器を用いた能動回路がある。直流入力電圧  $V_{in}$  [V] が 3 V のとき、出力電圧  $V_{out}$  [V] として、最も近い  $V_{out}$  の値を次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

ただし、演算増幅器は、理想的なものとする。



- (1) 1.5      (2) 5      (3) 5.5      (4) 6      (5) 6.5

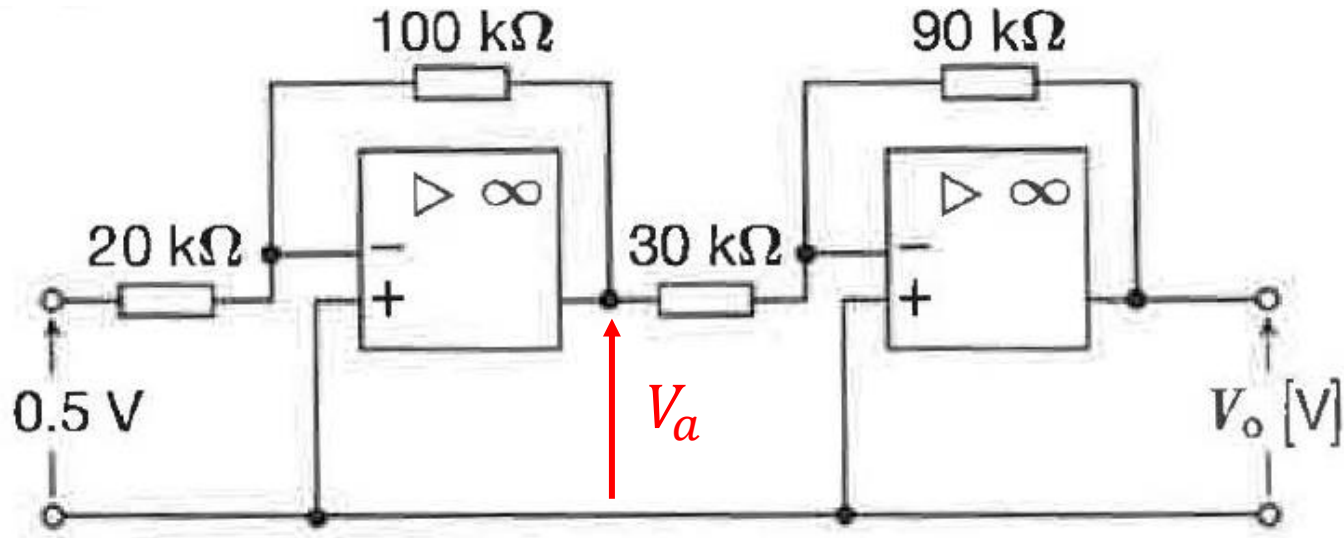
$$\frac{V_{in} - 5}{20k} = \frac{5 - V_{out}}{10k}$$

$$\frac{3 - 5}{20k} \times 10k = 5 - V_{out}$$

$$-1 = 5 - V_{out}$$

$$V_{out} = 6V$$

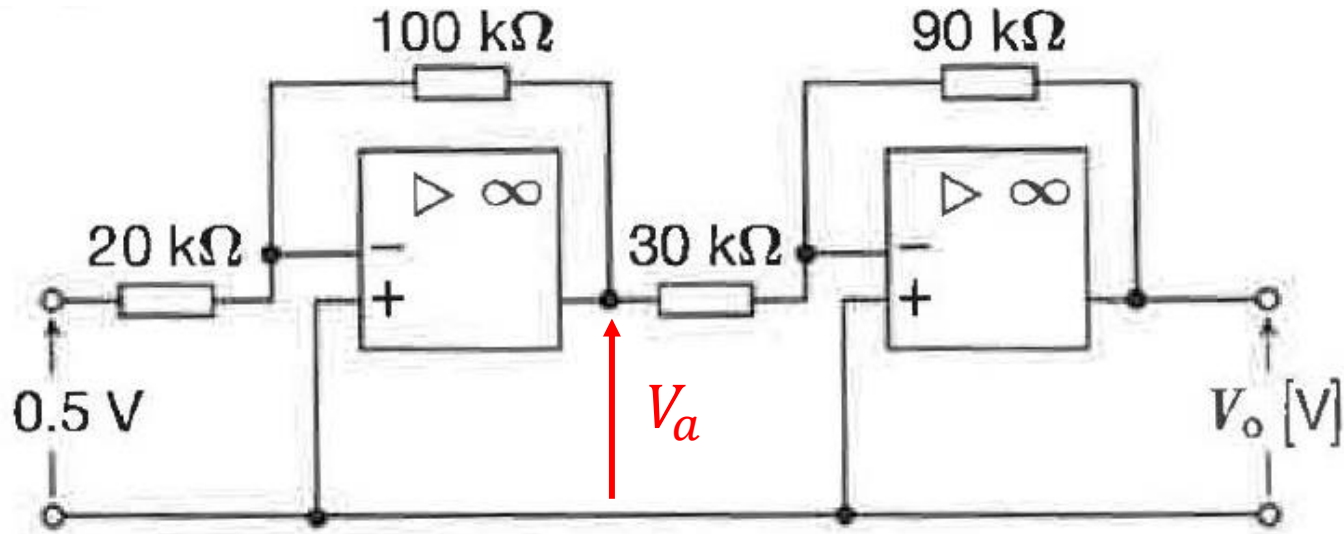
# H27 問18 (改)



$$V_a =$$

$$V_o =$$

# H27 問18 (改)

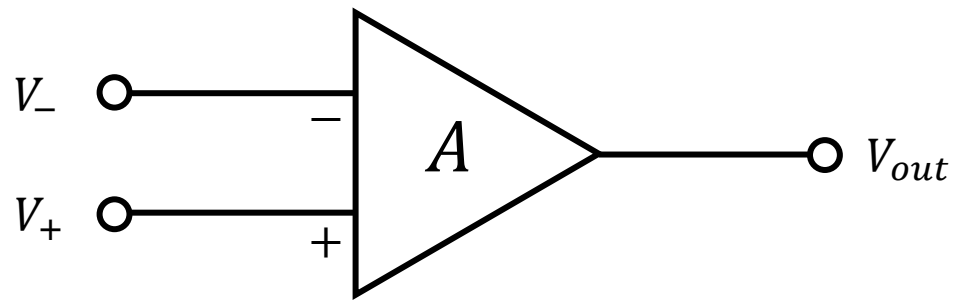


$$V_a = -\frac{100\text{k}}{20\text{k}} \times 0.5 = -2.5 \text{ V}$$

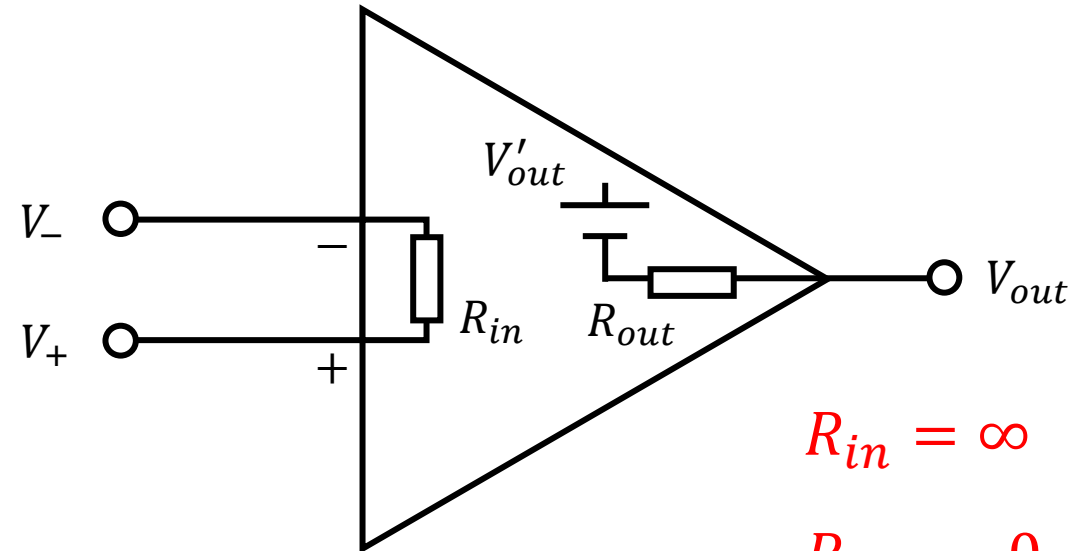
$$V_o = -\frac{90\text{k}}{30\text{k}} \times (-2.5) = 7.5 \text{ V}$$

# 演算増幅器 (オペアンプ)

- ・オペアンプは増幅率 $A$ がすごく大きい差動増幅回路
- ・入力インピーダンス $R_{in}$ が非常に大きい
- ・出力インピーダンス $R_{out}$ が非常に小さい



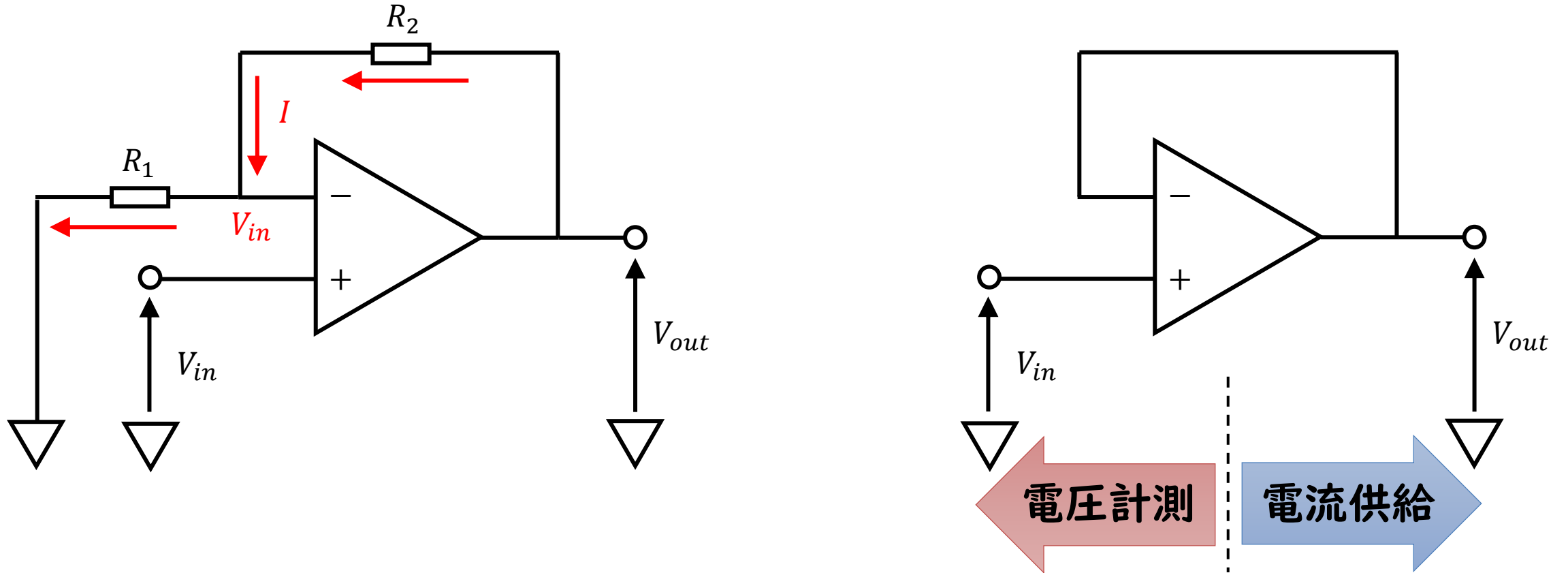
$$V_{out} = A(V_+ - V_-)$$



$$R_{in} = \infty$$

$$R_{out} \sim 0$$

# 非反転増幅回路 → ボルテージフォロワ



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

$$R_2 = 0$$

$$R_1 = \infty$$

$$V_{out} = V_{in}$$

$$R_{in} = \infty$$

$$R_{out} \sim 0$$



# H27 問18

問18 演算増幅器（オペアンプ）について、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) 演算増幅器は、その二つの入力端子に加えられた信号の  を高い利得で増幅する回路である。演算増幅器の入力インピーダンスは極めて  ため、入力端子電流は  とみなしてよい。一方、演算増幅器の出力インピーダンスは非常に  ため、その出力端子電圧は負荷による影響を  。さらに、演算増幅器は利得が非常に大きいため、抵抗などの部品を用いて負帰還をかけたときに安定した有限の電圧利得が得られる。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)、(ウ)、(エ)及び(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1) 差動成分	大きい	ほぼ零	小さい	受けにくい	受けにくい
(2) 差動成分	小さい	ほぼ零	大きい	受けやすい	受けやすい
(3) 差動成分	大きい	極めて大きな値	大きい	受けやすい	受けやすい
(4) 同相成分	大きい	ほぼ零	小さい	受けやすい	受けやすい
(5) 同相成分	小さい	極めて大きな値	大きい	受けにくい	受けにくい

# H27 問18

問18 演算増幅器（オペアンプ）について、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) 演算増幅器は、その二つの入力端子に加えられた信号の  を高い利得で増幅する回路である。演算増幅器の入力インピーダンスは極めて  ため、入力端子電流は  とみなしてよい。一方、演算増幅器の出力インピーダンスは非常に  ため、その出力端子電圧は負荷による影響を  。さらに、演算増幅器は利得が非常に大きいため、抵抗などの部品を用いて負帰還をかけたときに安定した有限の電圧利得が得られる。

上記の記述中の空白箇所(ア)、(イ)、(ウ)、(エ)及び(オ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)	(オ)
(1)	差動成分	大きい	ほぼ零	小さい	受けにくい
(2)	差動成分	小さい	ほぼ零	大きい	受けやすい
(3)	差動成分	大きい	極めて大きな値	大きい	受けやすい
(4)	同相成分	大きい	ほぼ零	小さい	受けやすい
(5)	同相成分	小さい	極めて大きな値	大きい	受けにくい

# R02 問13

問13 演算増幅器及びそれを用いた回路に関する記述として、誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 演算増幅器には電源が必要である。
- (2) 演算増幅器の入力インピーダンスは、非常に大きい。
- (3) 演算増幅器は比較器として用いられることがある。
- (4) 図1の回路は正相増幅回路、図2の回路は逆相増幅回路である。
- (5) 図1の回路は、抵抗 $R_S$ を $0\Omega$ に(短絡)し、抵抗 $R_F$ を $\infty\Omega$ に(開放)すると、ボルテージホロワである。

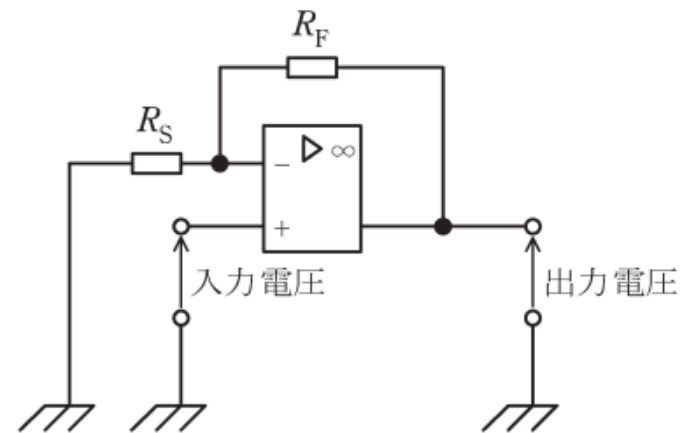


図1

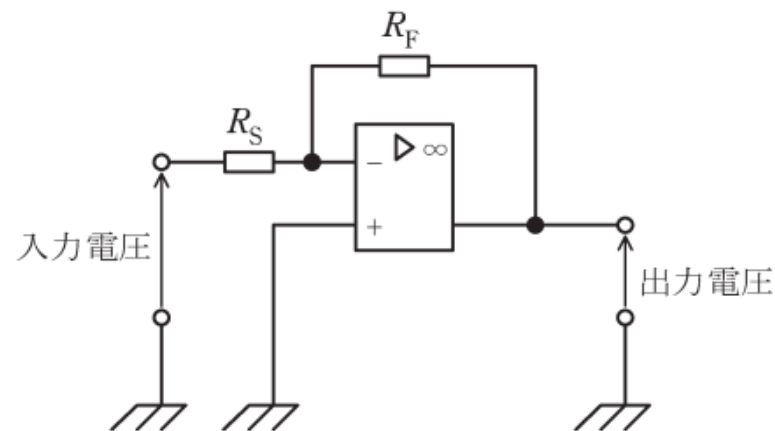


図2

# R02 問13

問 13 演算増幅器及びそれを用いた回路に関する記述として、誤っているものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 演算増幅器には電源が必要である。
- (2) 演算増幅器の入力インピーダンスは、非常に大きい。
- (3) 演算増幅器は比較器として用いられることがある。
- (4) 図1の回路は正相増幅回路、図2の回路は逆相増幅回路である。
- (5) 図1の回路は、抵抗  $R_S$  を  $0\Omega$  に(短絡)し、抵抗  $R_F$  を  $\infty\Omega$  に(開放)すると、ボルテージホロワである。

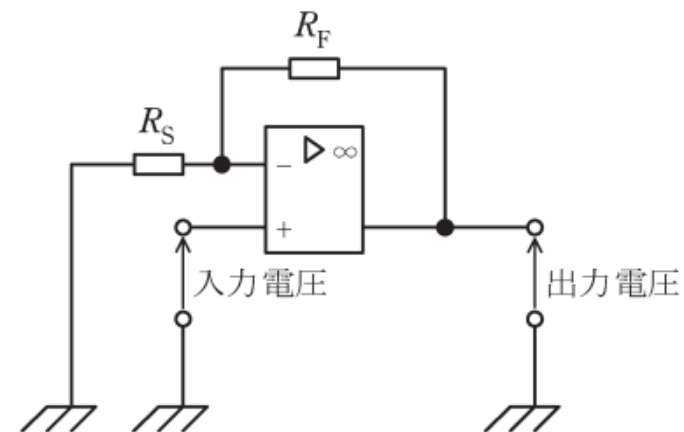


図 1

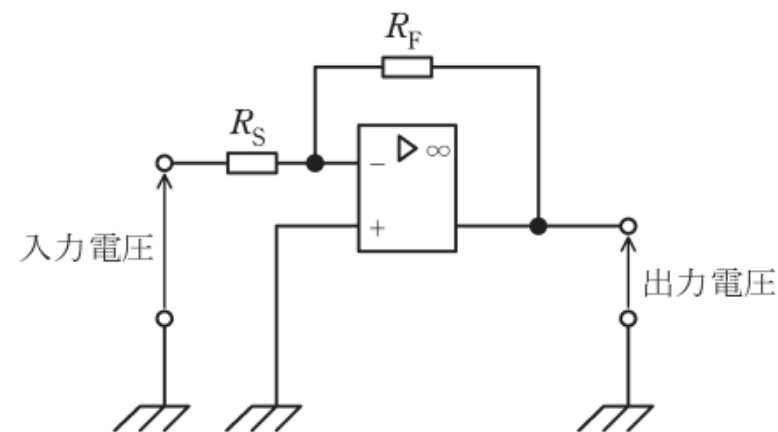


図 2

# トランジスタとは

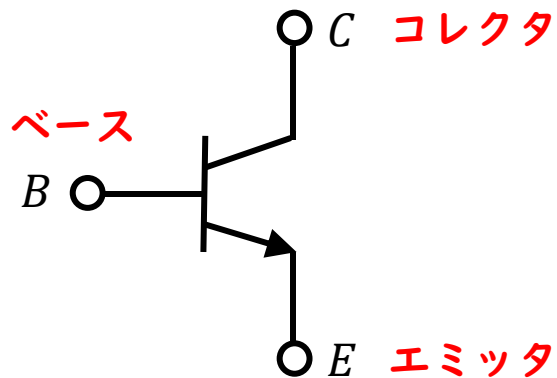
大きく分けて種類は2つ

- ・バイポーラトランジスタ (通称 トランジスタ)

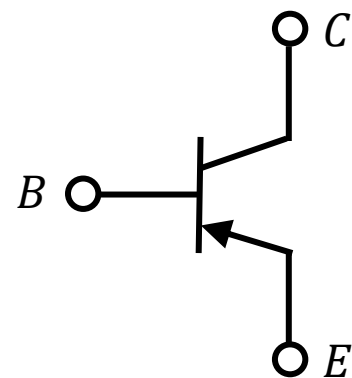
→ベースの**電流**により、コレクターエミッタ間の電流を制御する

- ・電界効果型トランジスタ (Field Effect Transistor) (通称 FET)

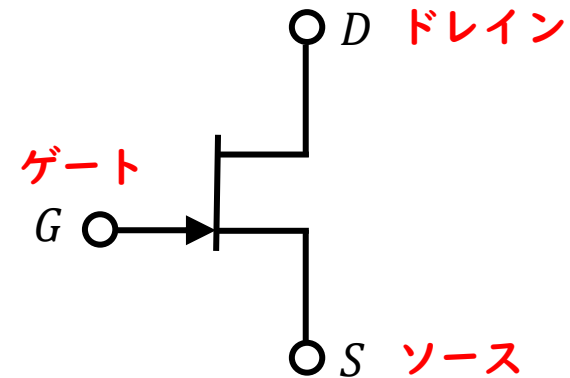
→ゲートの**電圧**により、ドレインソース間の電流を制御する



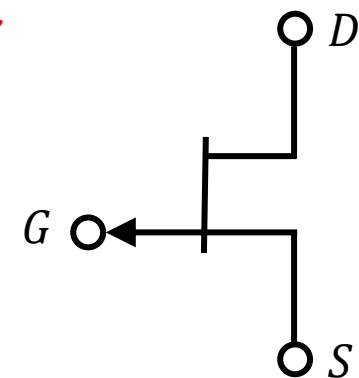
NPN トランジスタ



PNP トランジスタ



N-ch FET



P-ch FET

# トランジスタの動作

## ・バイポーラトランジスタ

$$I_B + I_C = I_E$$

$$I_B \ll I_C < I_E$$

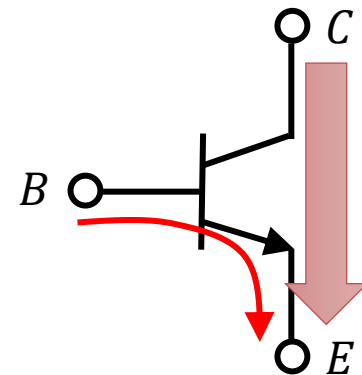
$I_B$  : ベース電流

$I_C$  : コレクタ電流

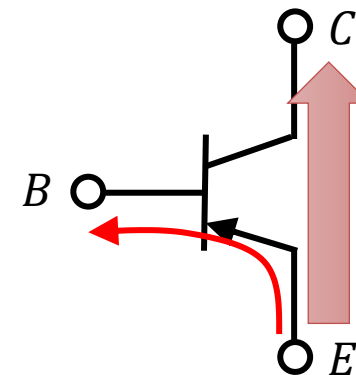
$I_E$  : エミッタ電流

## NPNトランジスタ

ベースとコレクタからエミッタへ電流が流れる



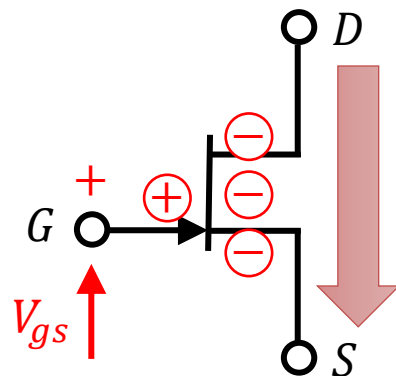
NPNトランジスタ



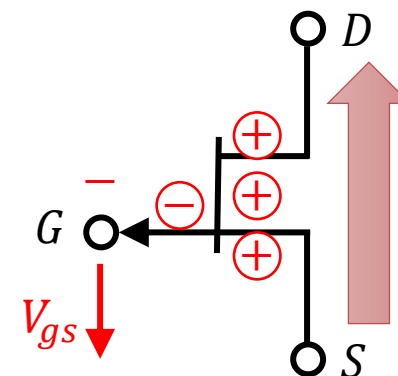
PNPトランジスタ

## PNPトランジスタ

エミッタからベースとコレクタへ電流が流れる



N-ch FET



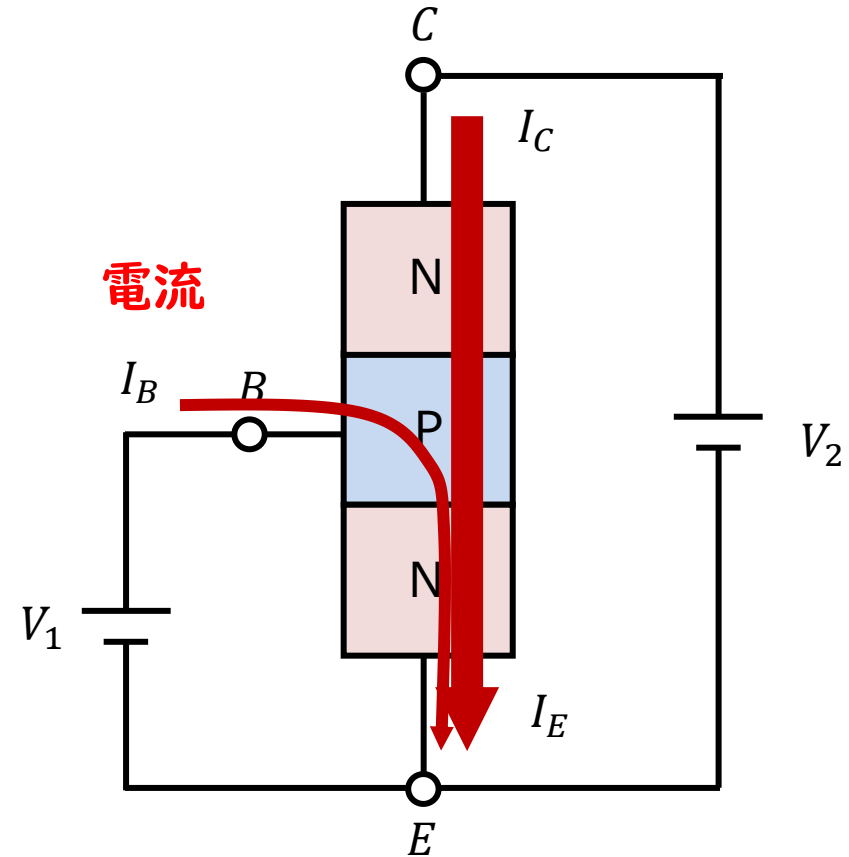
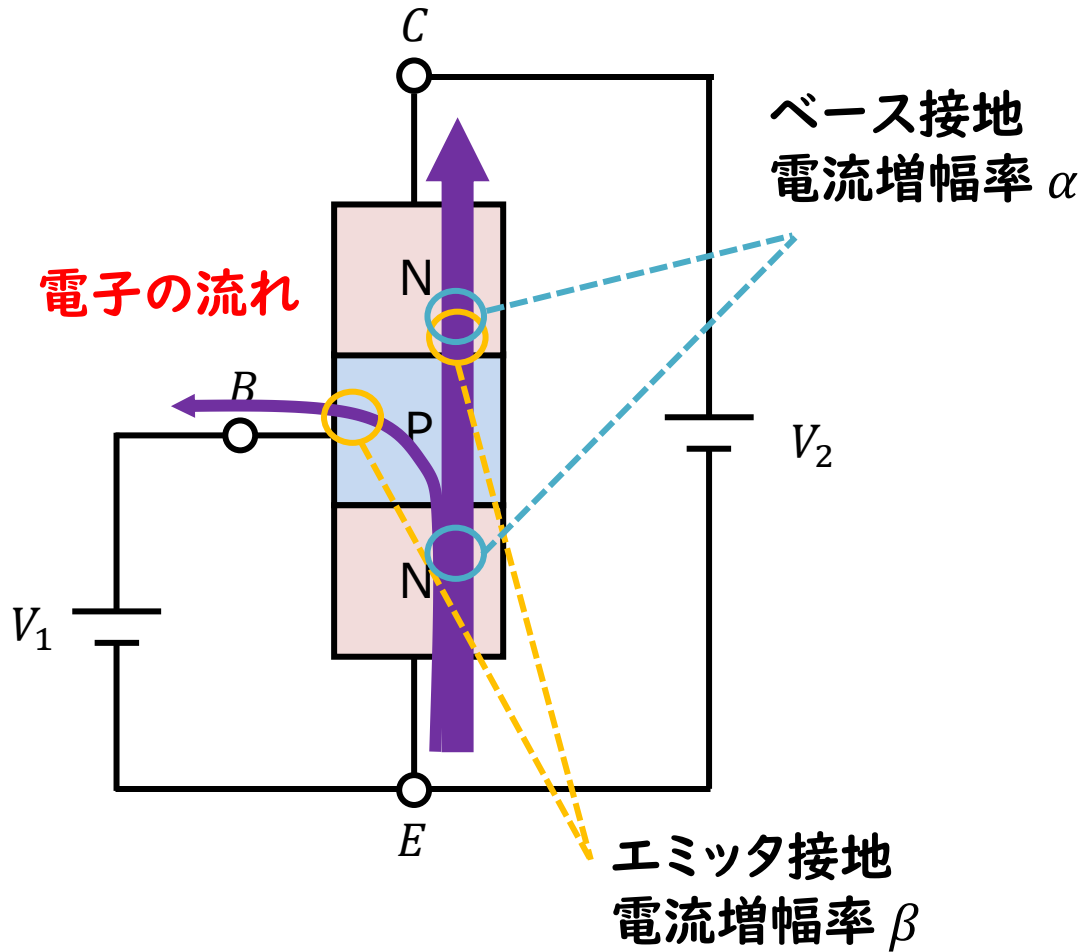
P-ch FET

## ・電界効果型トランジスタ

N-ch FET: 電子の道を作る ( $V_{gs} > 0$ )

P-ch FET: 正孔の道を作る ( $V_{gs} < 0$ )

# トランジスタ回路の動作の仕組み



$$I_E = I_B + I_C$$

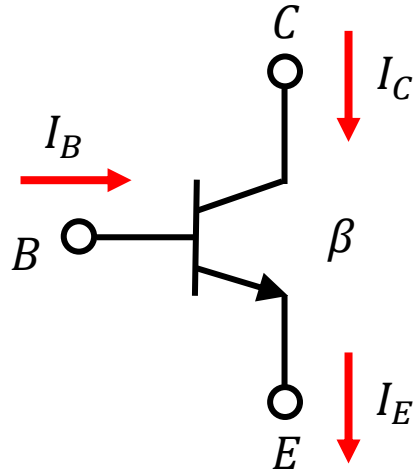
$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = \alpha I_E$$

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$$

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

# トランジスタ回路の基本動作



$$I_B + I_C = I_E$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (\beta = 50 \sim 200)$$

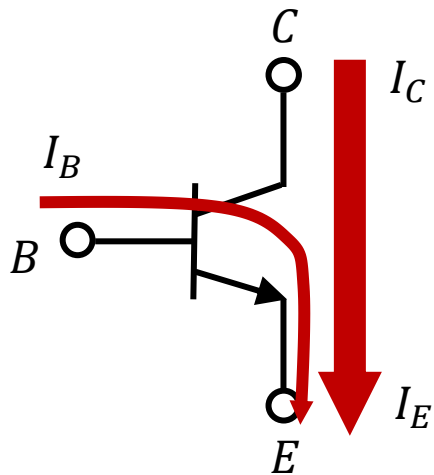
$$I_B \ll I_C < I_E$$

$I_B$  : ベース電流

$I_C$  : コレクタ電流

$I_E$  : エミッタ電流

$\beta$  : (エミッタ接地) 電流増幅率



小さいベース電流が流れると、  
電流増幅率 $\beta$ で決まる大きなコレクタ電流が流れる。  
2つの電流はエミッタで合流する。

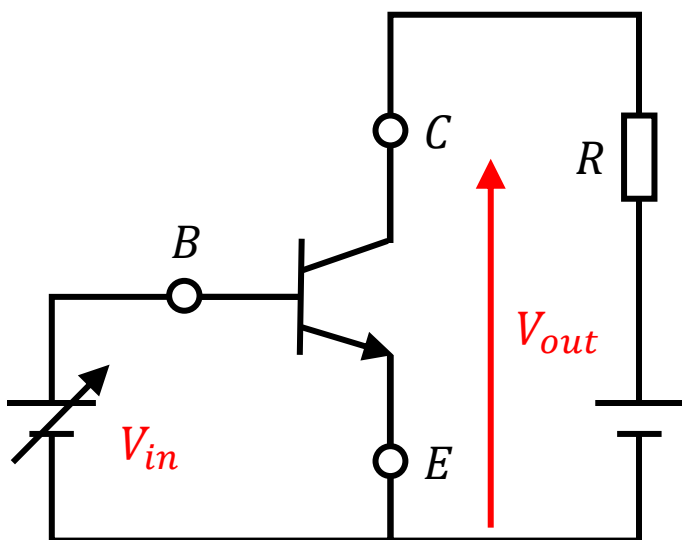


# トランジスタ回路の種類

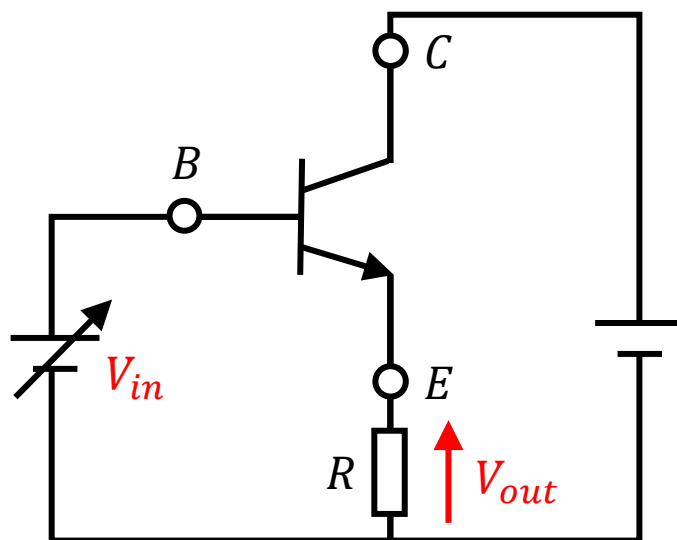
大きく分けて3種類

最もよく使うのはエミッタ接地。続いてコレクタ接地。

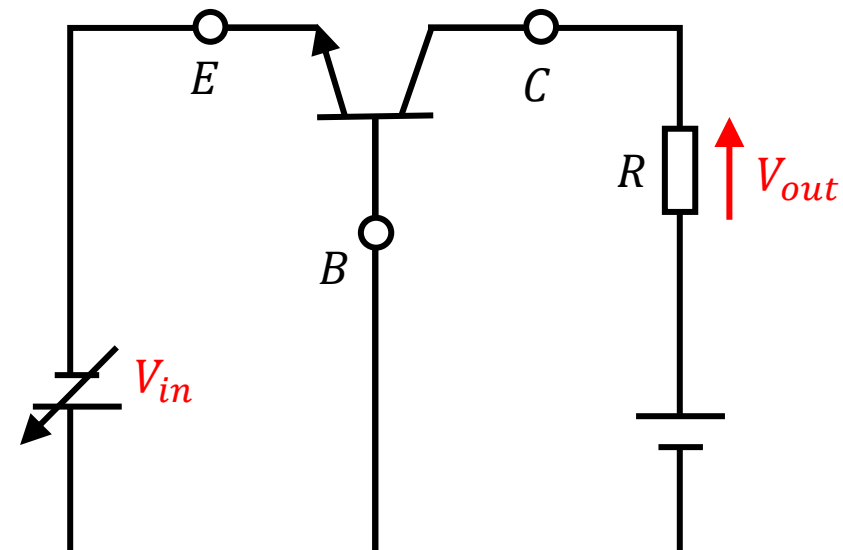
(ベース接地はほとんど使わない)



エミッタ接地



コレクタ接地

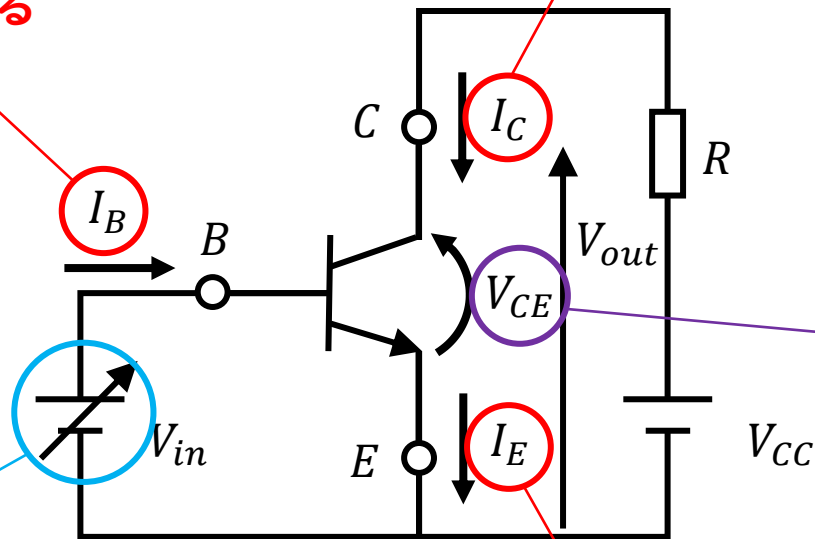


ベース接地

# $V_{in}$ と $V_{out}$ の関係

ベース電流  $I_B$  によりコレクタ電流  $I_C$  が決まる  
( $I_C = \beta I_B$  の関係でコレクタ電流が決まる)

$V_{in}$  によりベース電流  $I_B$  が決まる

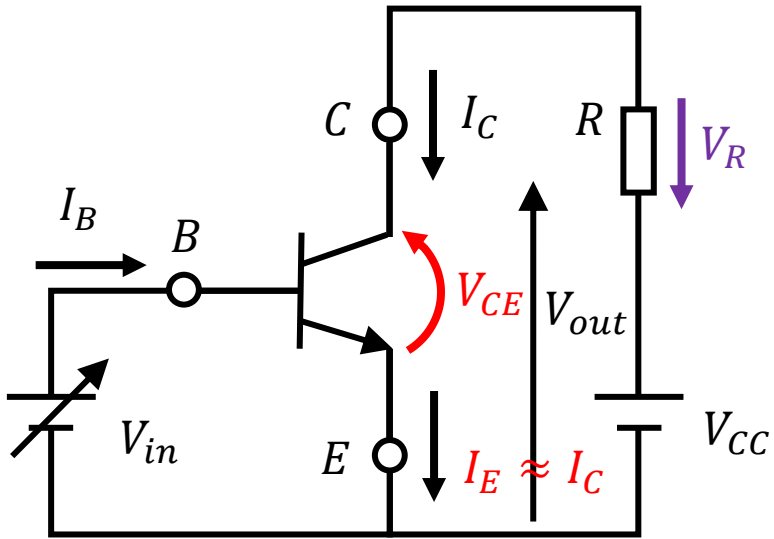


$V_{CE}$  の振る舞いについて考える

$V_{in}$  がベース電流  $I_B$  を決める

$I_E = I_B + I_C$  の関係があるが、 $I_B \ll I_C$ ,  $I_E$  の関係より、 $I_E = I_C$  と考えることが多い

# $V_{CE}$ の役割



$$V_{CC} = V_{out} + V_R$$

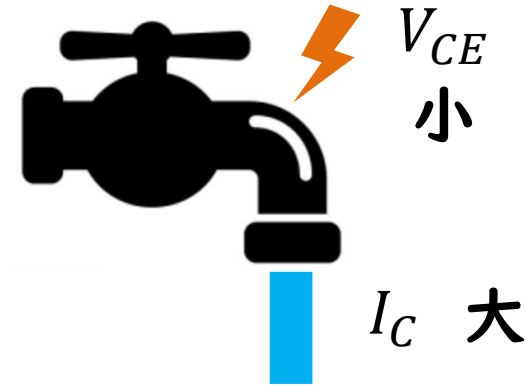
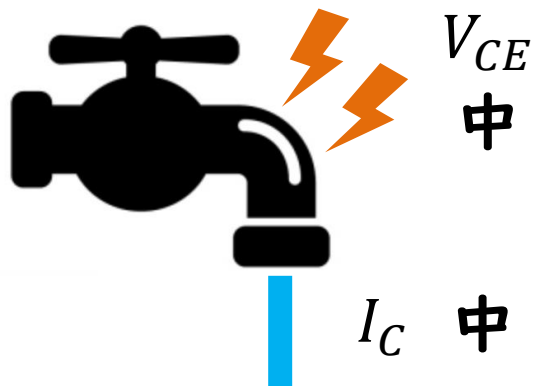
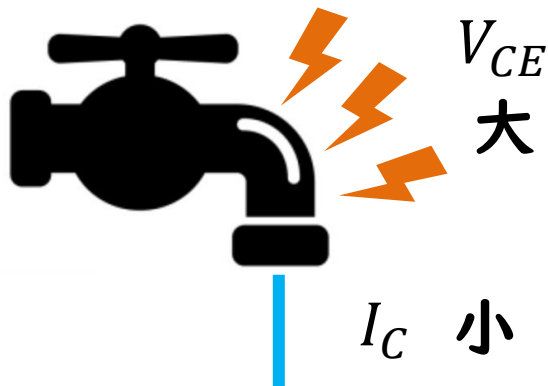
$$V_{out} = V_{CE}$$

$$I_C = \beta I_B$$

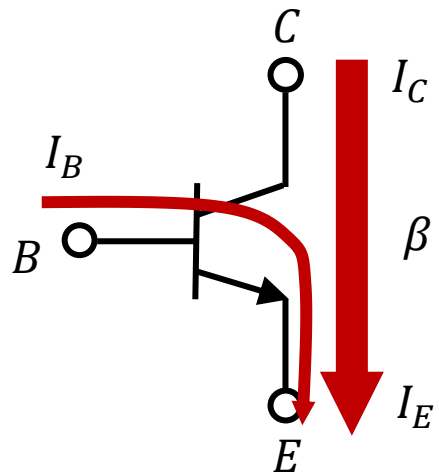
$$V_{CE} = V_{CC} - V_R$$

$$= V_{CC} - RI_C$$

$$= V_{CC} - R\beta I_B$$



# トランジスタ回路の基本動作



$$I_B + I_C = I_E$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \quad (\beta = 50 \sim 200)$$

$$I_B \ll I_C < I_E$$

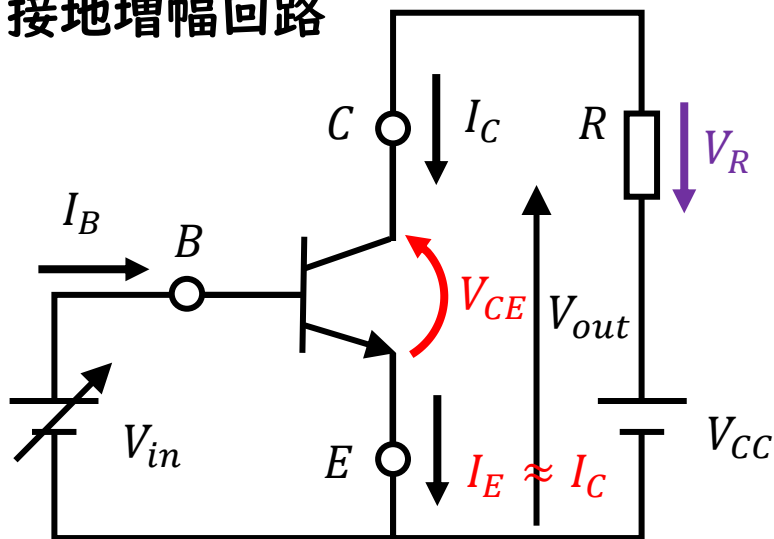
$I_B$  : ベース電流

$I_C$  : コレクタ電流

$I_E$  : エミッタ電流

$\beta$  : (エミッタ接地) 電流増幅率

## エミッタ接地増幅回路



$$V_{CC} = V_R + V_{CE}$$

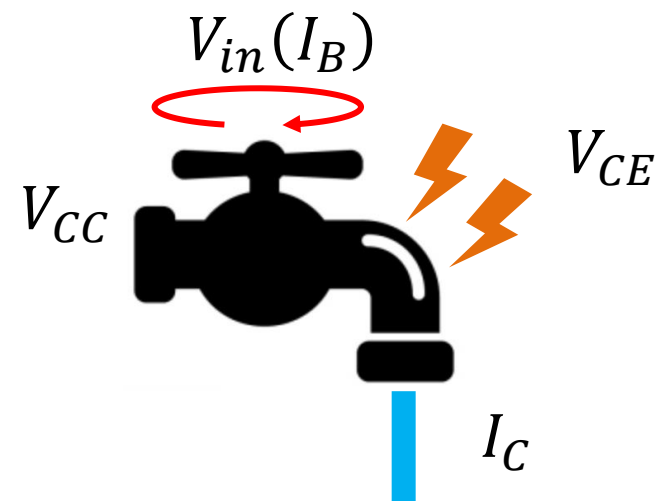
$$V_{out} = V_{CE}$$

$$I_C = \beta I_B$$

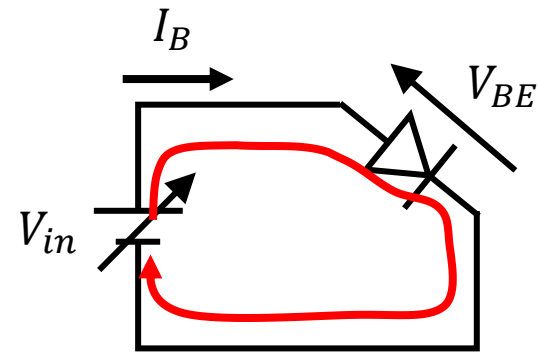
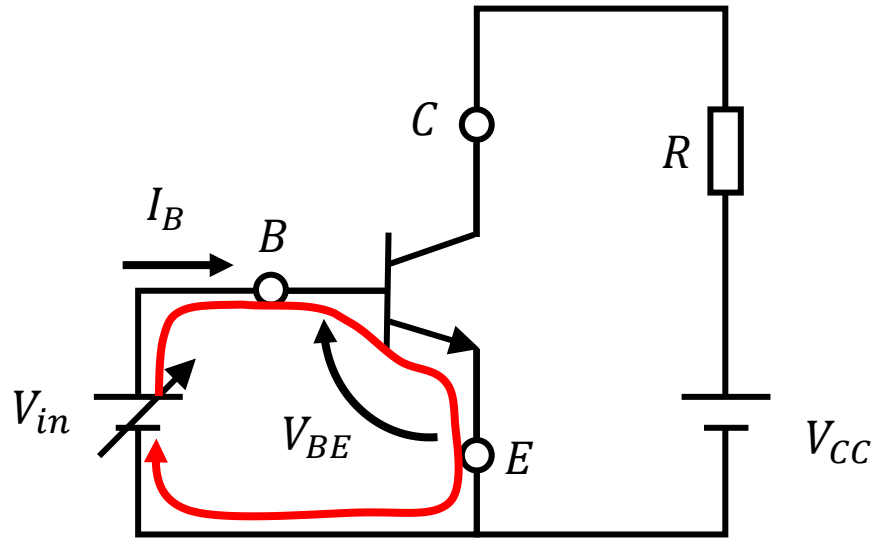
$$V_{CE} = V_{CC} - V_R$$

$$= V_{CC} - R I_C$$

$$= V_{CC} - R \beta I_B$$

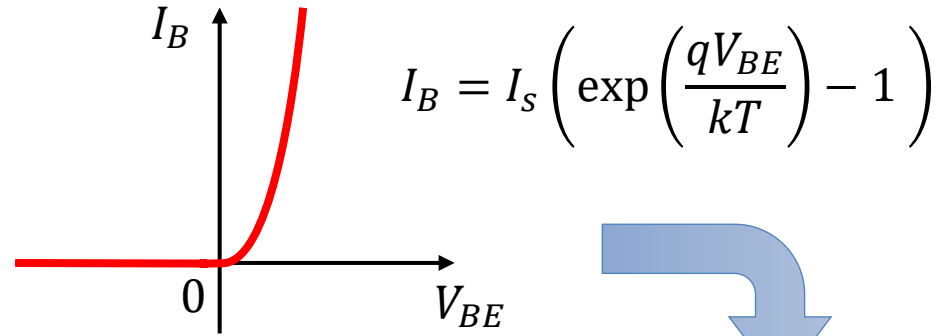


# $V_{in}$ と $I_B$ の関係

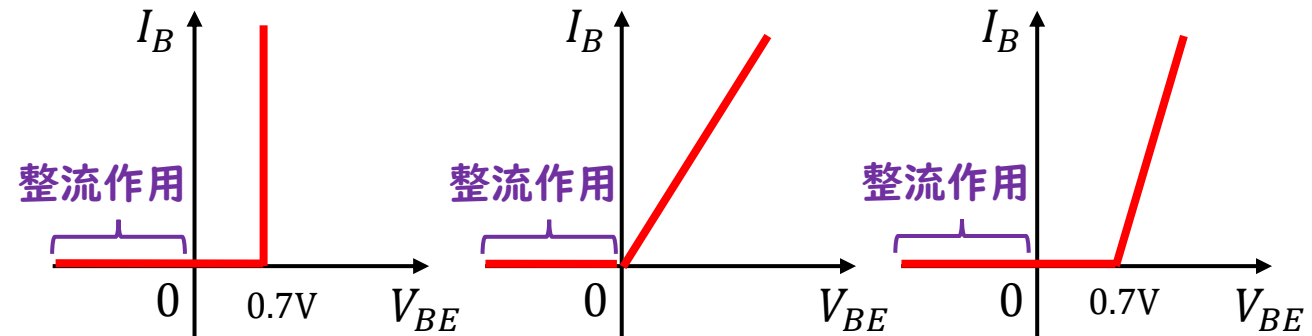


$V_{BE}$  はダイオードの  
順方向にかかる電圧

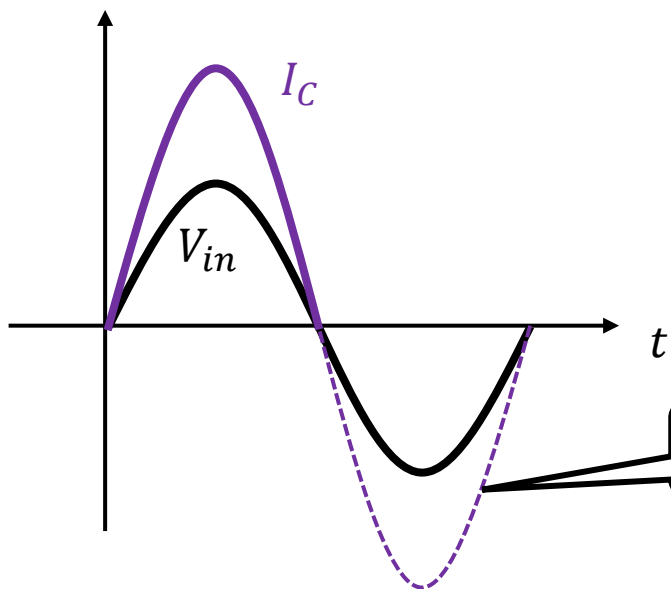
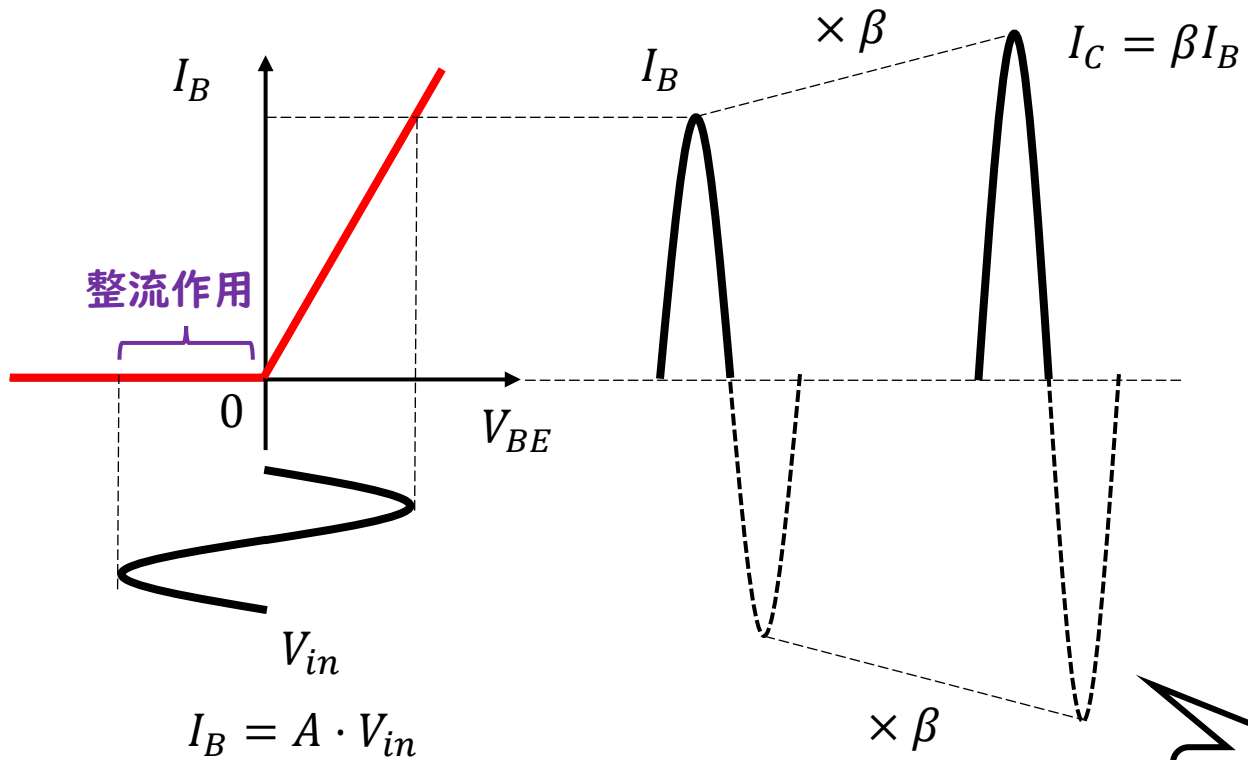
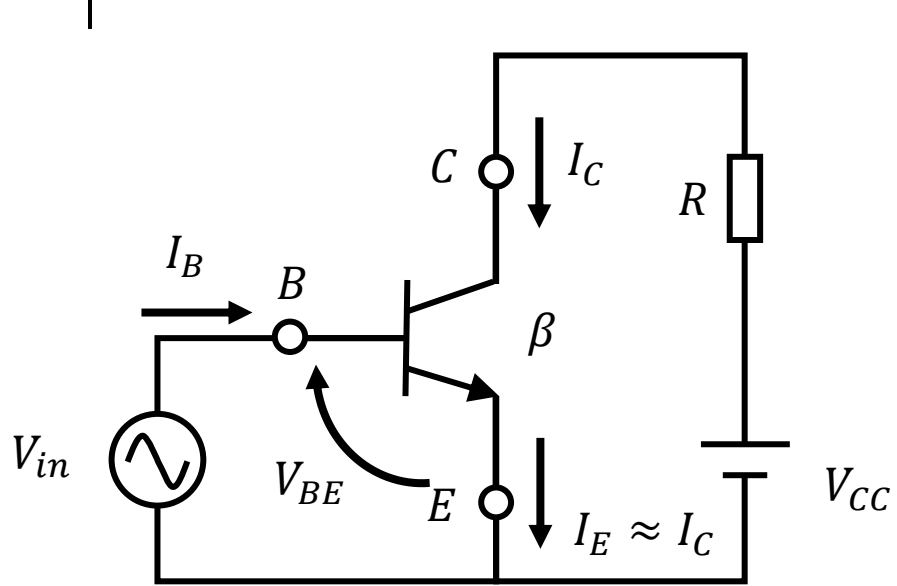
## ダイオードのI-V特性



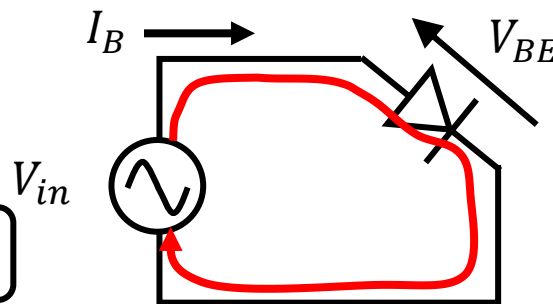
## トランジスタ回路で用いるI-V特性 (近似)



# 入力信号を交流にすると



**ICは半分欠ける**



**半分欠ける**

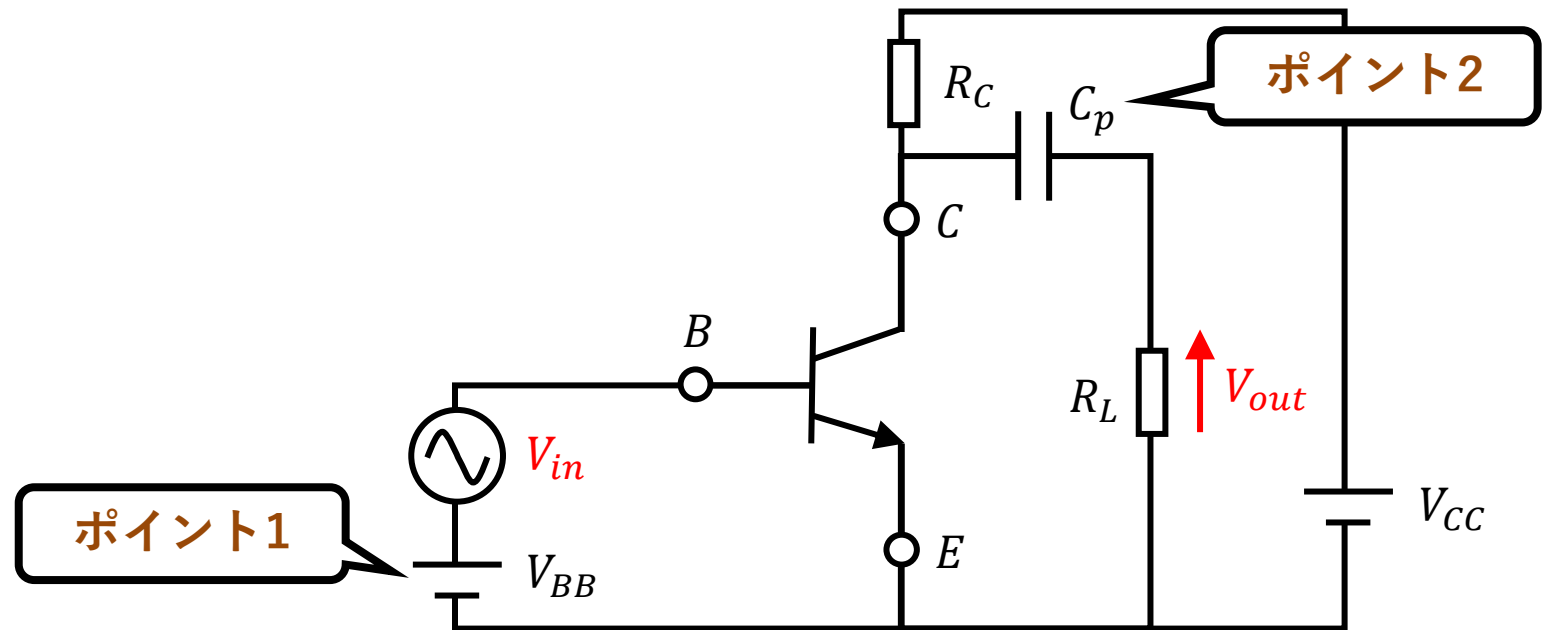
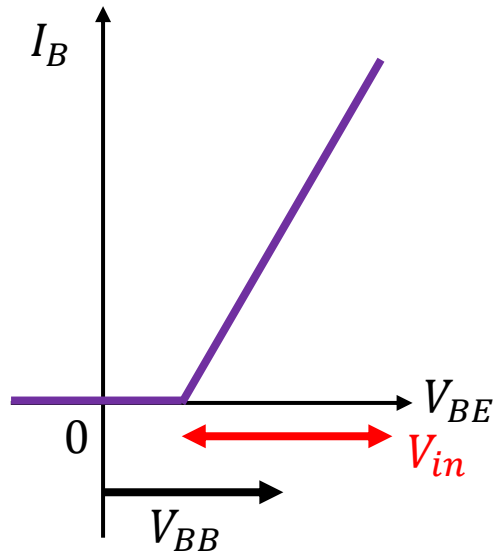
# トランジスタ交流増幅回路

交流信号の増幅回路について考える

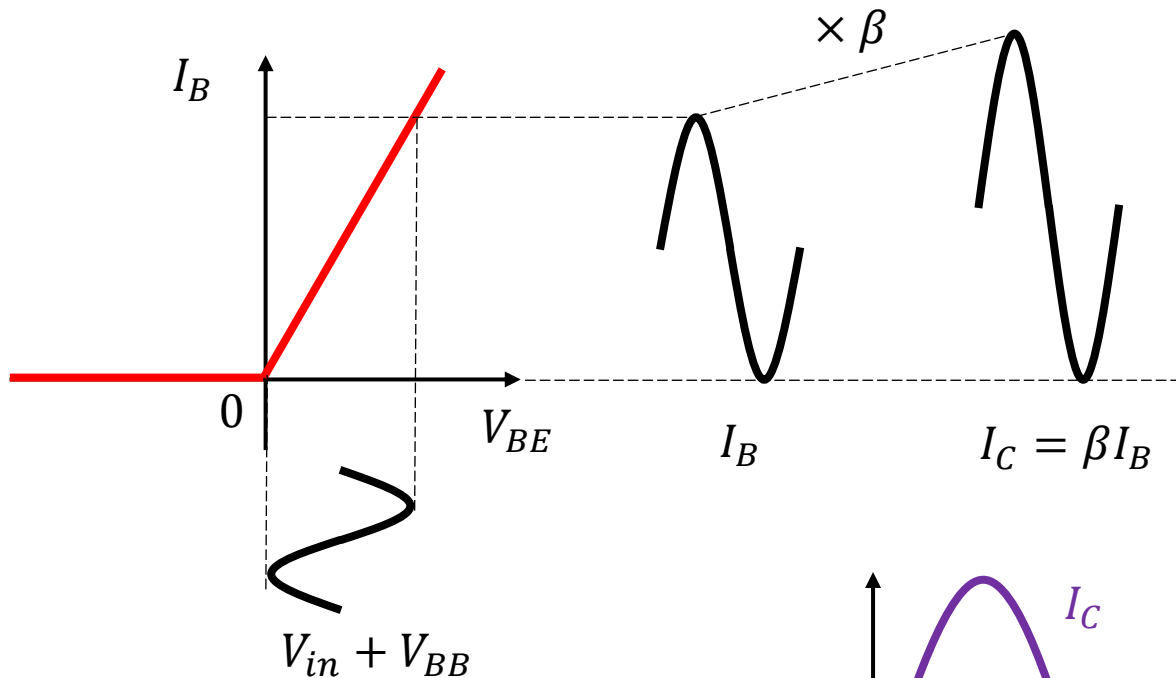
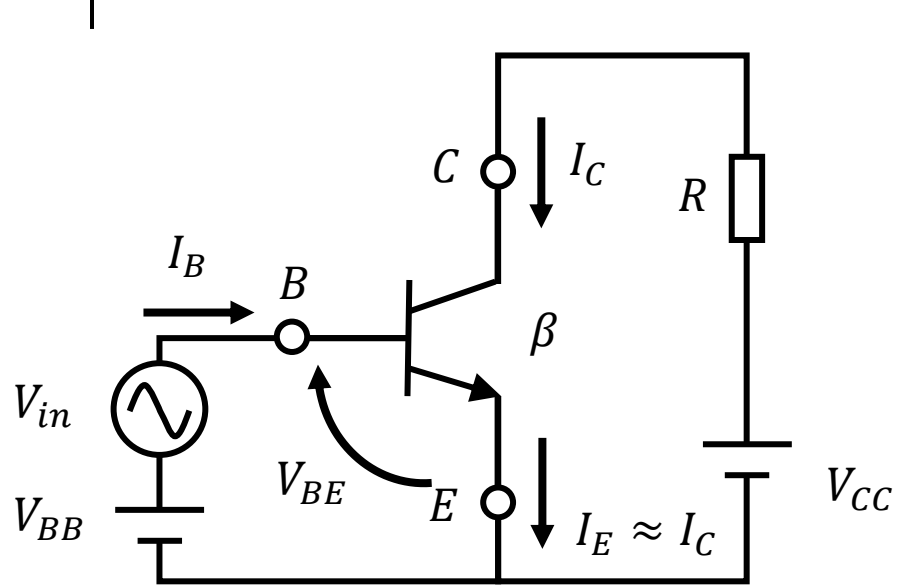
ポイント1: 入力電圧に下駄をはかせる (バイアスする) ための直流電圧  $V_{BB}$

ポイント2: 交流信号を取り出すためのコンデンサ  $C_p$

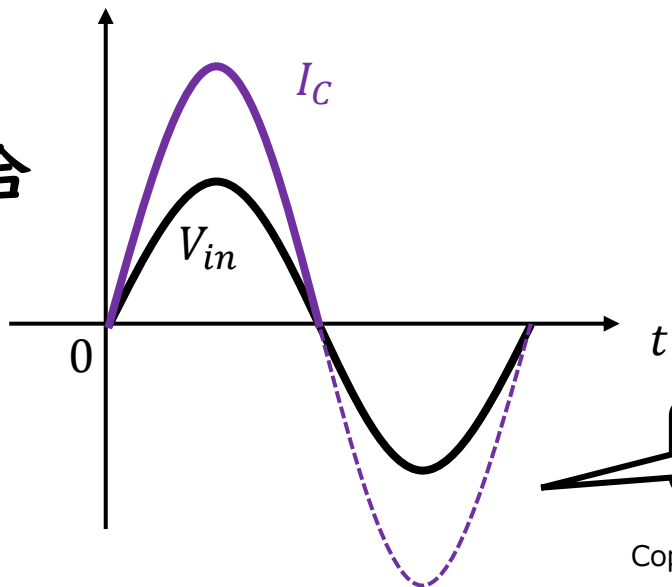
B-E間のI-V特性



# 入力信号を交流+直流にすると

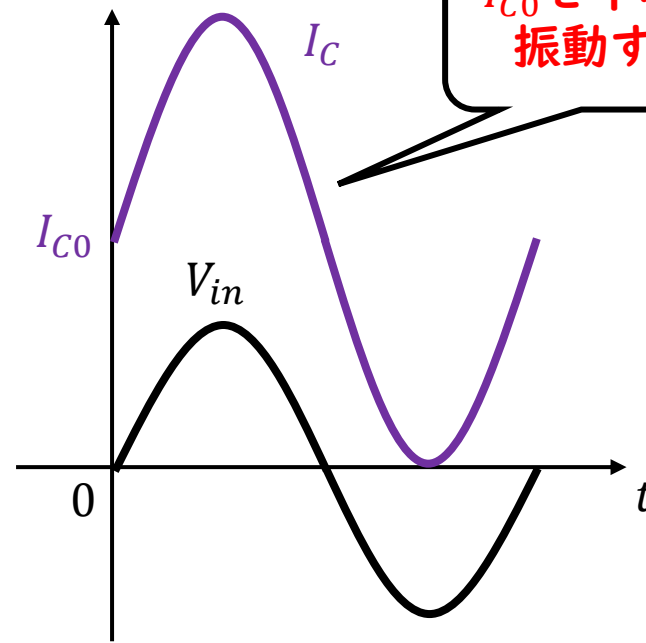


$V_{BB}$ がない場合



半分欠ける

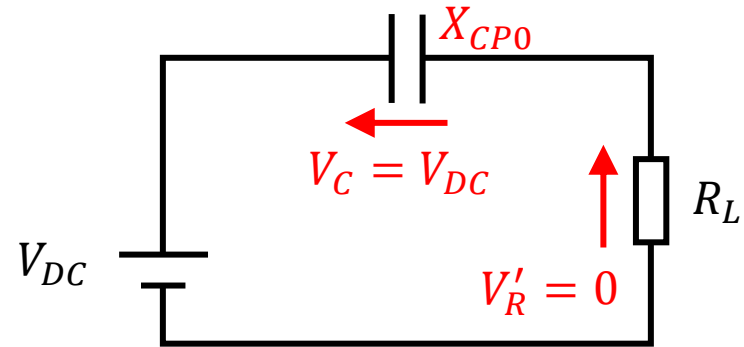
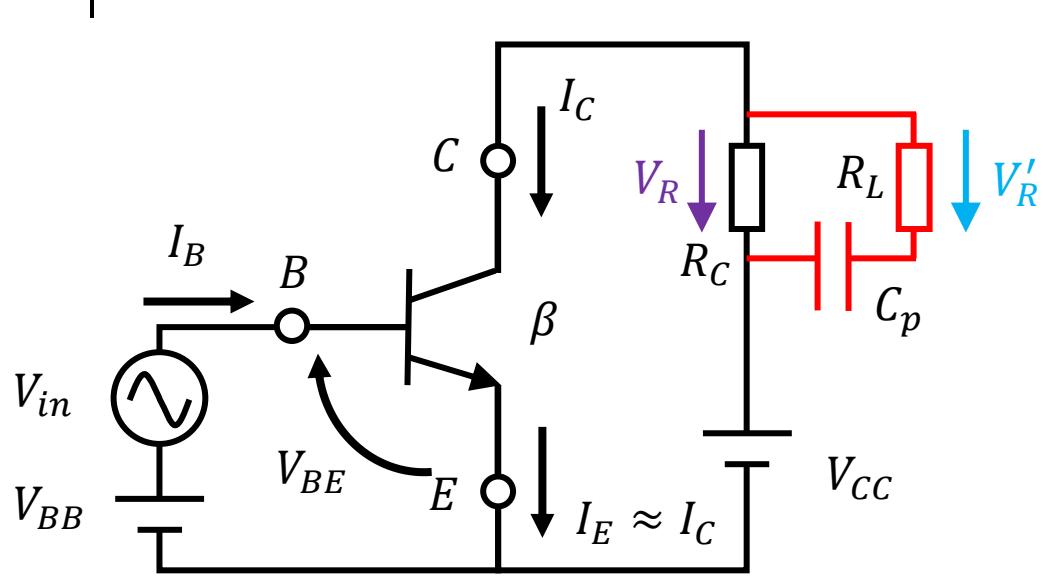
$V_{BB}$ がある場合



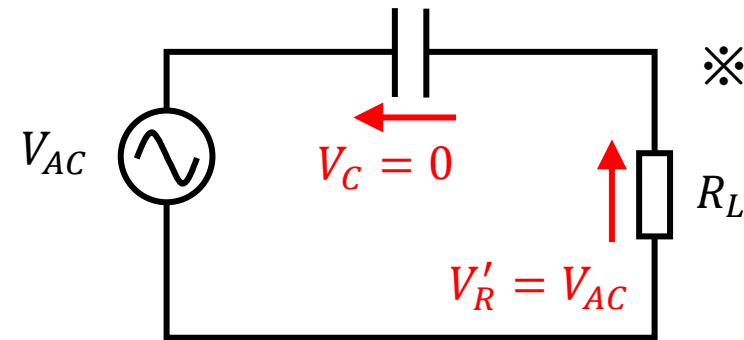
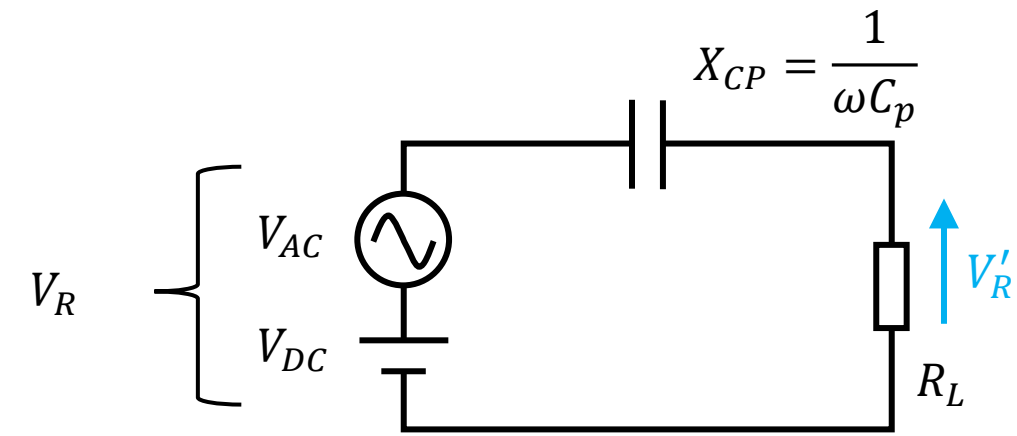
$I_{C0}$ を中心に  
振動する



# 交流成分のみを取り出すために

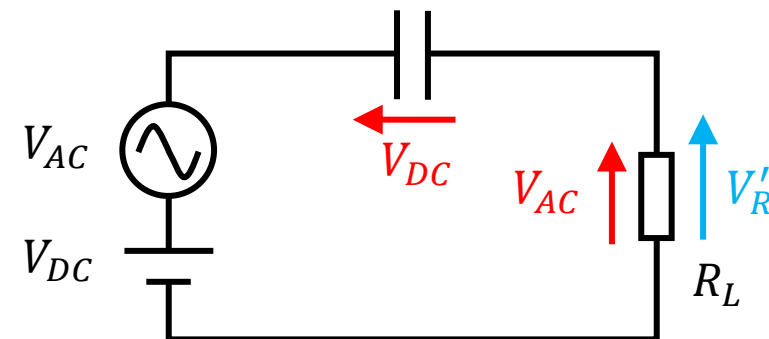


$$X_{CP0} = \frac{1}{0 \times C_p} = \infty$$



※ $C_p, \omega$ が十分大きい場合

$$X_{CP} = \frac{1}{\omega C_p} = 0$$

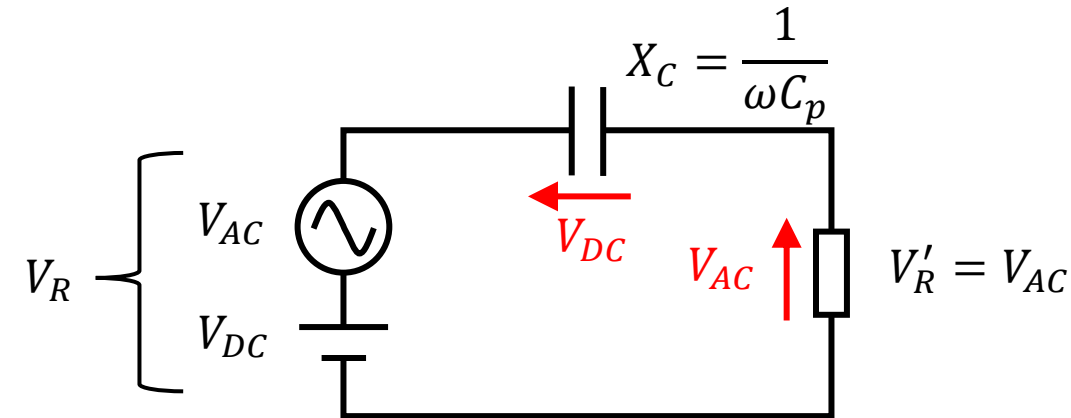
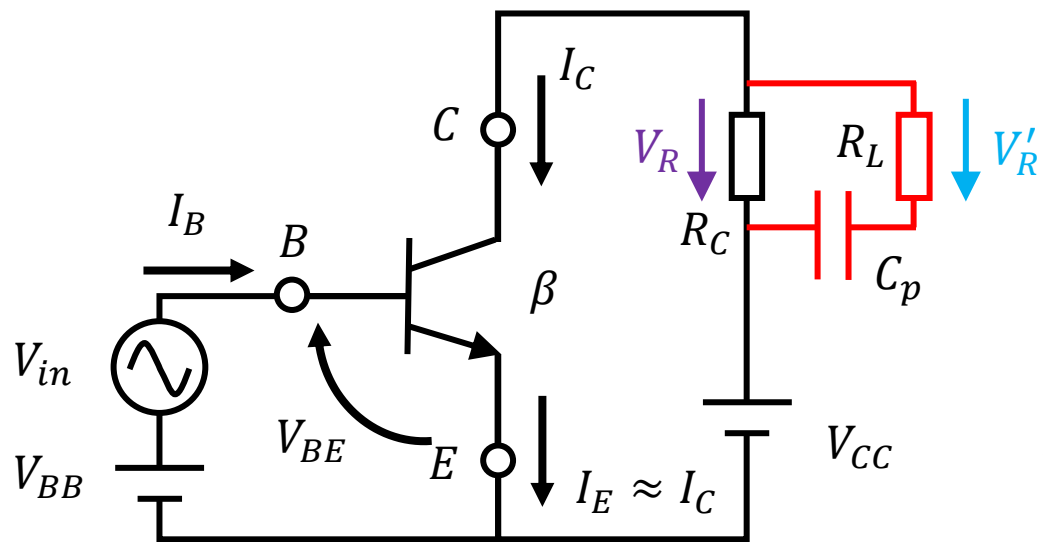


$$V_R = V_{AC} + V_{DC}$$

$$\downarrow$$

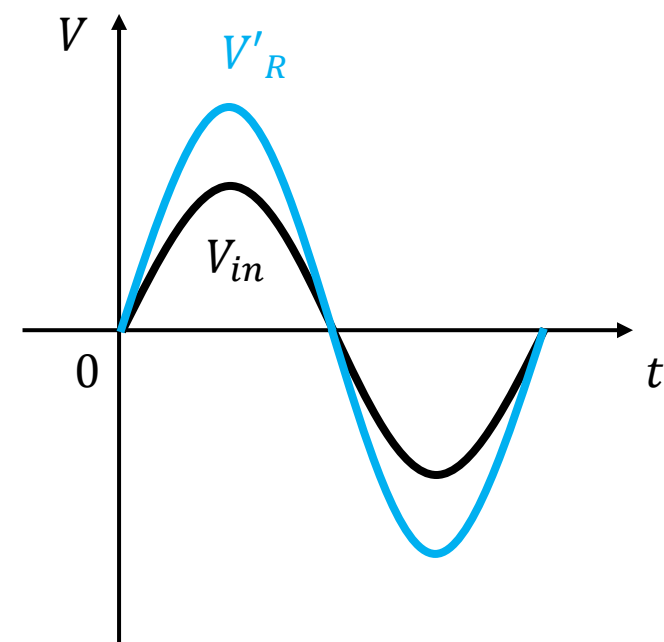
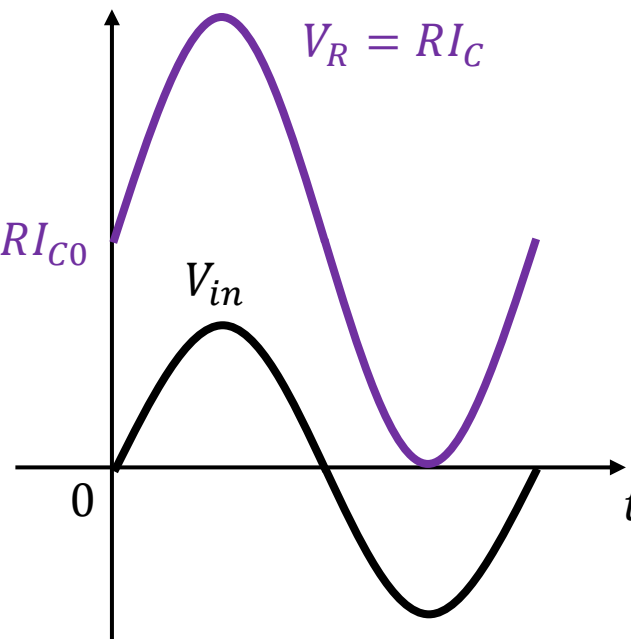
$$V'_R = V_{AC}$$

# 交流成分のみを取り出すために

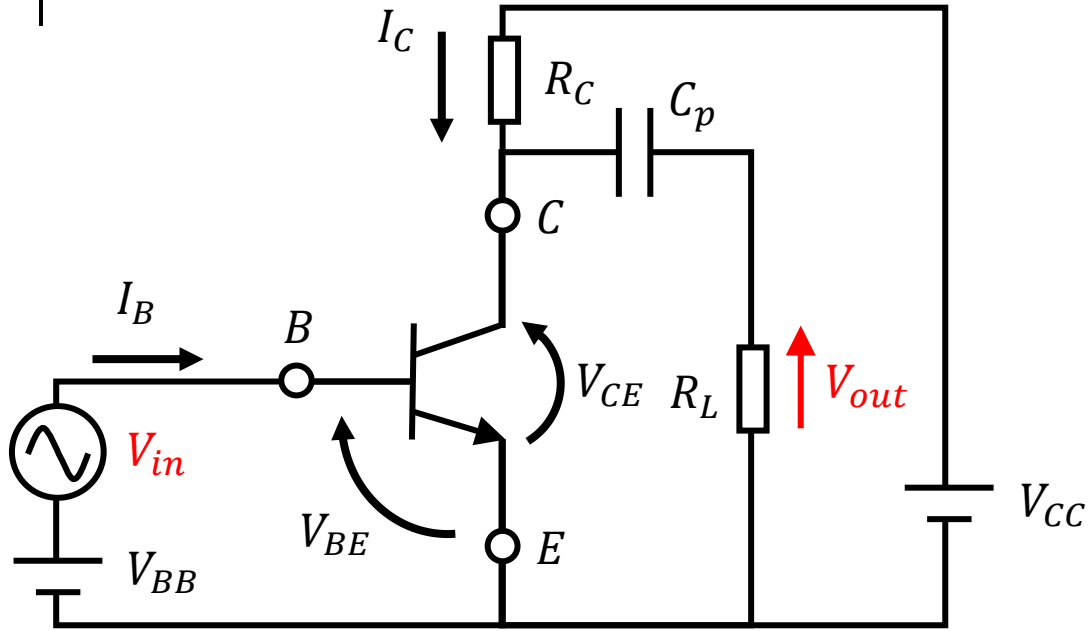


$C_p$ :結合コンデンサ

$$V_{R0} = R I_{C0}$$



# 交流成分のみを取り出すために



$$V_{CC} = R_C I_C + V_{CE}$$

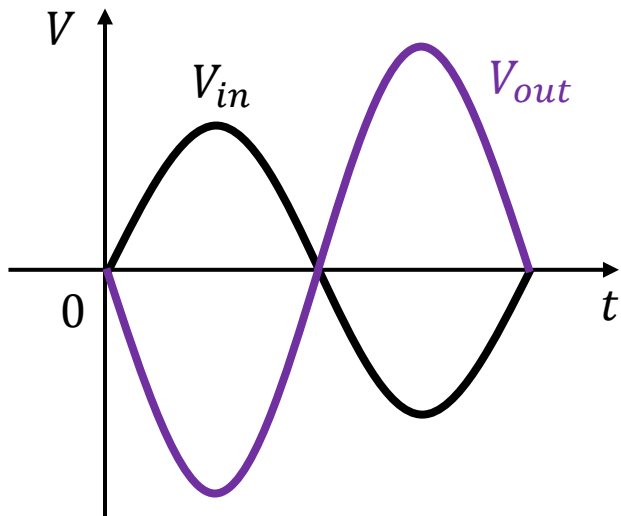
$$I_C = \beta I_B$$

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

$$= V_{CC} - R_C \beta I_B$$

$$I_B = I_{AC} + I_{DC}$$

$$= A V_{in} + A V_{BB}$$



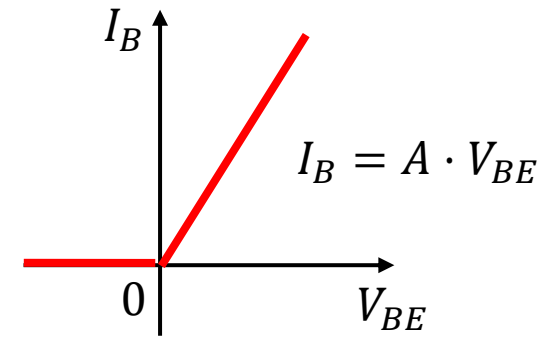
$$V_{CE} = V_{CC} - R_C A \beta V_{in} - R_C A \beta V_{BB}$$

直流
交流
直流

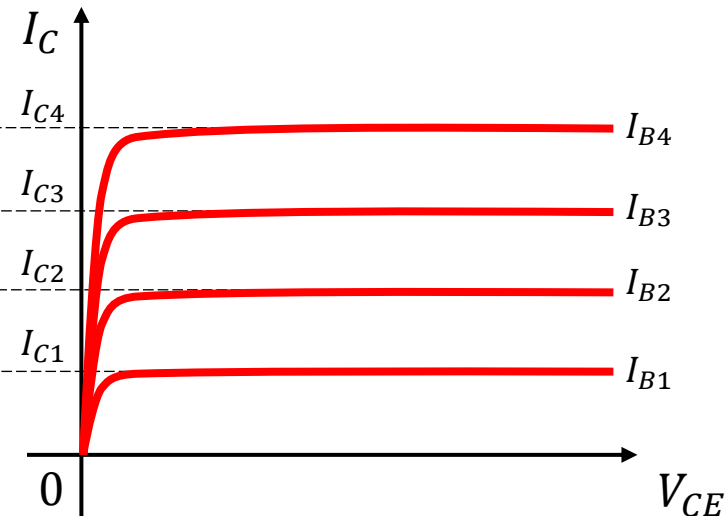
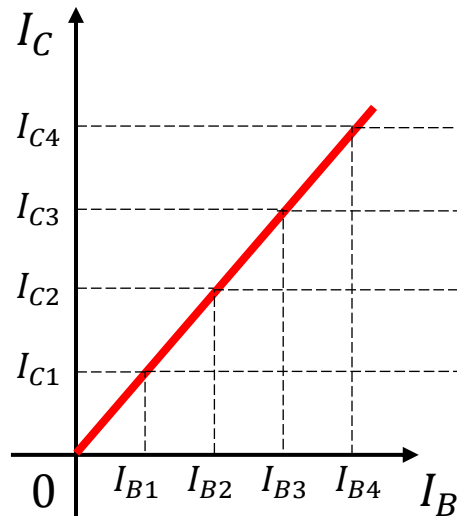
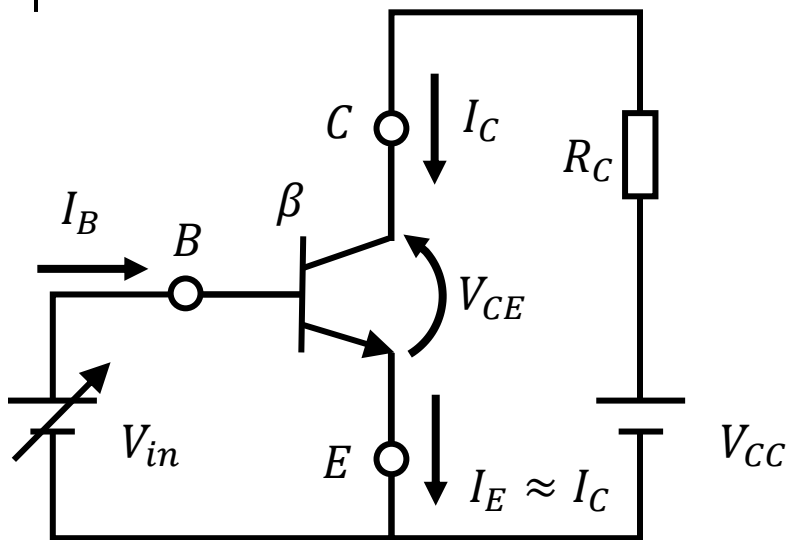
交流成分を取り出す



$$V_{out} = -R_C A \beta V_{in}$$



# $I_C$ と $V_{CE}$ の関係



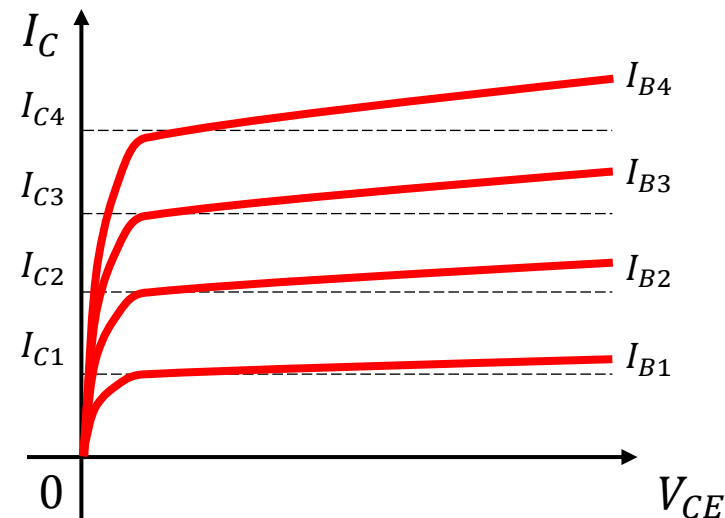
$I_C = \beta I_B$   $I_C$ は $I_B$ で決まる

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C$$

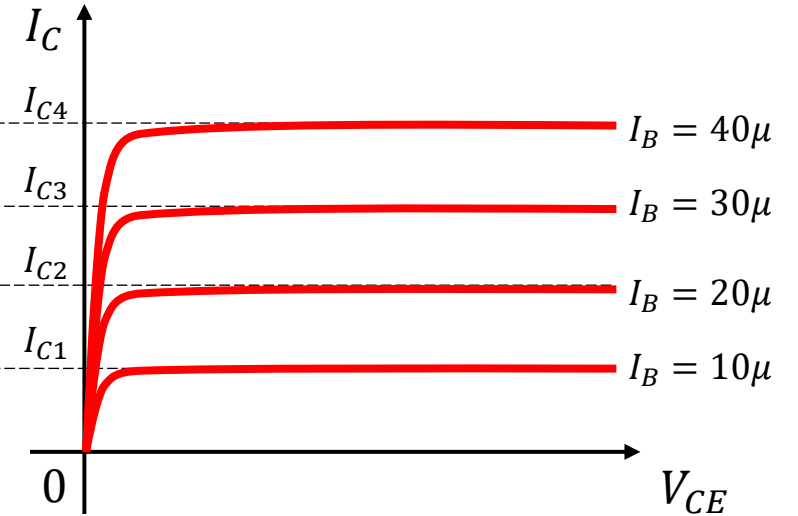
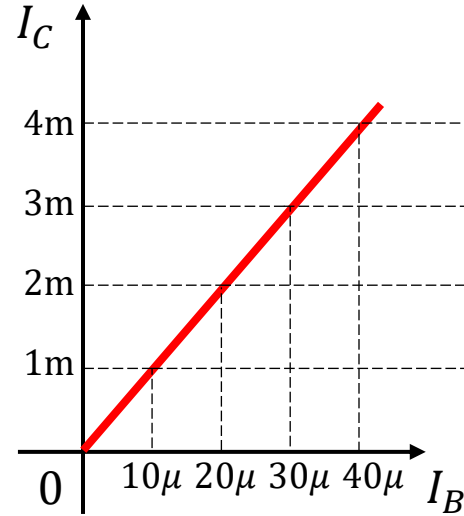
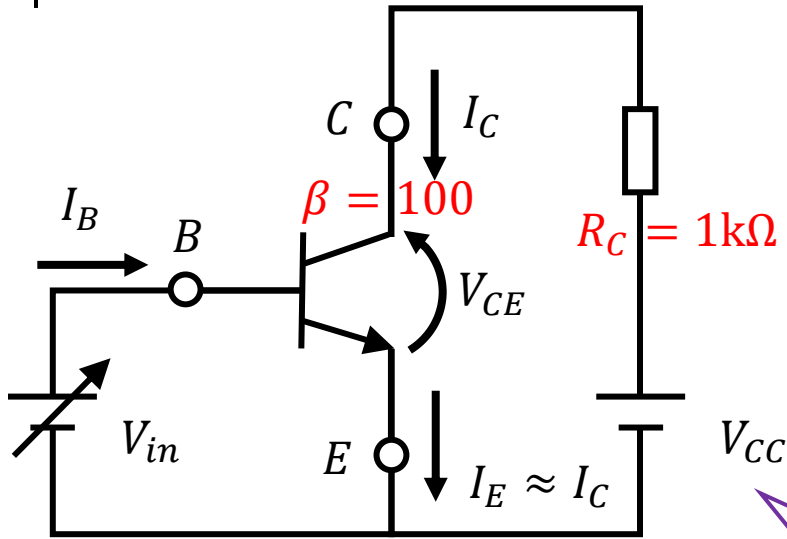
$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

$I_C$ を一定に保つために  
 $V_{CC} - V_{CE} = \text{一定値}$   
を満たすようには $V_{CE}$ 変化する

$V_{CE}$ が増える  
 $\beta$ もちょっと増える  
→アーリー効果

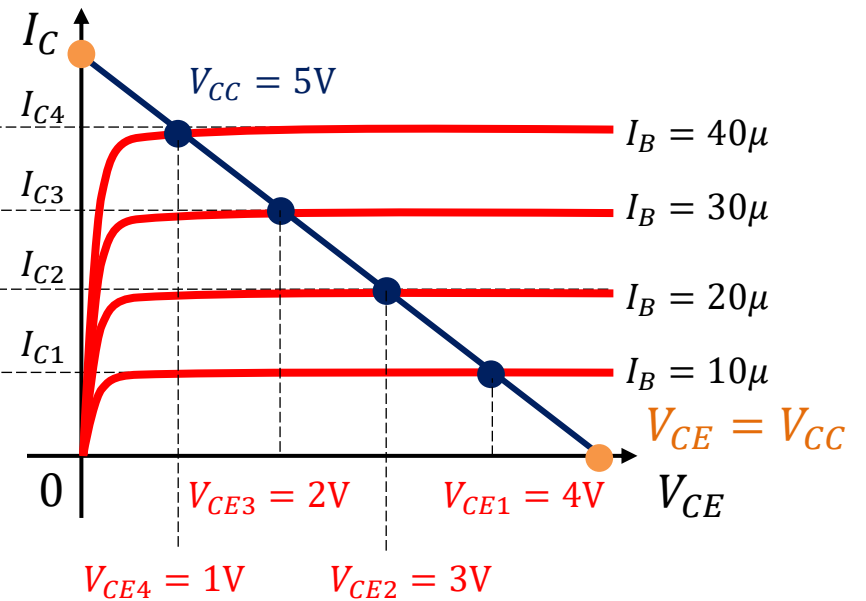
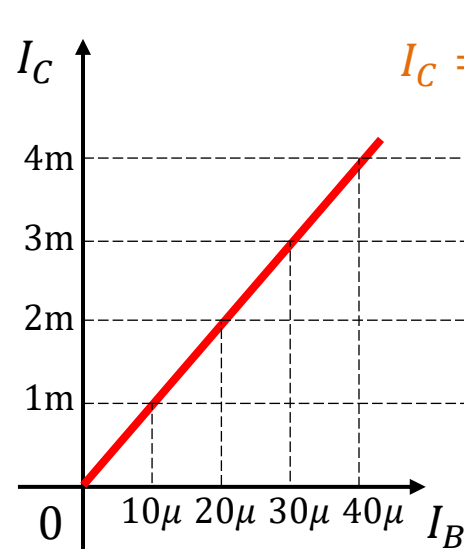
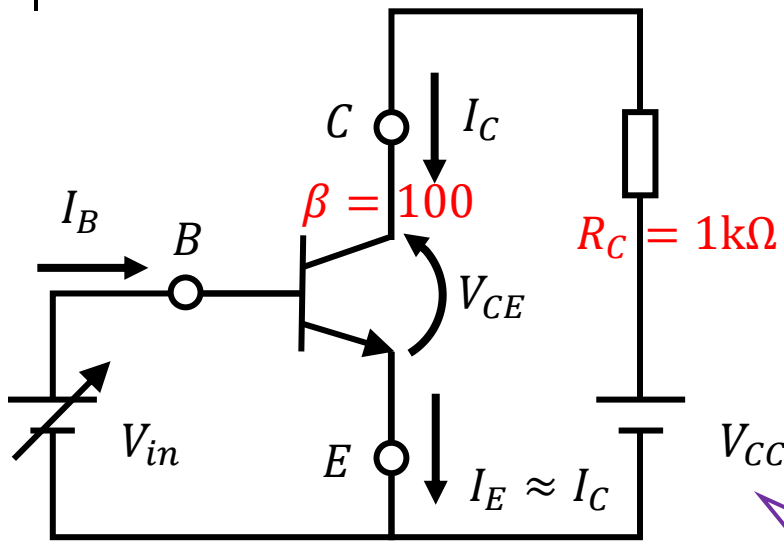


# $V_{CC}$ の役割



$V_{CC} = 5V$ とすると

# $V_{CC}$ の役割



$V_{CC} = 5V$ とすると

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$

を満たす直線が描ける

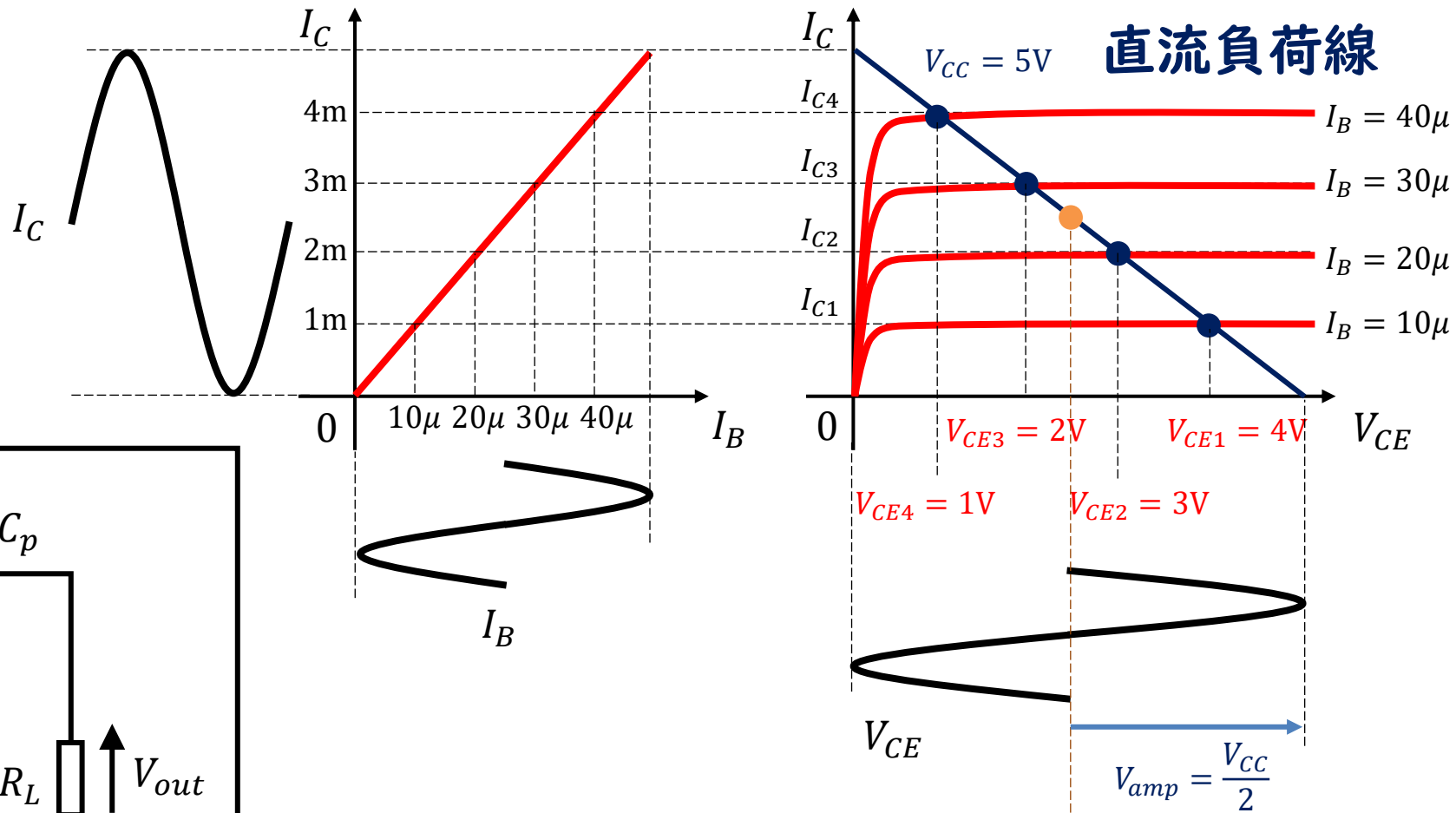
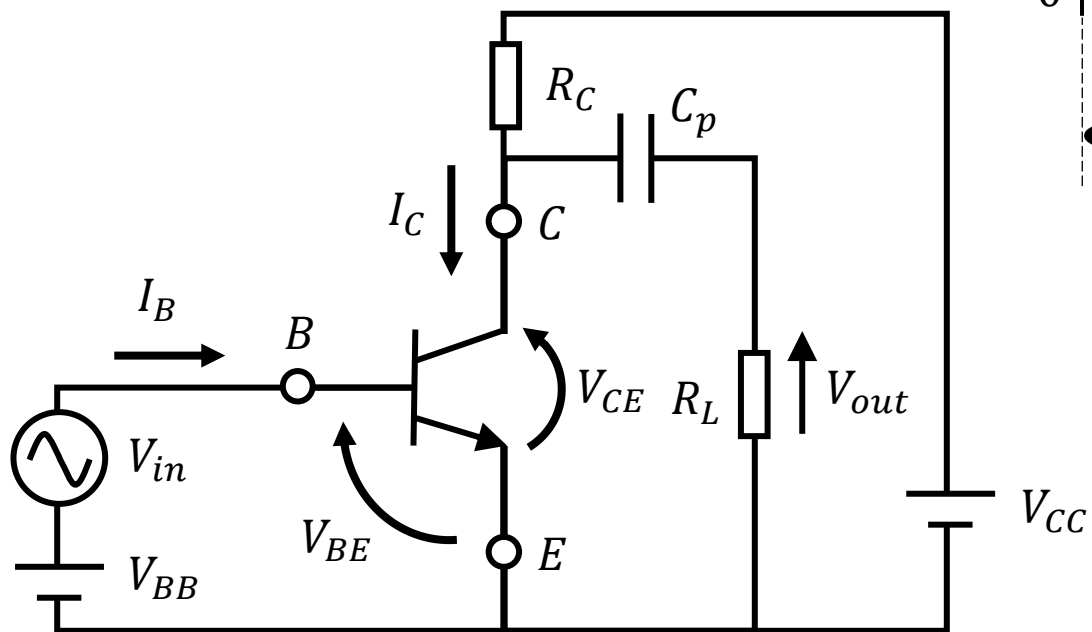
直流負荷線

直流負荷線とコレクタ電流の特性の交点を『動作点』という

# 交流増幅における $V_{CC}$ の役割

$$I_C = \beta I_B$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{R_C}$$



取り出したい出力電圧の振幅に合わせて、  
直流負荷線から適切な動作点を選ぶことで  
『歪なく交流信号を増幅』できる

# R02 問18

問18 図1に示すエミッタ接地トランジスタ増幅回路について、次の(a)及び(b)の問に答えよ。

ただし、 $I_B$  [ $\mu\text{A}$ ]、 $I_C$  [ $\text{mA}$ ]はそれぞれベースとコレクタの直流電流であり、 $i_b$  [ $\mu\text{A}$ ]、 $i_c$  [ $\text{mA}$ ]はそれぞれの信号分である。また、 $V_{BE}$  [ $\text{V}$ ]、 $V_{CE}$  [ $\text{V}$ ]はそれぞれベース-エミッタ間とコレクタ-エミッタ間の直流電圧であり、 $v_{be}$  [ $\text{V}$ ]、 $v_{ce}$  [ $\text{V}$ ]はそれぞれの信号分である。さらに、 $v_i$  [ $\text{V}$ ]、 $v_o$  [ $\text{V}$ ]はそれぞれ信号の入力電圧と出力電圧、 $V_{CC}$  [ $\text{V}$ ]はバイアス電源の直流電圧、 $R_1$  [ $\text{k}\Omega$ ]と $R_2$  [ $\text{k}\Omega$ ]は抵抗、 $C_1$  [ $\text{F}$ ]、 $C_2$  [ $\text{F}$ ]はコンデンサである。なお、 $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ であり、使用する信号周波数において $C_1$ 、 $C_2$ のインピーダンスは無視できるほど十分小さいものとする。

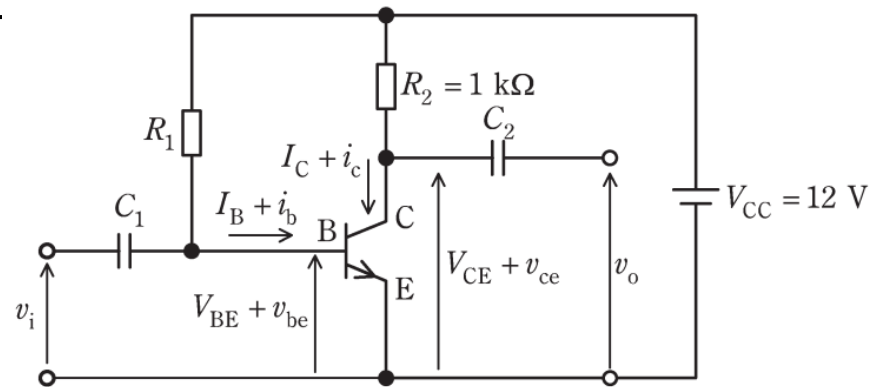


図1

(a) 図2はトランジスタの出力特性である。トランジスタの動作点を

$V_{CE} = \frac{1}{2} V_{CC} = 6 \text{ V}$ に選ぶとき、動作点でのベース電流 $I_B$ の値 [ $\mu\text{A}$ ]として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 20                      (2) 25                      (3) 30                      (4) 35                      (5) 40

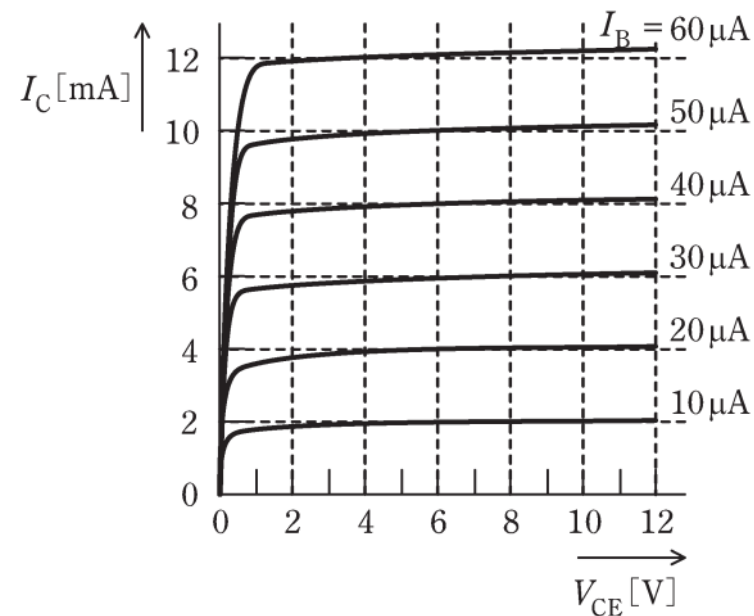


図2



# R02 問18

問18 図1に示すエミッタ接地トランジスタ増幅回路について、次の(a)及び(b)の問に答えよ。

ただし、 $I_B$  [ $\mu\text{A}$ ]、 $I_C$  [ $\text{mA}$ ]はそれぞれベースとコレクタの直流電流であり、 $i_b$  [ $\mu\text{A}$ ]、 $i_c$  [ $\text{mA}$ ]はそれぞれの信号分である。また、 $V_{BE}$  [ $\text{V}$ ]、 $V_{CE}$  [ $\text{V}$ ]はそれぞれベース-エミッタ間とコレクタ-エミッタ間の直流電圧であり、 $v_{be}$  [ $\text{V}$ ]、 $v_{ce}$  [ $\text{V}$ ]はそれぞれの信号分である。さらに、 $v_i$  [ $\text{V}$ ]、 $v_o$  [ $\text{V}$ ]はそれぞれ信号の入力電圧と出力電圧、 $V_{CC}$  [ $\text{V}$ ]はバイアス電源の直流電圧、 $R_1$  [ $\text{k}\Omega$ ]と $R_2$  [ $\text{k}\Omega$ ]は抵抗、 $C_1$  [ $\text{F}$ ]、 $C_2$  [ $\text{F}$ ]はコンデンサである。なお、 $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$ であり、使用する信号周波数において $C_1$ 、 $C_2$ のインピーダンスは無視できるほど十分小さいものとする。

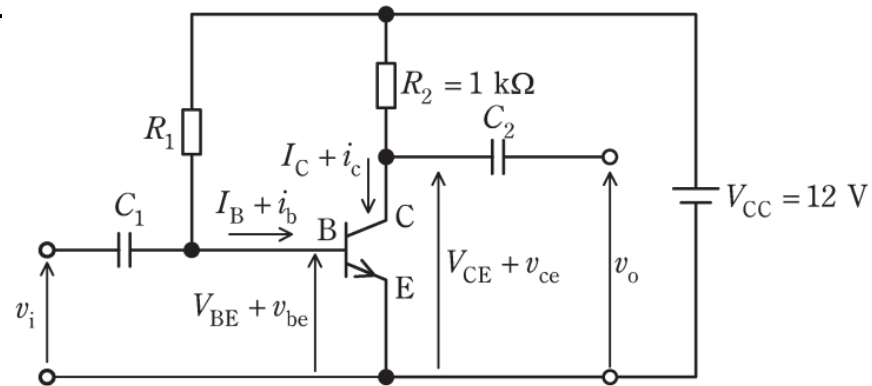
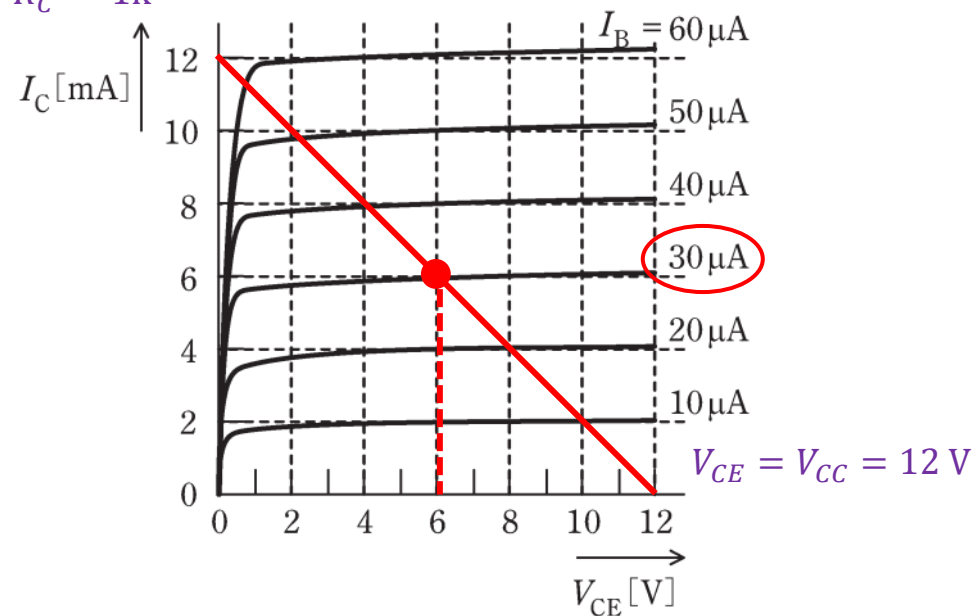


図1

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12}{1\text{k}} = 12 \text{ mA}$$



(a) 図2はトランジスタの出力特性である。トランジスタの動作点を

$V_{CE} = \frac{1}{2} V_{CC} = 6 \text{ V}$ に選ぶとき、動作点でのベース電流 $I_B$ の値 [ $\mu\text{A}$ ]として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

- (1) 20      (2) 25      (3) 30      (4) 35      (5) 40

図2

# H30 問16

問16 エミッタホロワ回路について、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) 図1の回路で  $V_{CC}=10\text{ V}$ ,  $R_1=18\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=82\text{ k}\Omega$ とする。動作点におけるエミッタ電流を  $1\text{ mA}$  としたい。抵抗  $R_E$  の値 [ $\text{k}\Omega$ ] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。ただし、動作点において、ベース電流は  $R_2$  を流れる直流電流より十分小さく無視できるものとし、ベース-エミッタ間電圧は  $0.7\text{ V}$  とする。

- (1) 1.3      (2) 3.0      (3) 7.5      (4) 13      (5) 75

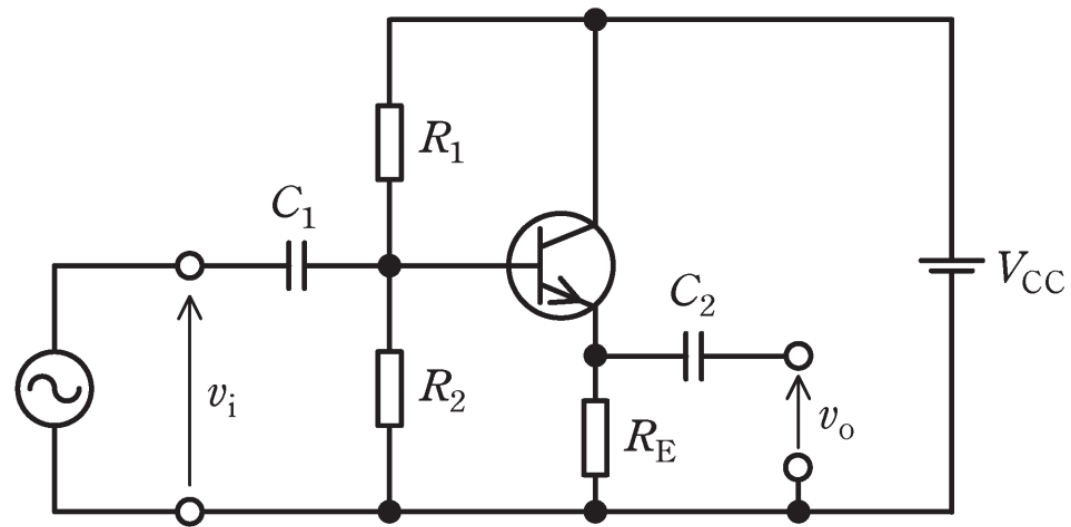


図1

# 導出のポイント

問 16 エミッタホロワ回路について、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) 図 1 の回路で  $V_{CC}=10\text{ V}$ ,  $R_1=18\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=82\text{ k}\Omega$  とする。動作点におけるエミッタ電流を  $1\text{ mA}$  としたい。抵抗  $R_E$  の値 [ $\text{k}\Omega$ ] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。ただし、動作点において、ベース電流は  $R_2$  を流れる直流電流より十分小さく無視できるものとし、ベース-エミッタ間電圧は  $0.7\text{ V}$  とする。

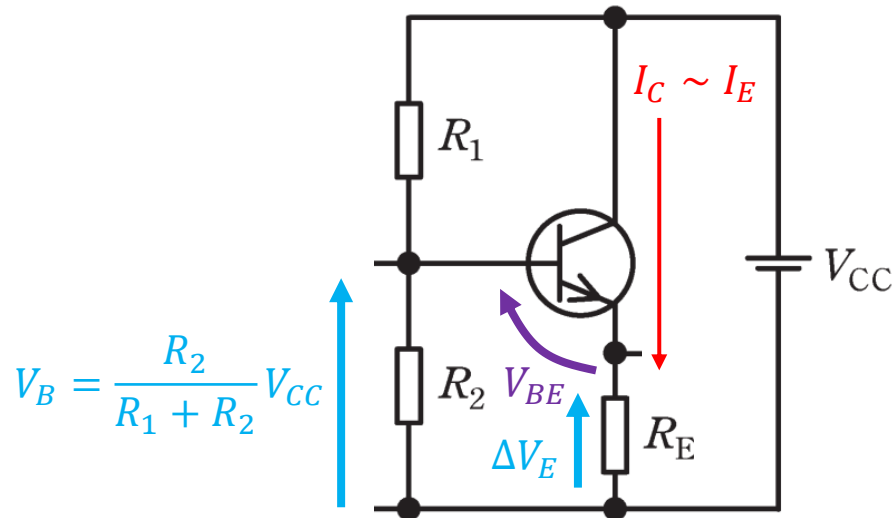


図 1

$$V_B = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{CC} = \frac{82\text{ k}}{18\text{ k} + 82\text{ k}} \times 10 = 8.2\text{ V}$$

$$V_B = V_{BE} + \Delta V_E = V_{BE} + R_E I_C$$

$$8.2 = 0.7 + R_E \times 1\text{ mA}$$

$$R_E = \frac{8.2 - 0.7}{1\text{ m}} = 7.5\text{ k}\Omega$$

# H30 問16

問16 エミッタホロワ回路について、次の(a)及び(b)の間に答えよ。

(a) 図1の回路で  $V_{CC}=10\text{ V}$ ,  $R_1=18\text{ k}\Omega$ ,  $R_2=82\text{ k}\Omega$ とする。動作点におけるエミッタ電流を  $1\text{ mA}$  としたい。抵抗  $R_E$  の値 [ $\text{k}\Omega$ ] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。ただし、動作点において、ベース電流は  $R_2$  を流れる直流電流より十分小さく無視できるものとし、ベース-エミッタ間電圧は  $0.7\text{ V}$  とする。

- (1) 1.3      (2) 3.0      (3) 7.5      (4) 13      (5) 75

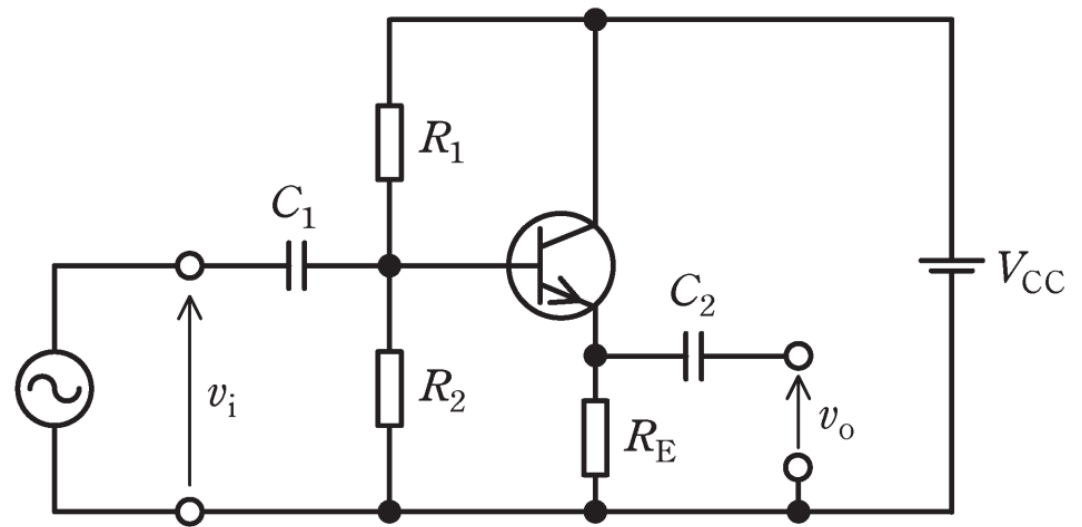


図1

# H29 問13

問13 図1は、固定バイアス回路を用いたエミッタ接地トランジスタ増幅回路である。図2は、トランジスタの五つのベース電流  $I_B$  に対するコレクタ-エミッタ間電圧  $V_{CE}$  とコレクタ電流  $I_C$  との静特性を示している。この  $V_{CE}$ - $I_C$  特性と直流負荷線との交点を動作点という。図1の回路の直流負荷線は図2のように与えられる。動作点が  $V_{CE}=4.5\text{V}$  のとき、バイアス抵抗  $R_B$  の値  $[\text{M}\Omega]$  として最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、ベース-エミッタ間電圧  $V_{BE}$  は、直流電源電圧  $V_{CC}$  に比べて十分小さく無視できるものとする。なお、 $R_L$  は負荷抵抗であり、 $C_1$ 、 $C_2$  は結合コンデンサである。

- (1) 0.5                      (2) 1.0                      (3) 1.5                      (4) 3.0                      (5) 6.0

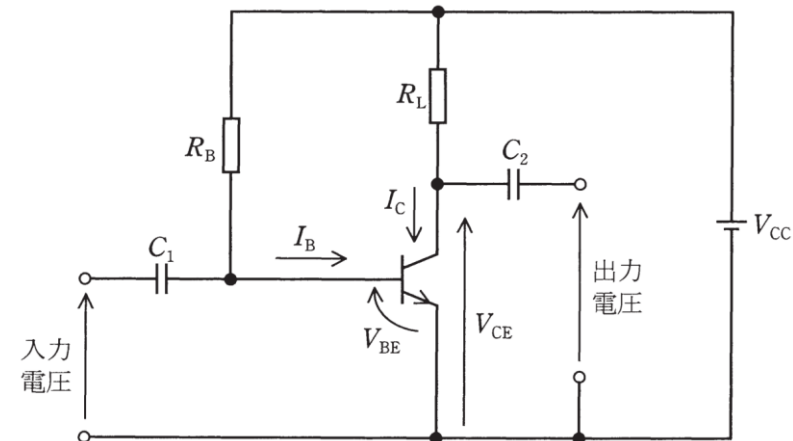


図1

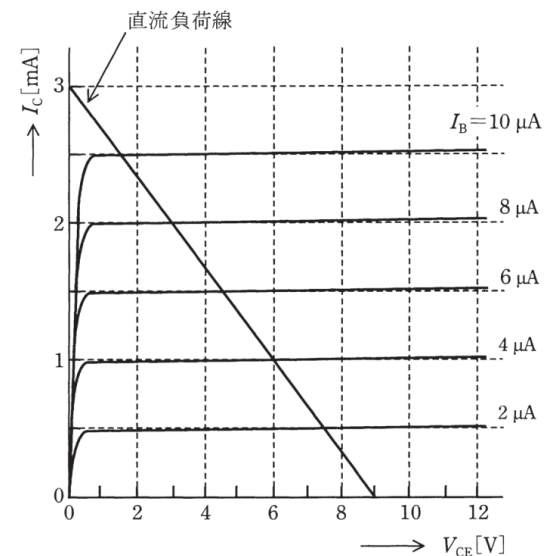


図2

# 導出のポイント

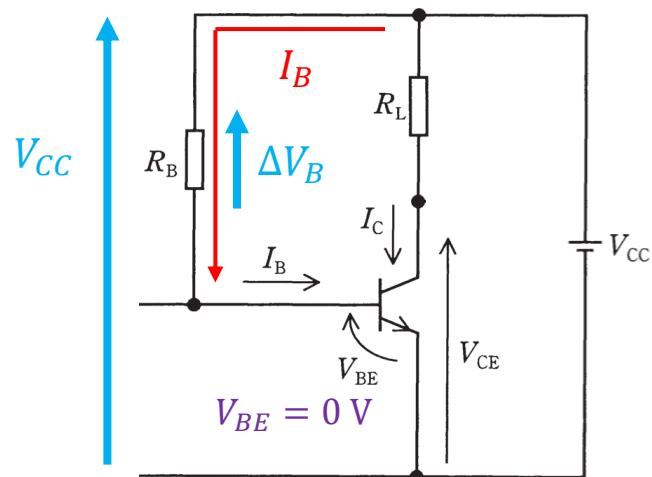


図 1

$$V_{CC} = \Delta V_B + V_{BE} = R_B I_B + 0 V$$

$$R_B = \frac{V_{CC}}{I_B} = \frac{9}{6\mu} = 1.5 \text{ M}\Omega$$

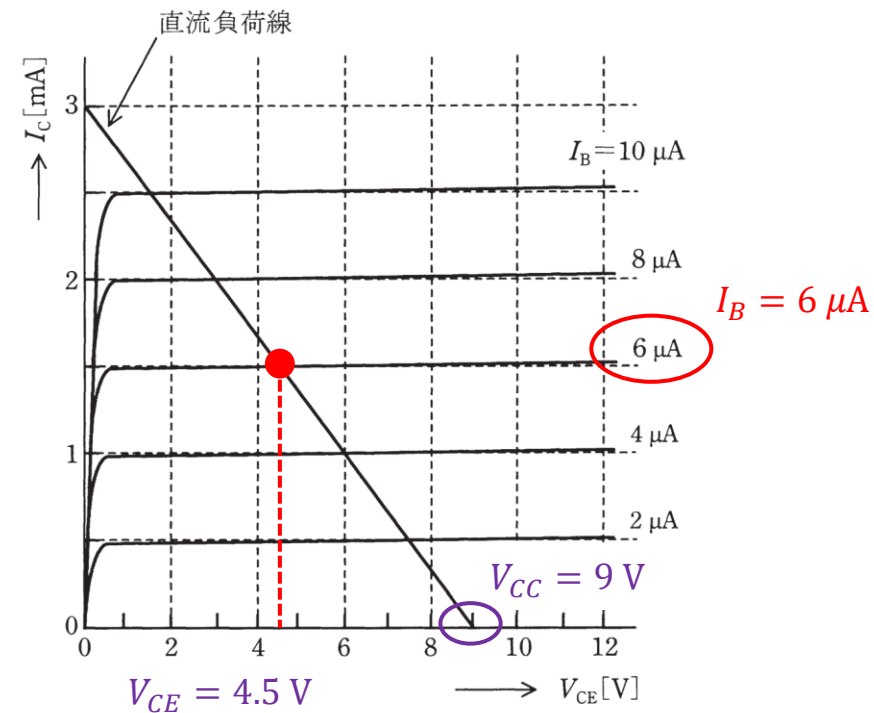


図 2

# H29 問13

問13 図1は、固定バイアス回路を用いたエミッタ接地トランジスタ増幅回路である。図2は、トランジスタの五つのベース電流  $I_B$  に対するコレクタ-エミッタ間電圧  $V_{CE}$  とコレクタ電流  $I_C$  との静特性を示している。この  $V_{CE}$ - $I_C$  特性と直流負荷線との交点を動作点という。図1の回路の直流負荷線は図2のように与えられる。動作点が  $V_{CE}=4.5\text{V}$  のとき、バイアス抵抗  $R_B$  の値  $[\text{M}\Omega]$  として最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、ベース-エミッタ間電圧  $V_{BE}$  は、直流電源電圧  $V_{CC}$  に比べて十分小さく無視できるものとする。なお、 $R_L$  は負荷抵抗であり、 $C_1$ 、 $C_2$  は結合コンデンサである。

- (1) 0.5            (2) 1.0            (3) 1.5            (4) 3.0            (5) 6.0

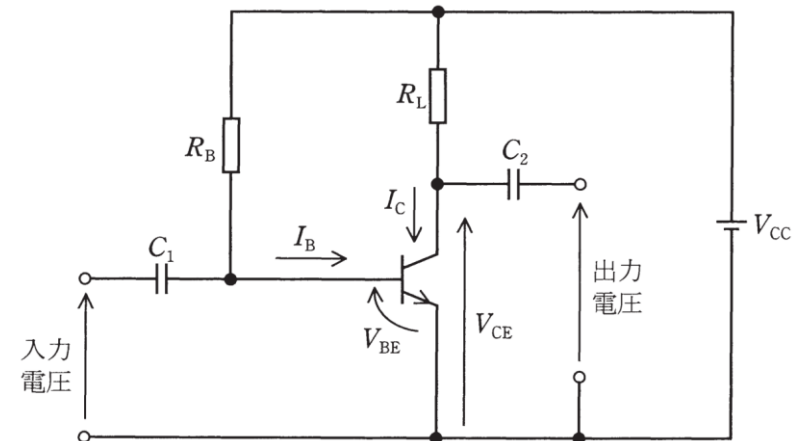


図1

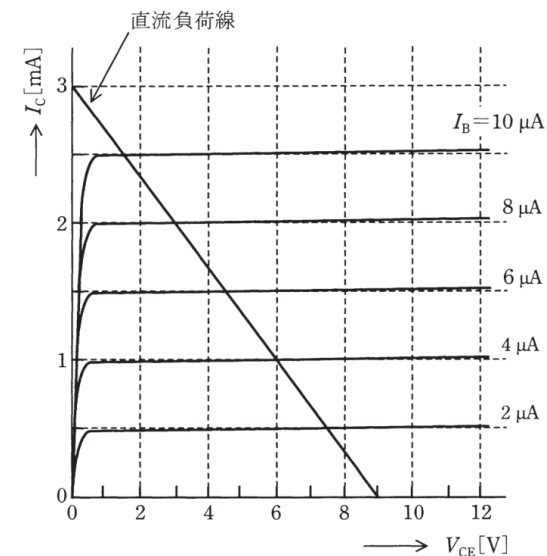
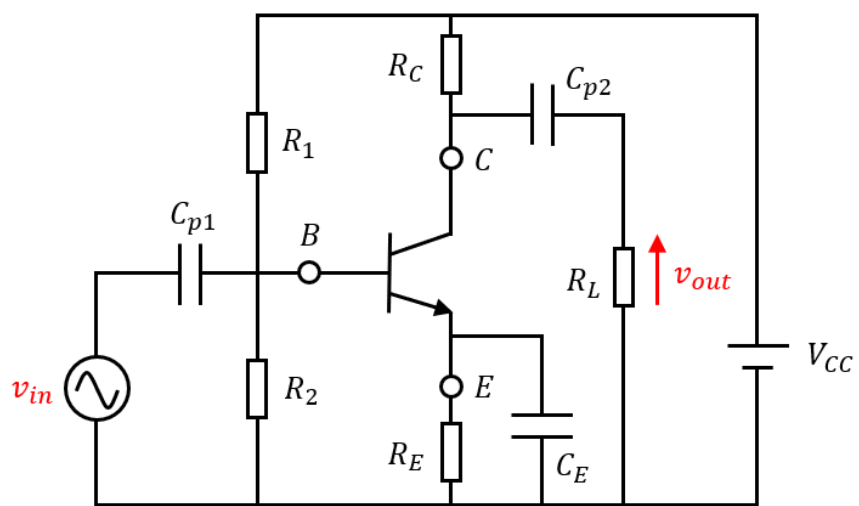


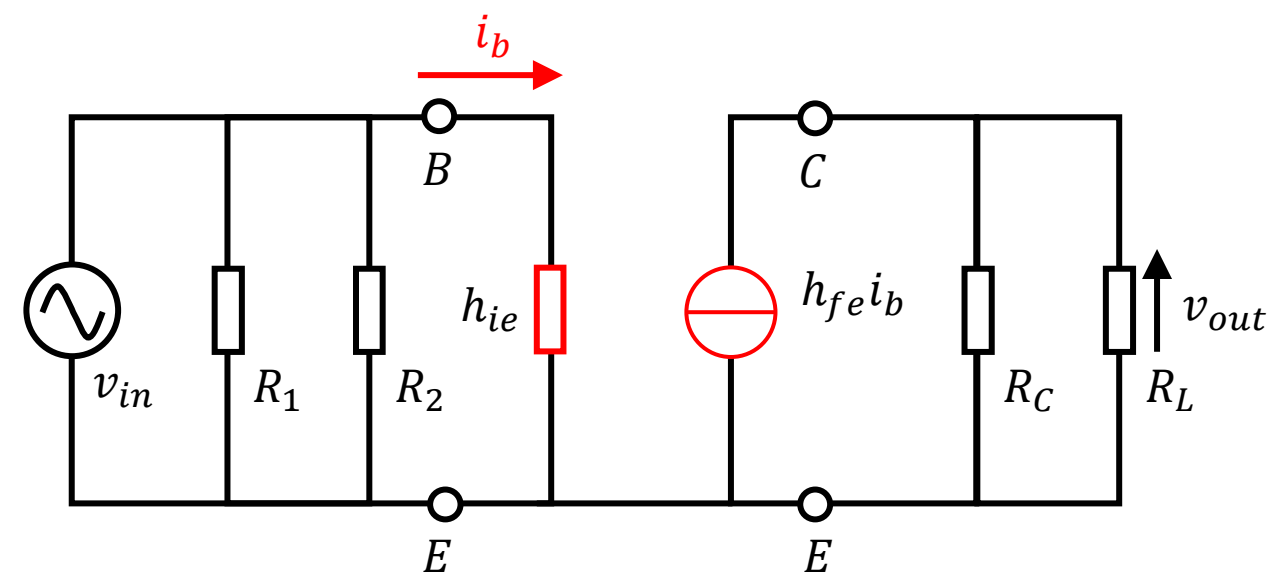
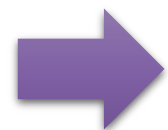
図2

# 交流等価回路

エミッタ接地増幅回路



交流等価回路



交流等価回路とは、  
増幅回路から交流成分だけを取り出した回路

→回路計算の考え方は増幅回路とは全く別物  
と考えていい！

## 電圧増幅率

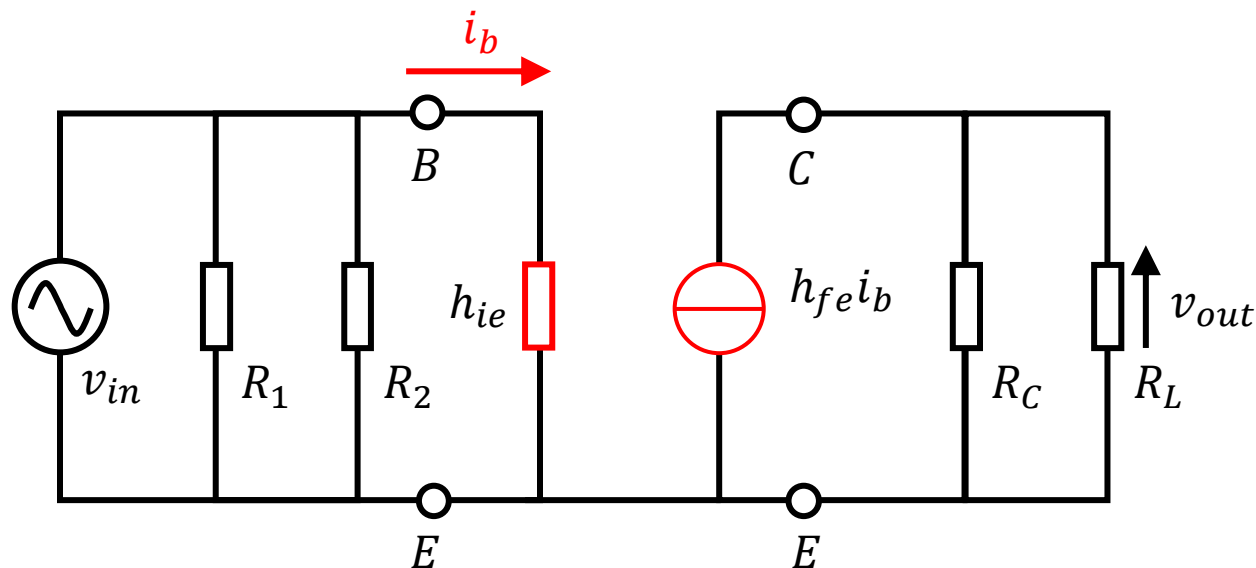
$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}, \quad v_{out} = A_v v_{in}$$

$$A_v [\text{dB}] = 20 \log_{10} \left| \frac{v_{out}}{v_{in}} \right| [\text{dB}]$$



# 交流等価回路の計算

## 交流等価回路



それぞれ  $i_b$  を含む式で表す

$$v_{in} = h_{ie} i_b$$

$$v_{out} = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \times h_{fe} i_b$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \times h_{fe} i_b}{h_{ie} i_b} = \frac{R_C R_L}{R_C + R_L} \times \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

$i_b$  がうまく消える

電流増幅率を求めるのが一般的  
ベース電流  $i_b$  をうまく使って式を立てる

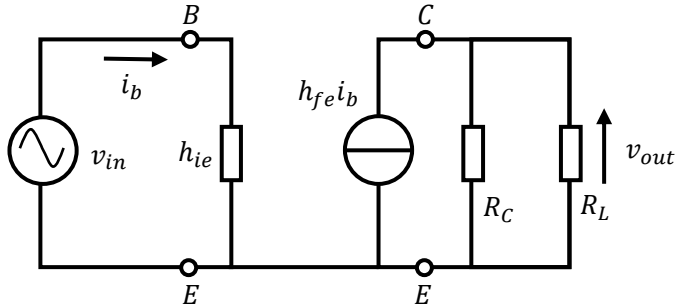
### 電圧増幅率

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}}, \quad v_{out} = A_v v_{in}$$

$$A_v [\text{dB}] = 20 \log_{10} \left| \frac{v_{out}}{v_{in}} \right| [\text{dB}]$$

# 演習問題 I

## 交流等価回路



- (1) 入力インピーダンス  $Z_{in} = v_{in} / i_{in}$  を求めよ。
- (2) 出力電圧  $v_{out}$  をベース電流  $i_b$  を含む式で示せ。
- (3) 電圧増幅率  $A_v = v_{out} / v_{in}$  を求めよ。

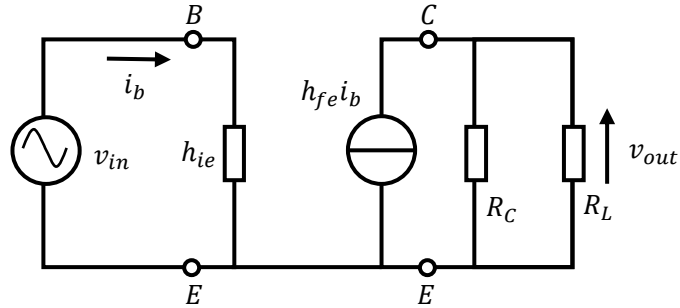
Ans.  $Z_{in} =$  \_\_\_\_\_

Ans.  $v_{out} =$  \_\_\_\_\_

Ans.  $A_v =$  \_\_\_\_\_

# 演習問題 I

## 交流等価回路



(1) 入力インピーダンス  $Z_{in} = v_{in} / i_{in}$  を求めよ。

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{v_{in}}{i_b} = \frac{h_{ie} \cdot i_b}{i_b} = h_{ie}$$

Ans.  $Z_{in} = h_{ie}$

(2) 出力電圧  $v_{out}$  をベース電流  $i_b$  を含む式で示せ。

$$Z_{out} = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

$$v_{out} = Z_{out} \cdot h_{fe} i_b = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b$$

Ans.  $v_{out} = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b$

(3) 電圧増幅率  $A_v = v_{out} / v_{in}$  を求めよ。

$$v_{in} = h_{ie} \cdot i_b$$

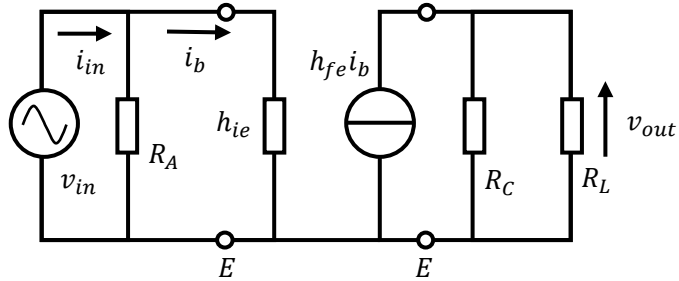
$$v_{out} = Z_{out} \cdot i_b = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b}{h_{ie} \cdot i_b} = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

Ans.  $A_v = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$

# 演習問題2

## 交流等価回路



- (1) 入力インピーダンス  $Z_{in} = v_{in} / i_{in}$  を求めよ。
- (2) 出力電圧  $v_{out}$  をベース電流  $i_b$  を含む式で示せ。
- (3) 電圧増幅率  $A_v = v_{out} / v_{in}$  を求めよ。

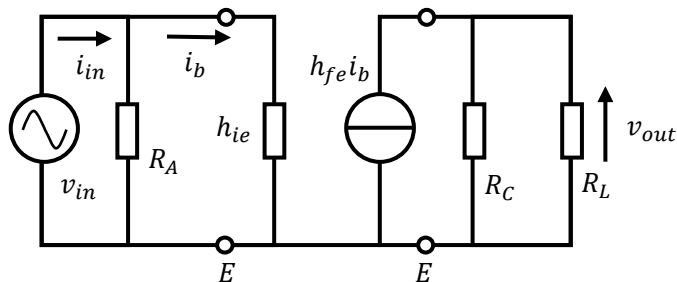
Ans.  $Z_{in} =$  \_\_\_\_\_

Ans.  $v_{out} =$  \_\_\_\_\_

Ans.  $A_v =$  \_\_\_\_\_

# 演習問題2

## 交流等価回路



(1) 入力インピーダンス  $Z_{in} = v_{in} / i_{in}$  を求めよ。

(2) 出力電圧  $v_{out}$  をベース電流  $i_b$  を含む式で示せ。

(3) 電圧増幅率  $A_v = v_{out} / v_{in}$  を求めよ。

$$Z_{in} = \frac{v_{in}}{i_{in}} = \frac{R_A h_{ie}}{R_A + h_{ie}}$$

$$Z_{out} = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L}$$

$$v_{in} = h_{ie} \cdot i_b$$

$$v_{out} = Z_{out} \cdot h_{fe} i_b = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b$$

$$v_{out} = Z_{out} \cdot i_b = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b$$

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = \frac{\frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b}{h_{ie} \cdot i_b} = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$$

Ans.  $Z_{in} = \frac{R_A h_{ie}}{R_A + h_{ie}}$

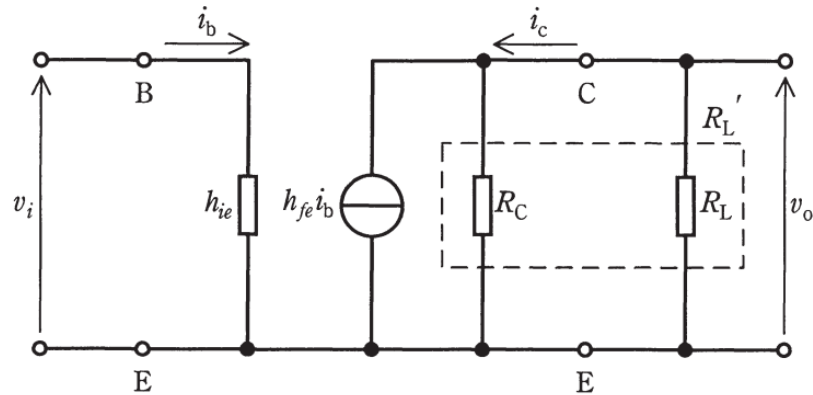
Ans.  $v_{out} = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot h_{fe} i_b$

Ans.  $A_v = \frac{R_C \cdot R_L}{R_C + R_L} \cdot \frac{h_{fe}}{h_{ie}}$

# H28 問13

問13 図は、エミッタ(E)を接地したトランジスタ増幅回路の簡易小信号等価回路である。この回路においてコレクタ抵抗  $R_C$  と負荷抵抗  $R_L$  の合成抵抗が  $R_L' = 1\text{ k}\Omega$  のとき、電圧利得は 40 dBであった。入力電圧  $v_i = 10\text{ mV}$  を加えたときにベース(B)に流れる入力電流  $i_b$  の値 [ $\mu\text{A}$ ] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、 $v_o$  は合成抵抗  $R_L'$  の両端における出力電圧、 $i_c$  はコレクタ(C)に流れる出力電流、 $h_{ie}$  はトランジスタの入力インピーダンスであり、小信号電流増幅率  $h_{fe} = 100$  とする。

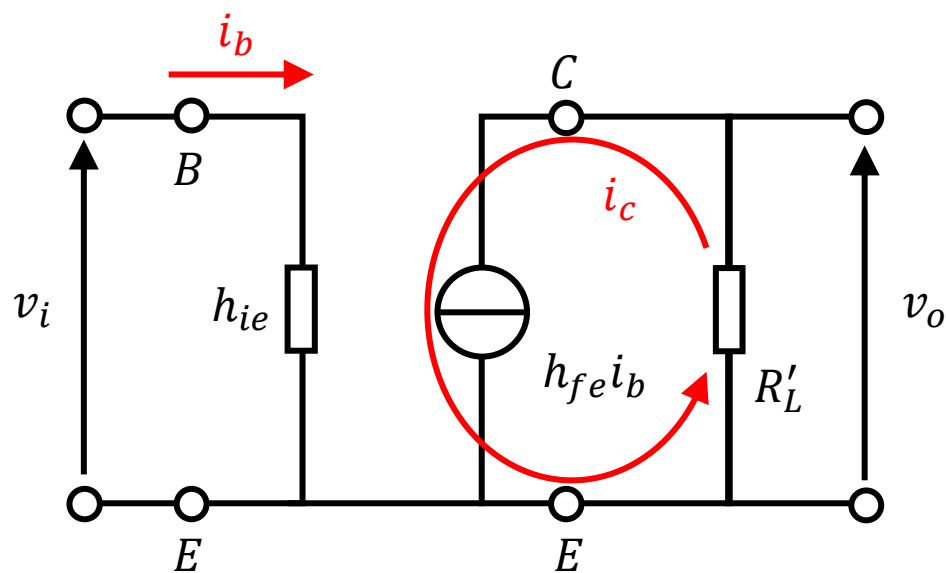
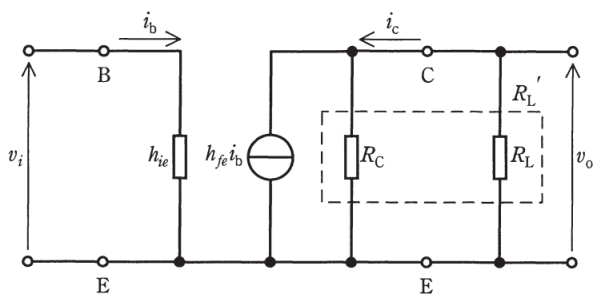


- (1) 0.1      (2) 1      (3) 10      (4) 100      (5) 1000

# 導出のポイント

問13 図は、エミッタ(E)を接地したトランジスタ増幅回路の簡易小信号等価回路である。この回路においてコレクタ抵抗  $R_C$  と負荷抵抗  $R_L$  の合成抵抗が  $R'_L = 1\text{k}\Omega$  のとき、電圧利得は 40 dBであった。入力電圧  $v_i = 10\text{mV}$  を加えたときにベース(B)に流れる入力電流  $i_b$  の値 [ $\mu\text{A}$ ] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、 $v_o$  は合成抵抗  $R'_L$  の両端における出力電圧、 $i_c$  はコレクタ(C)に流れる出力電流、 $h_{ie}$  はトランジスタの入力インピーダンスであり、小信号電流増幅率  $h_{fe} = 100$  とする。



$$A_v[\text{dB}] = 40 = 20 \log_{10}|A_v|$$

$$\log_{10}|A_v| = 2 \rightarrow |A_v| = 10^2 = 100$$

$$|A_v| = \left| \frac{v_o}{v_i} \right|$$

$$v_o = -R'_L h_{fe} i_b$$

$$|A_v| = \left| \frac{v_o}{v_i} \right| = \left| \frac{-R'_L h_{fe} i_b}{v_i} \right| = \frac{R'_L h_{fe} i_b}{v_i}$$

$$100 = \frac{1\text{k} \times 100 \times i_b}{10\text{m}}$$

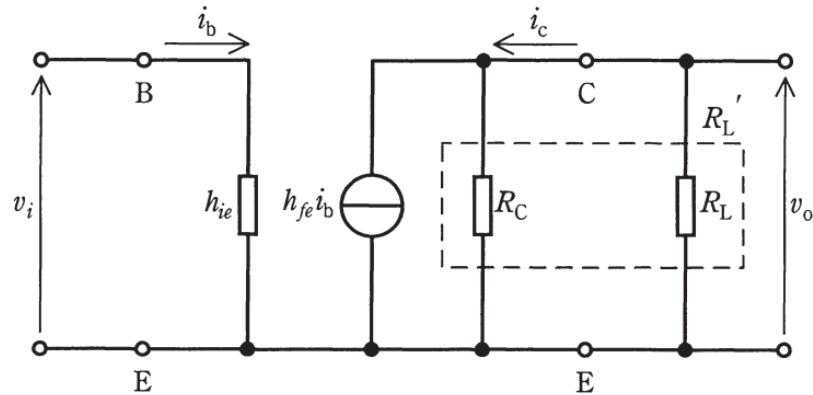
$$i_b = \frac{10\text{m}}{1\text{k} \times 100} \times 100 = 10 \times 10^{-6}$$

$$\therefore i_b = 10 \mu\text{A}$$

# H28 問13

問13 図は、エミッタ(E)を接地したトランジスタ増幅回路の簡易小信号等価回路である。この回路においてコレクタ抵抗  $R_C$  と負荷抵抗  $R_L$  の合成抵抗が  $R_L' = 1\text{ k}\Omega$  のとき、電圧利得は 40 dBであった。入力電圧  $v_i = 10\text{ mV}$  を加えたときにベース(B)に流れる入力電流  $i_b$  の値 [ $\mu\text{A}$ ] として、最も近いものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。

ただし、 $v_o$  は合成抵抗  $R_L'$  の両端における出力電圧、 $i_c$  はコレクタ(C)に流れる出力電流、 $h_{ie}$  はトランジスタの入力インピーダンスであり、小信号電流増幅率  $h_{fe} = 100$  とする。



- (1) 0.1      (2) 1      (3) 10      (4) 100      (5) 1000



# H30 問16(b)改

(b) 図2は、エミッタホロワ回路の交流等価回路である。ただし、使用する周波数において図1の二つのコンデンサのインピーダンスが十分に小さい場合を考えている。ここで、 $h_{ie}=2.5\text{ k}\Omega$ 、 $h_{fe}=100$ であり、 $R_E$ は小問(a)で求めた値とする。入力インピーダンス  $\frac{v_i}{i_i}$  の値[k $\Omega$ ]を求めよ。

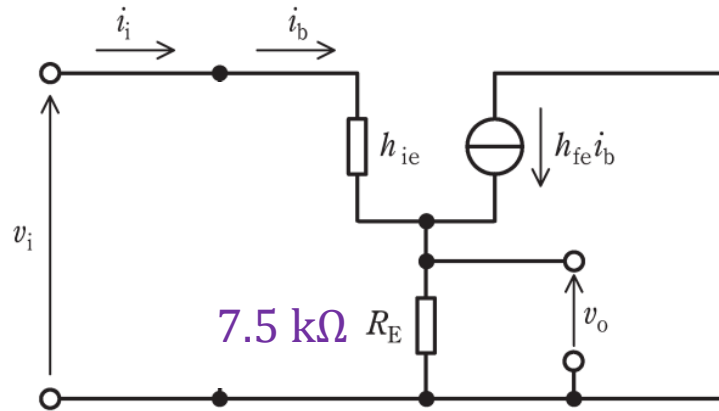


図2

# H30 問16(b)改

(b) 図2は、エミッタホロワ回路の交流等価回路である。ただし、使用する周波数において図1の二つのコンデンサのインピーダンスが十分に小さい場合を考えている。ここで、 $h_{ie}=2.5\text{ k}\Omega$ 、 $h_{fe}=100$ であり、 $R_E$ は小問(a)で求めた値とする。入力インピーダンス  $\frac{v_i}{i_i}$  の値[k $\Omega$ ]を求めよ。

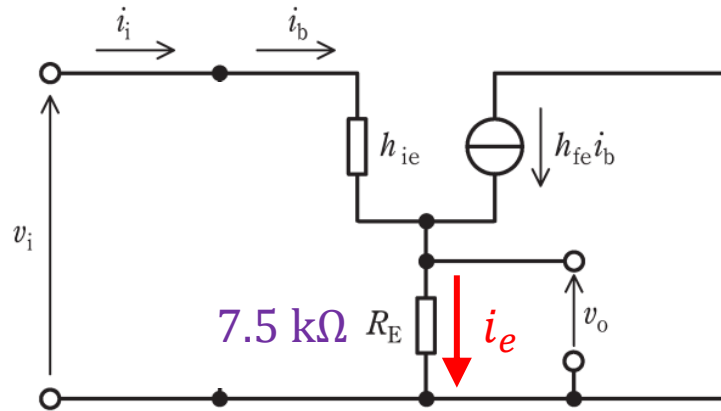


図2

$$\begin{aligned} i_e &= i_b + h_{fe}i_b \\ v_i &= h_{ie}i_b + R_E i_e = h_{ie}i_b + R_E(i_b + h_{fe}i_b) \\ &= h_{ie}i_b + R_E i_b + R_E h_{fe}i_b \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{v_i}{i_i} &= \frac{h_{ie}i_b + R_E i_b + R_E h_{fe}i_b}{i_b} \\ &= h_{ie} + R_E + R_E h_{fe} \\ &= 2.5\text{k} + 7.5\text{k} + 7.5\text{k} \times 100 \\ &= 760\text{ k}\Omega \end{aligned}$$

ご聴講ありがとうございました  
ございました!!

# R04 問13

問13 次の文章は、図1の回路の動作について述べたものである。

図1は、演算増幅器(オペアンプ)を用いたシュミットトリガ回路である。この演算増幅器には+5Vの単電源が供給されており、0Vから5Vまでの範囲の電圧を出力できるものとする。

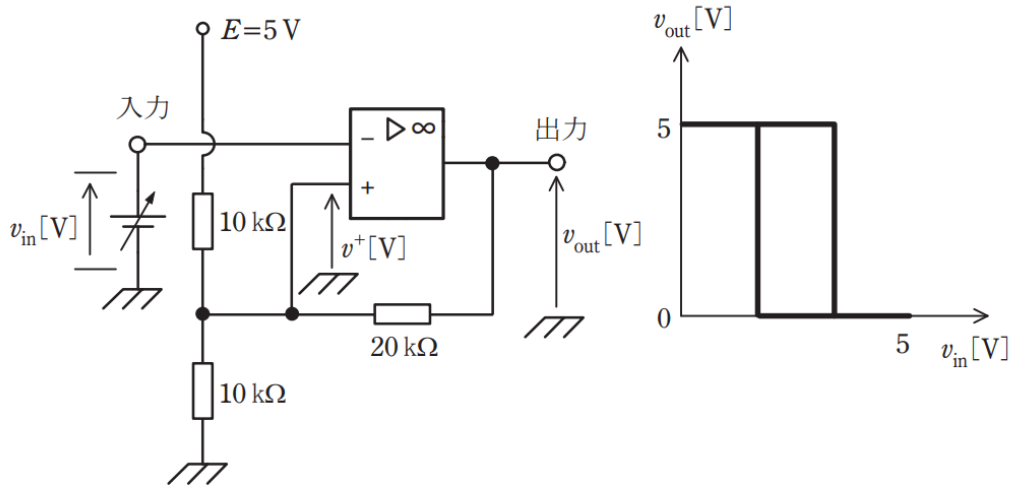


図1

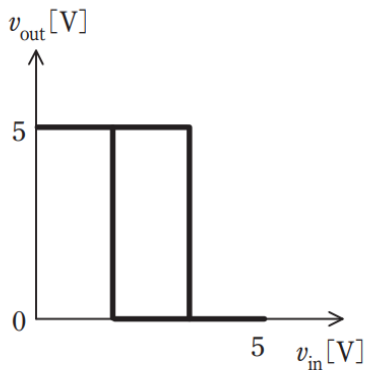


図2

- 出力電圧  $v_{out}$  は0~5Vの間にあるため、演算増幅器の非反転入力電圧  $v^+$  [V] は  の間にある。
- 入力電圧  $v_{in}$  を0Vから徐々に増加させると、 $v_{in}$  が  Vを上回った瞬間、 $v_{out}$  は5Vから0Vに変化する。
- 入力電圧  $v_{in}$  を5Vから徐々に減少させると、 $v_{in}$  が  Vを下回った瞬間、 $v_{out}$  は0Vから5Vに変化する。
- 入力  $v_{in}$  に対する出力  $v_{out}$  の変化を描くと、図2のような  を示す特性となる。

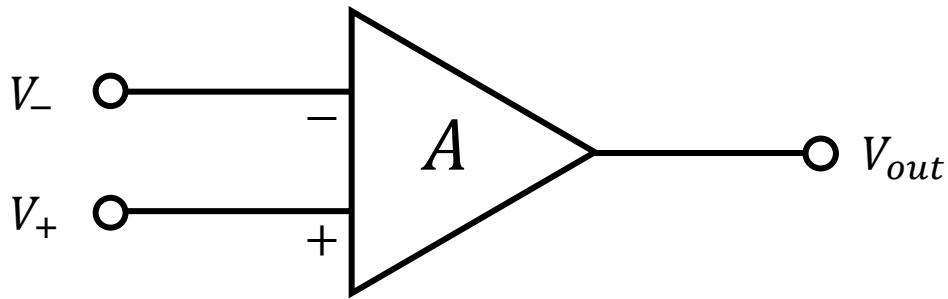
上記の記述中の空白箇所(ア)~(エ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	1.25~3.75	3.75	1.25	位相遅れ
(2)	1.25~3.75	1.25	3.75	ヒステリシス
(3)	2~3	2	3	ヒステリシス
(4)	2~3	2.75	2.25	位相遅れ
(5)	2~3	3	2	ヒステリシス

# 演算増幅回路 (オペアンプ)

- ・オペアンプは増幅率 $A$ がすごく大きい差動増幅回路
- ・入力インピーダンス $R_{in}$ が非常に大きい
- ・出力インピーダンス $R_{out}$ が非常に小さい

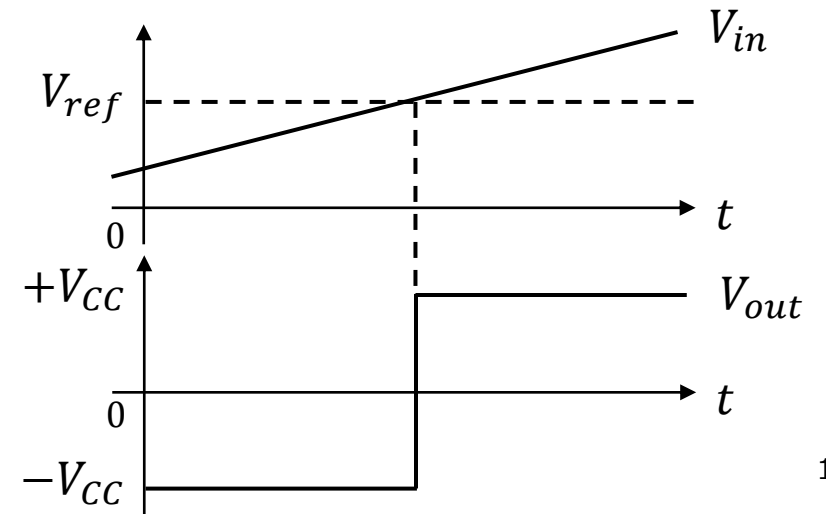
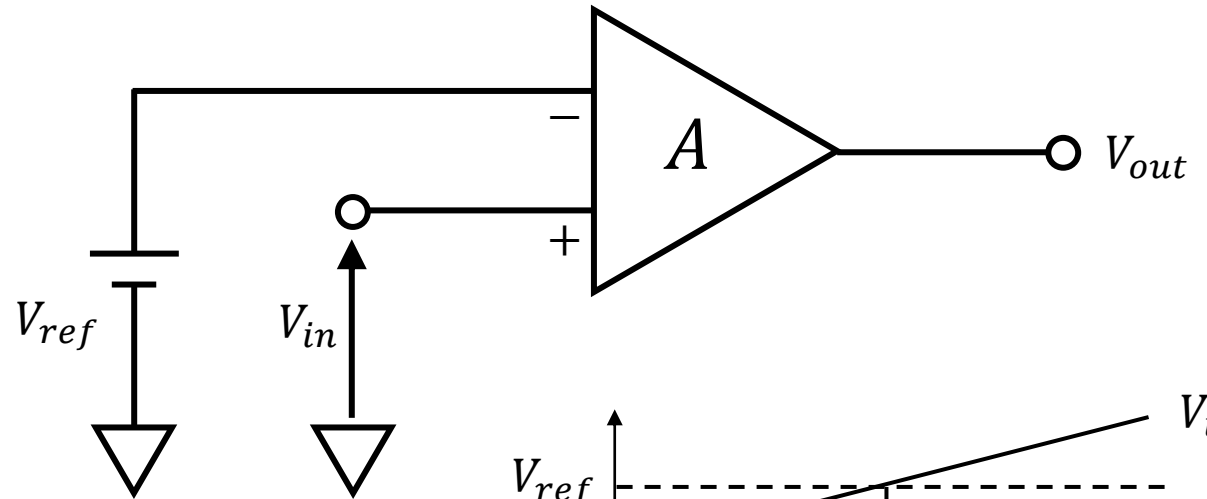
## 比較器 (コンパレータ)



$$V_{out} = A(V_+ - V_-)$$

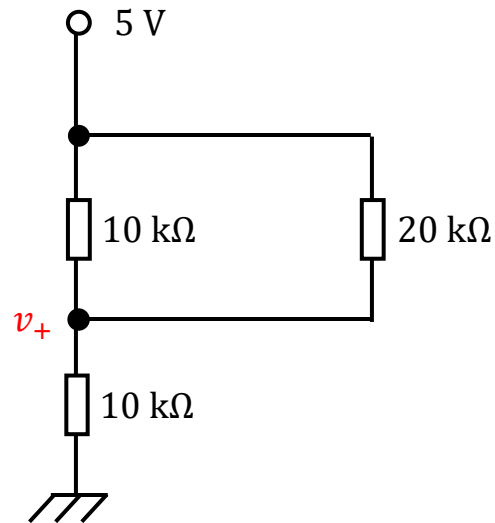
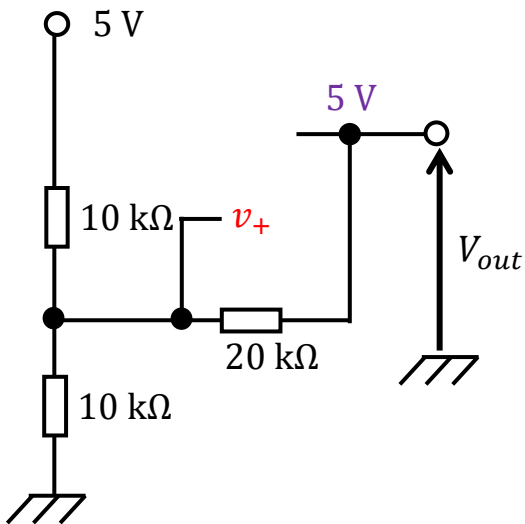
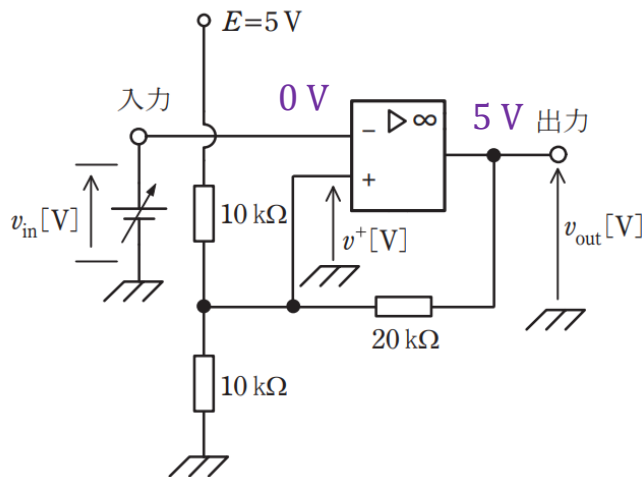
増幅率 $A$ はどのくらい?

Ans. 10000倍!!!



# 導出のポイント

$v_{in} = 0V$  のとき  $\rightarrow v_- < v_+ \rightarrow v_{out} = 5V$

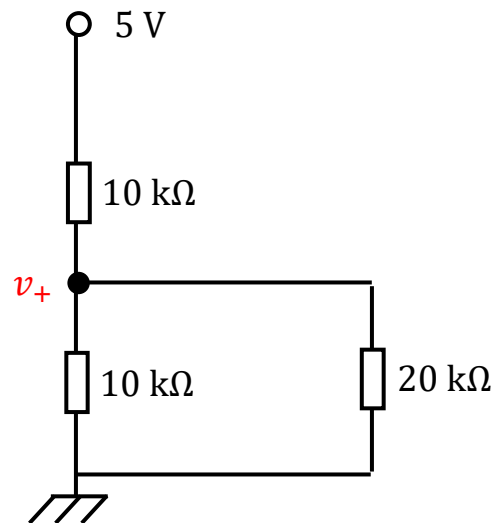
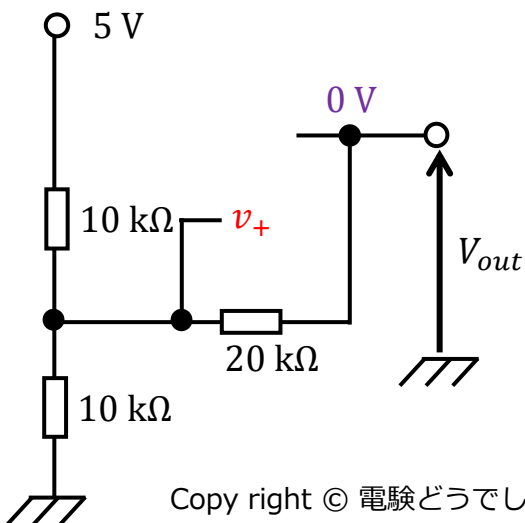
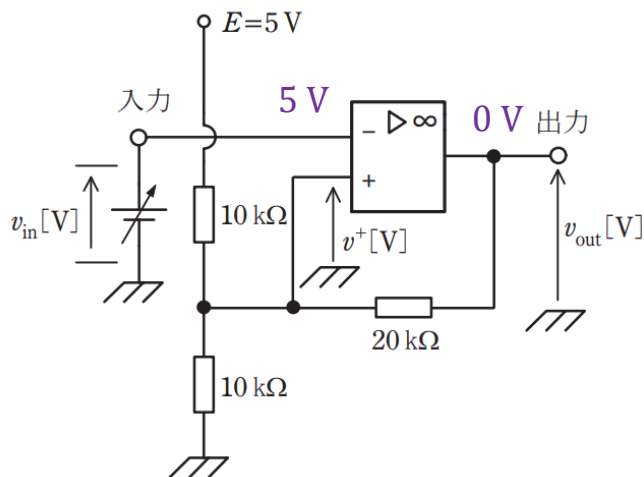


$$v_+ = \frac{10}{10 + \frac{10 \times 20}{10 + 20}} \times 5$$

$$= \frac{50}{10 + \frac{20}{3}} = \frac{3}{50} \times 50$$

$$= 3V$$

$v_{in} = 5V$  のとき  $\rightarrow v_- > v_+ \rightarrow v_{out} = 0V$



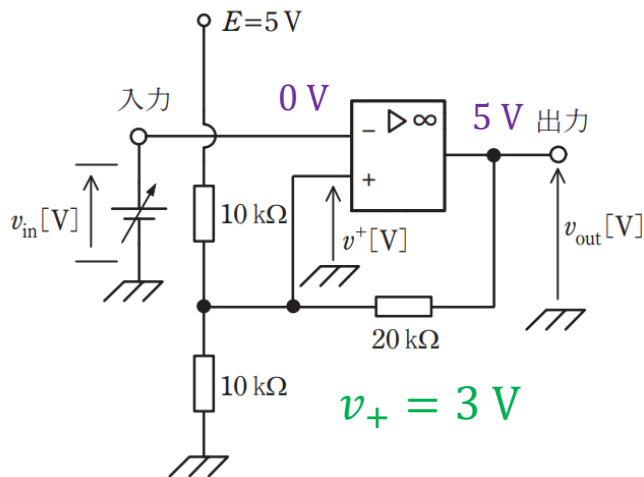
$$v_+ = \frac{\frac{20}{3}}{10 + \frac{20}{3}} \times 5$$

$$= \frac{3}{50} \times \frac{20}{3} \times 5$$

$$= 2V$$

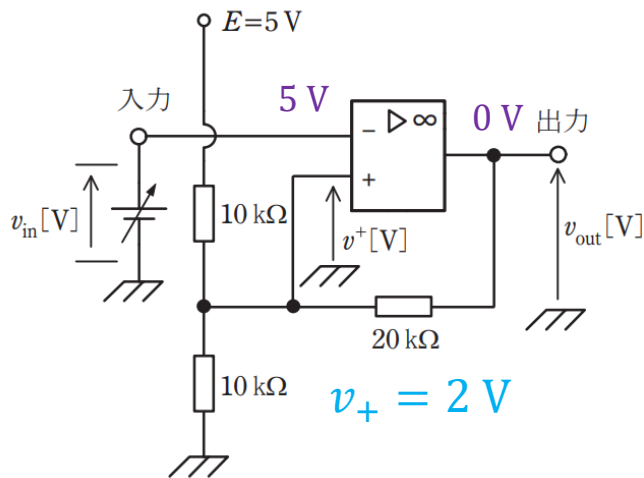
# 導出のポイント

$v_{in} = 0\text{ V}$  のとき  $\rightarrow v_- < v_+ \rightarrow v_{out} = 5\text{ V}$



$v_+ = 3\text{ V}$

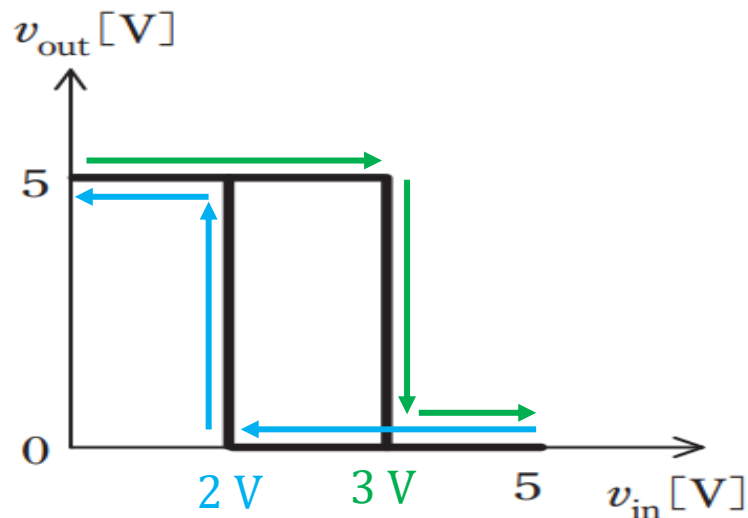
$v_{in} = 5\text{ V}$  のとき  $\rightarrow v_- > v_+ \rightarrow v_{out} = 0\text{ V}$



$v_+ = 2\text{ V}$

- 出力電圧  $v_{out}$  は  $0\sim 5\text{ V}$  の間にあるため、演算増幅器の非反転入力電圧  $v^+[\text{V}]$  は  $2\text{ (ア)}$   $\sim 3$  の間にある。
- 入力電圧  $v_{in}$  を  $0\text{ V}$  から徐々に増加させると、 $v_{in}$  が  $3$   $(イ)$   $\text{ V}$  を上回った瞬間、 $v_{out}$  は  $5\text{ V}$  から  $0\text{ V}$  に変化する。
- 入力電圧  $v_{in}$  を  $5\text{ V}$  から徐々に減少させると、 $v_{in}$  が  $2$   $(ウ)$   $\text{ V}$  を下回った瞬間、 $v_{out}$  は  $0\text{ V}$  から  $5\text{ V}$  に変化する。
- 入力  $v_{in}$  に対する出力  $v_{out}$  の変化を描くと、図2のような  $(エ)$  を示す特性と **ヒステリシス** なる。

上記の記述中の空白箇所(ア)～(エ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)～(5)のうちから一つ選べ。



# R04 問13

問13 次の文章は、図1の回路の動作について述べたものである。

図1は、演算増幅器(オペアンプ)を用いたシュミットトリガ回路である。この演算増幅器には+5Vの単電源が供給されており、0Vから5Vまでの範囲の電圧を出力できるものとする。

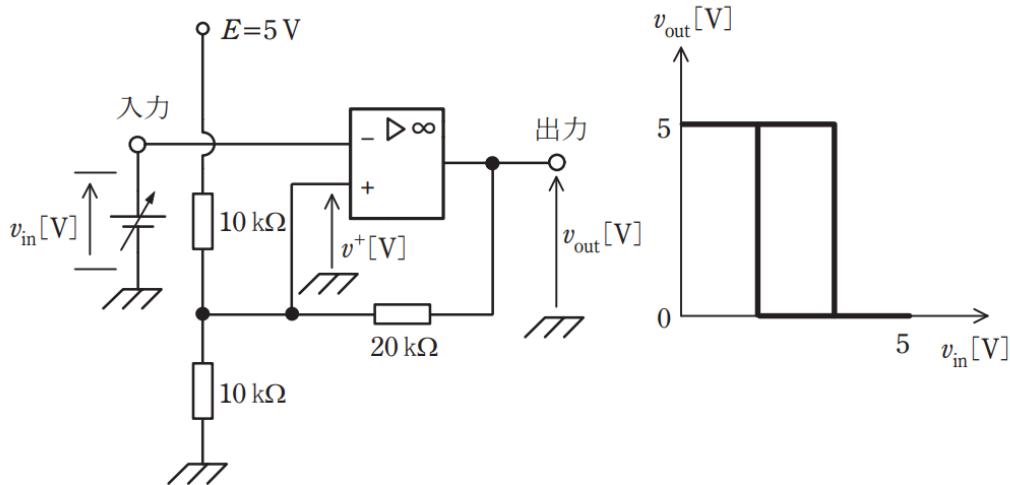


図1

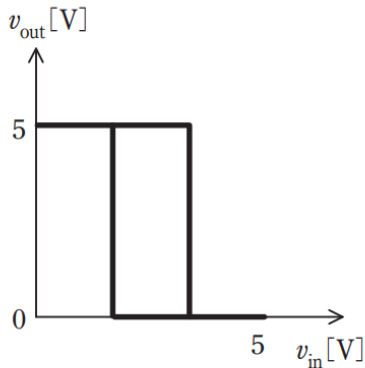


図2

- 出力電圧  $v_{out}$  は0~5Vの間にあるため、演算増幅器の非反転入力電圧  $v^+$  [V] は  $\boxed{2 \sim 3}$  の間にある。
- 入力電圧  $v_{in}$  を0Vから徐々に増加させると、 $v_{in}$  が  $\boxed{(イ)}$  Vを上回った瞬間、 $v_{out}$  は5Vから0Vに変化する。
- 入力電圧  $v_{in}$  を5Vから徐々に減少させると、 $v_{in}$  が  $\boxed{(ウ)}$  Vを下回った瞬間、 $v_{out}$  は0Vから5Vに変化する。
- 入力  $v_{in}$  に対する出力  $v_{out}$  の変化を描くと、図2のような  $\boxed{(エ)}$  を示す特性となる。  
**ヒステリシス**

上記の記述中の空白箇所(ア)~(エ)に当てはまる組合せとして、正しいものを次の(1)~(5)のうちから一つ選べ。

	(ア)	(イ)	(ウ)	(エ)
(1)	1.25~3.75	3.75	1.25	位相遅れ
(2)	1.25~3.75	1.25	3.75	ヒステリシス
(3)	2~3	2	3	ヒステリシス
(4)	2~3	2.75	2.25	位相遅れ
(5)	2~3	3	2	ヒステリシス