

# 電子回路：第10回 半導体素子

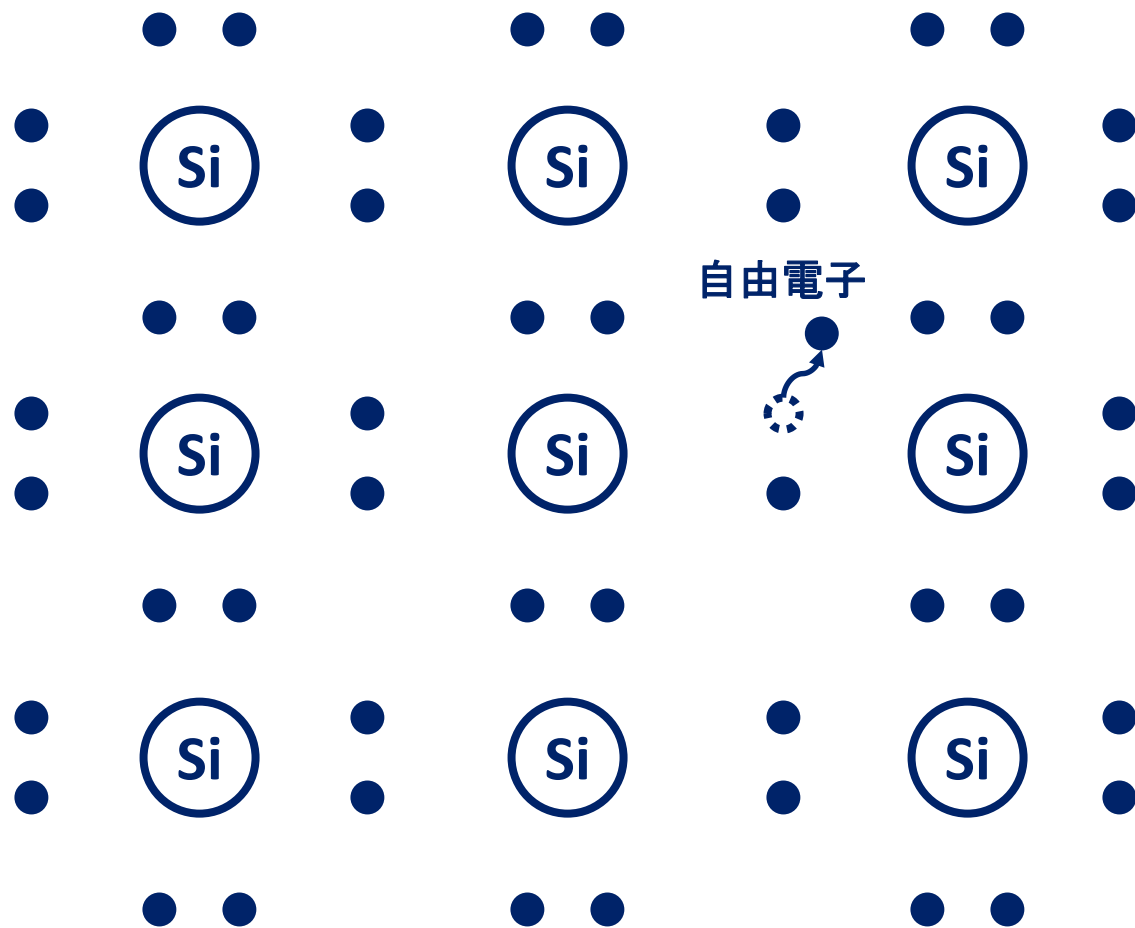
---

基礎工学部情報科学科

栗野 皓光

[awano@ist.osaka-u.ac.jp](mailto:awano@ist.osaka-u.ac.jp)

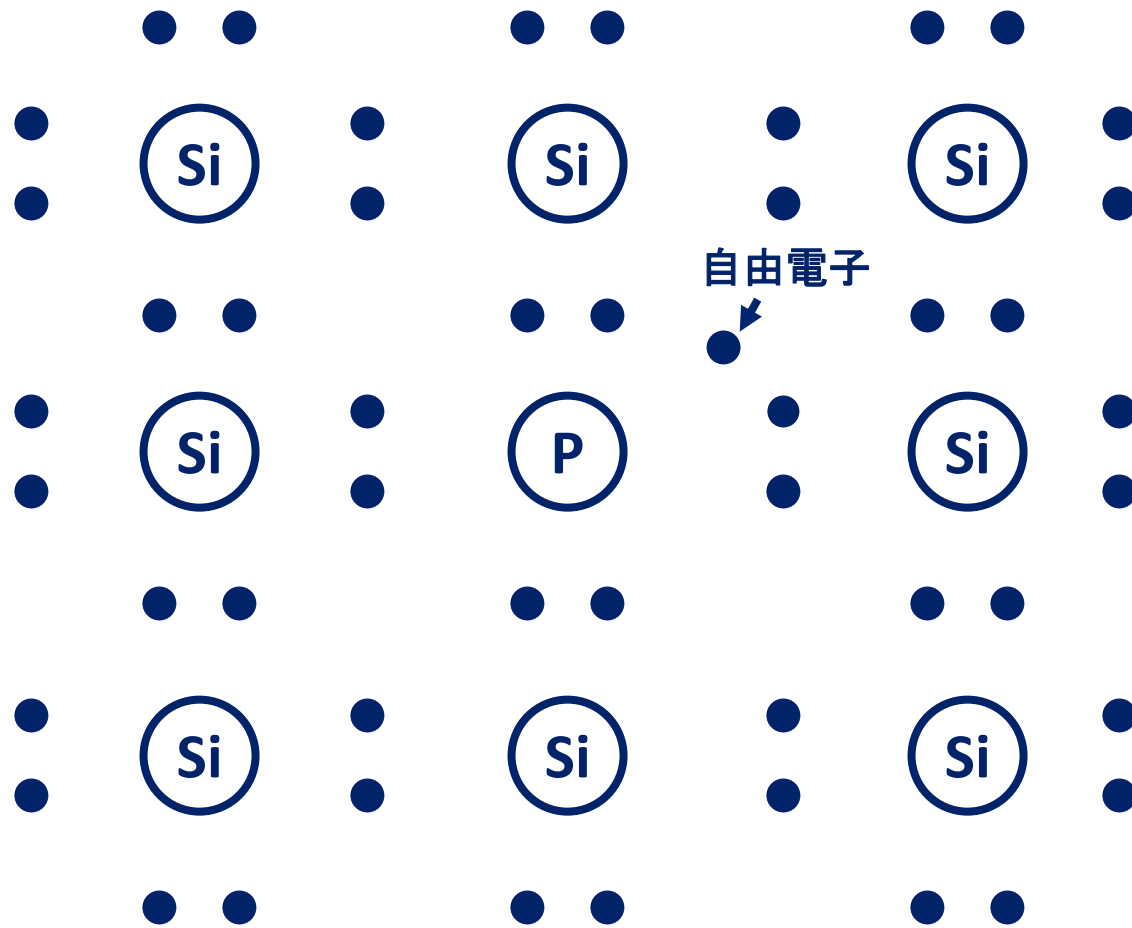




- シリコン原子は4つの電子を持ち、原子同士が共有結合
- 極まれに共有結合を作っている電子が飛び出して自由電子となる
- 電子が抜けた穴はホールと呼ばれ正の電荷を持つ粒子の様に振る舞う
- この状態では殆ど電流を流さない



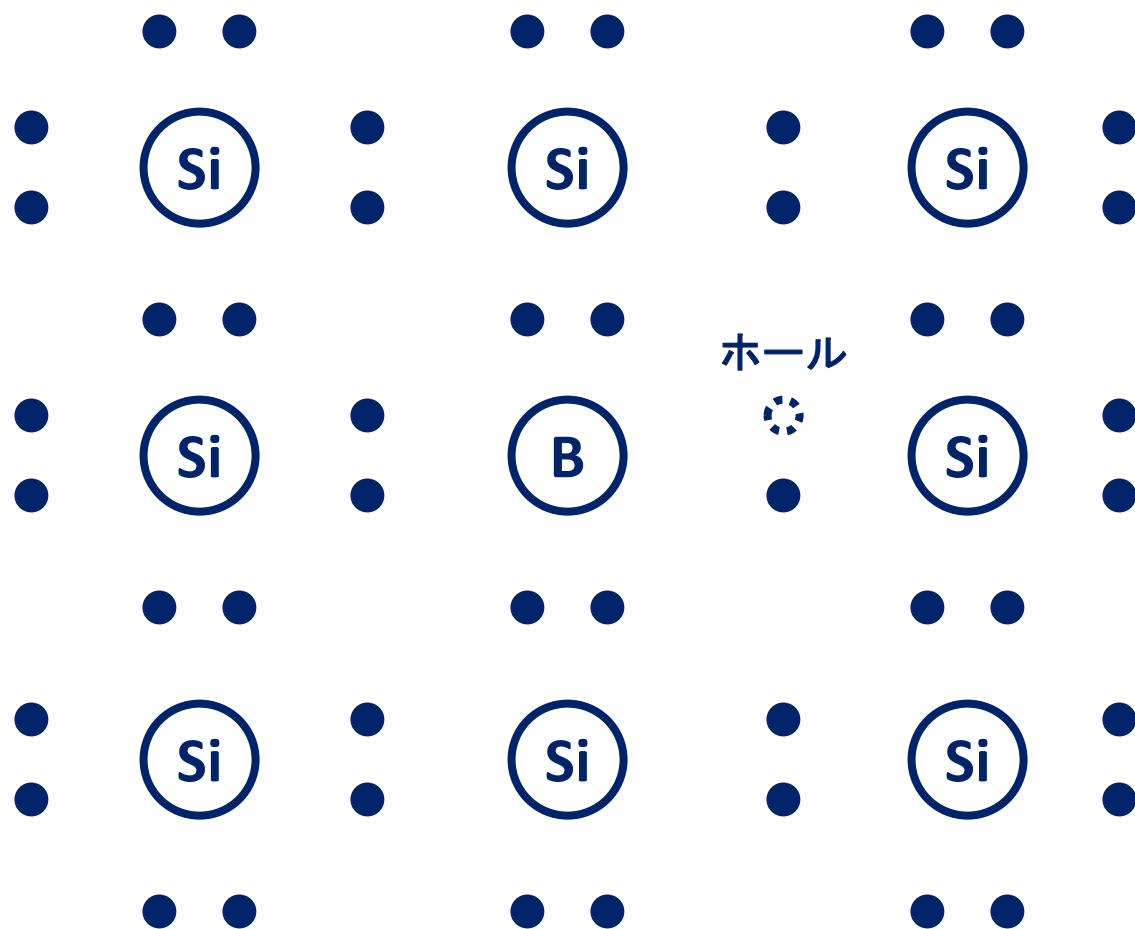
# 不純物半導体 (n型)



- 5価の不純物（ヒ素：As・リン：P等）を混ぜると余った電子が自由電子となる
- ヒ素・リンをドナー，ドナーを加えた半導体をn型半導体と呼ぶ



# 不純物半導体 (p型)

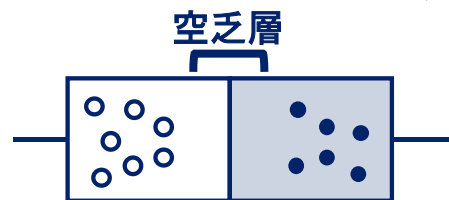


- 3価の不純物（ホウ素：B）を混ぜると電子の足りない箇所（ホール）が出来る  
⇒見かけ上は正の電荷を持つ粒子が増える
- ホウ素をアクセプタ，ホールを持つ半導体をp型半導体と呼ぶ

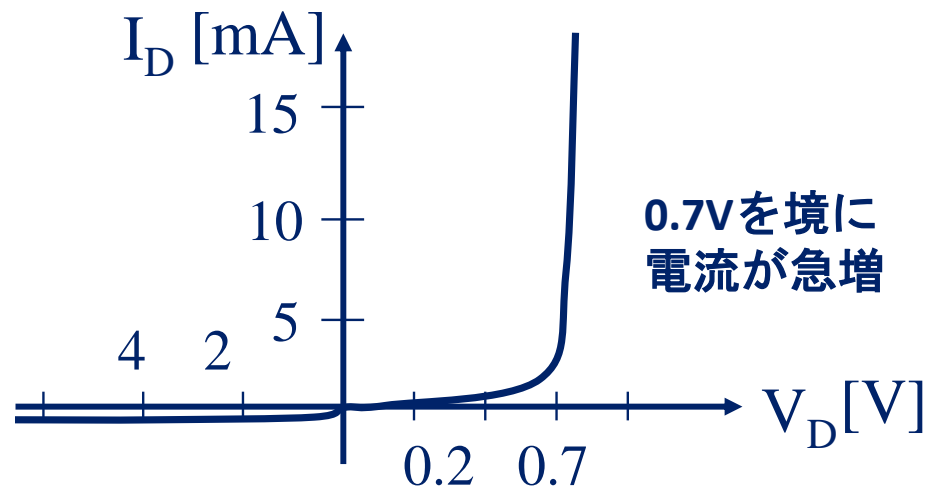


# ダイオード

ダイオード：p型とn型半導体を結合したもの

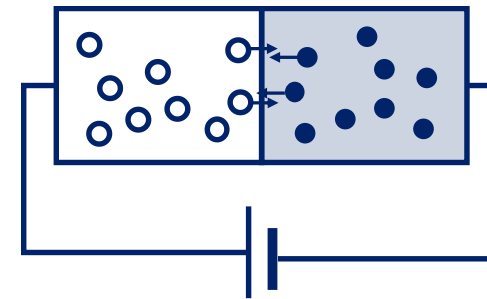


PN接合面のホールと自由電子が結合  
⇒キャリアが存在しない領域（空乏層）を作る



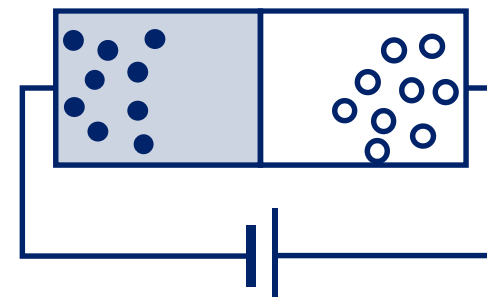
ダイオードの電流電圧特性

□ p側に正の電圧， n側に負の電圧を印加した場合



ホールと電子が押し出され接合領域で再結合・消失  
⇒電流が流れる

□ p側に負の電圧， n側に正の電圧を印加した場合

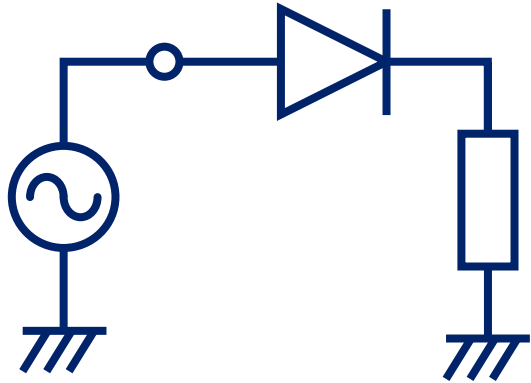


ホールはマイナス極に，電子はプラス極に  
引っ張られ電流は流れない

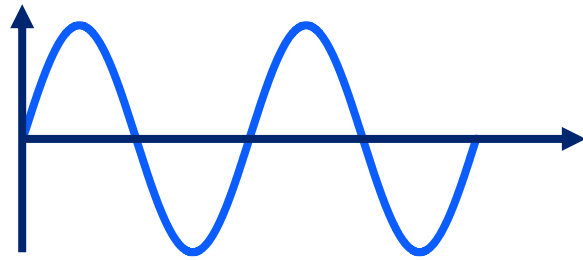


# ダイオードを使った整流回路

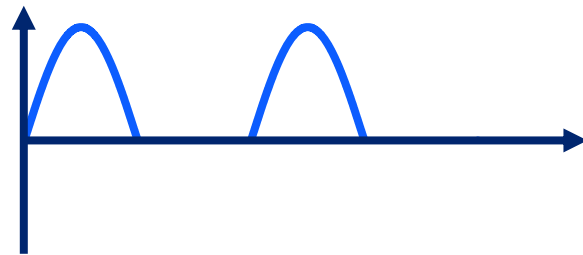
## 半波整流回路



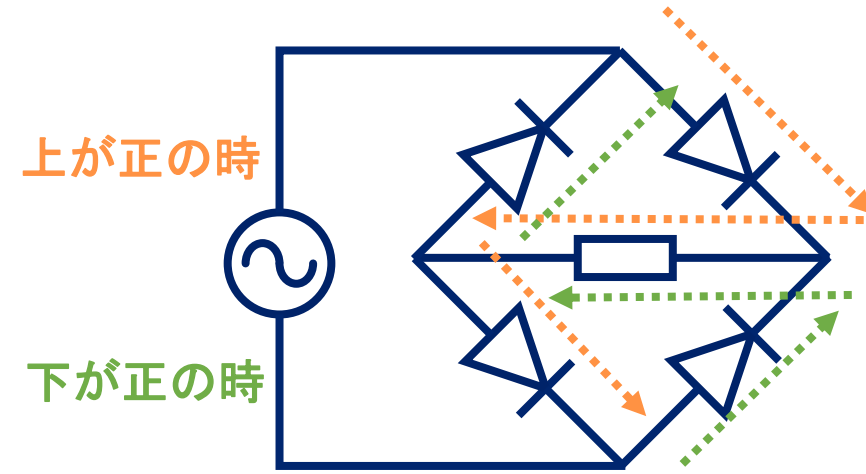
入力電圧



付加抵抗を  
流れる電流



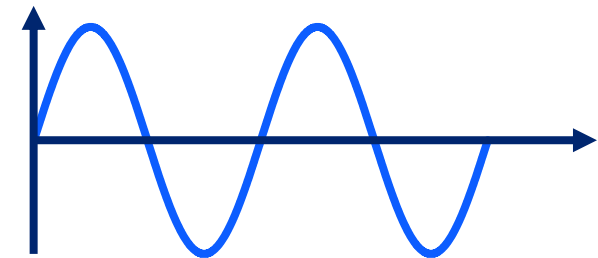
## ブリッジ整流回路



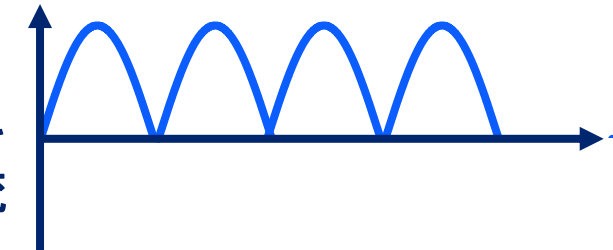
上が正の時

下が正の時

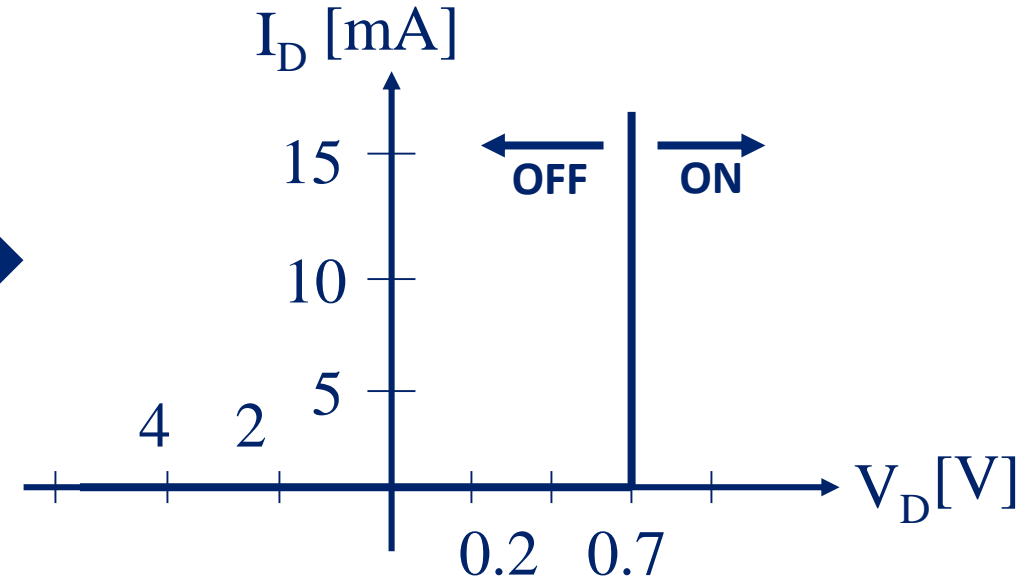
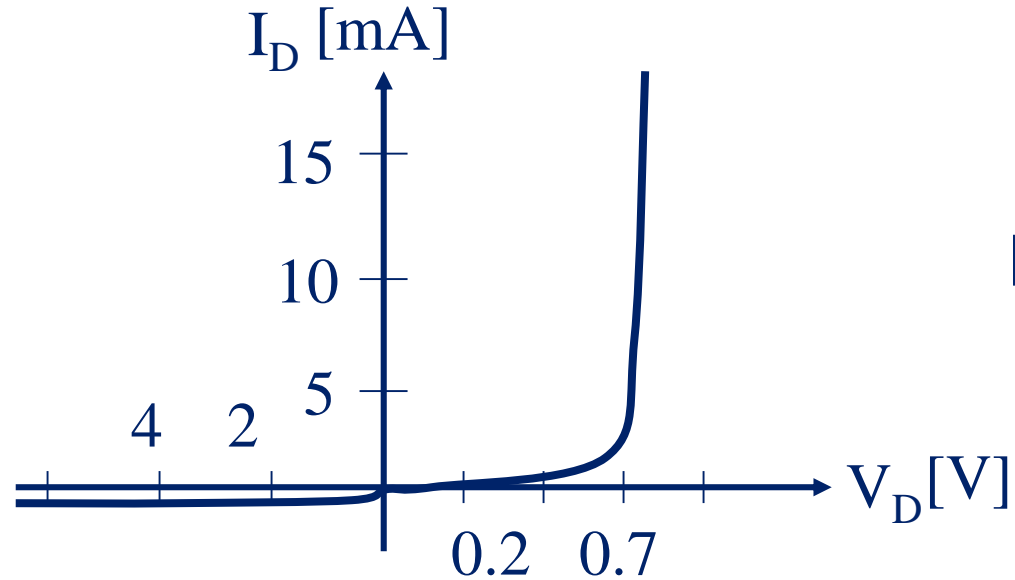
入力電圧



付加抵抗を  
流れる電流



# ダイオードのスイッチングモデル



□ 順方向電圧が0.7より低い場合



電流は（殆ど）流れない  
⇒スイッチOFF

□ 順方向電圧が0.7より高い場合



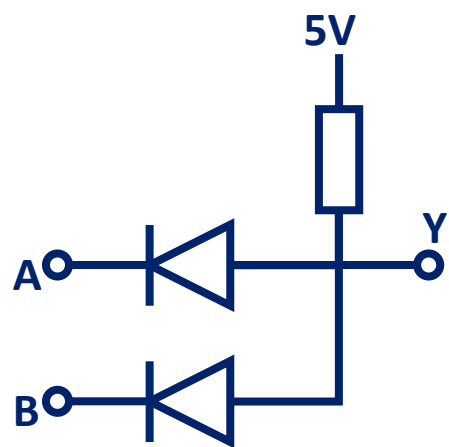
電流が急激に流れ始める  
⇒スイッチON

この時、アノード・カソード間には  
約0.7Vの電圧差が生じる



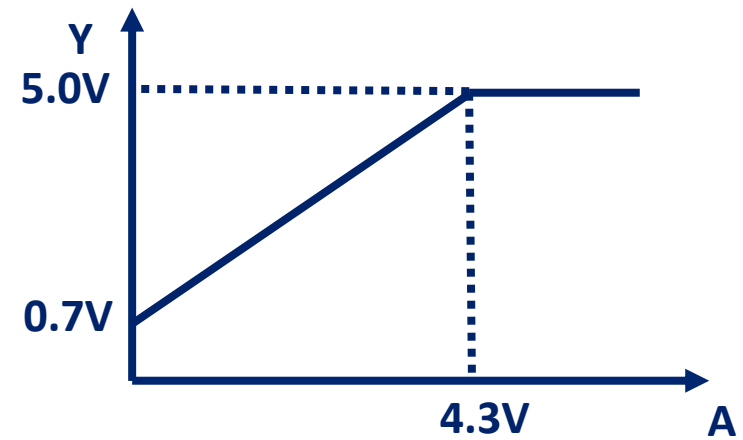
# ダイオードを使った論理回路 (Diode Diode Logic; DDL)

## 論理積 (AND)



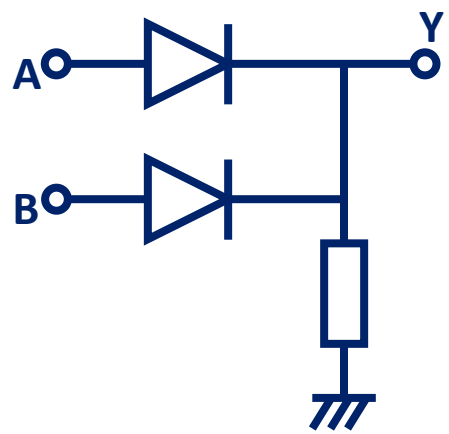
| A  | B  | Y    |
|----|----|------|
| 0V | 0V | 0.7V |
| 0V | 5V | 0.7V |
| 5V | 0V | 0.7V |
| 5V | 5V | 5V   |

B:Vddで固定しAの電圧のみ変化させると...



0/1の境界 (しきい値電圧) が4.3V  
⇒実用上は不便

## 論理和 (OR)



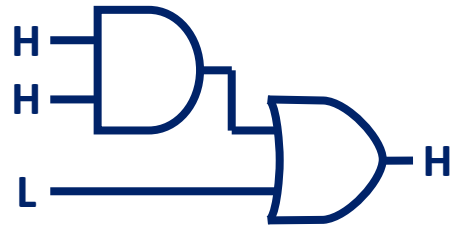
| A  | B  | Y    |
|----|----|------|
| 0V | 0V | 0.0V |
| 0V | 5V | 4.3V |
| 5V | 0V | 4.3V |
| 5V | 5V | 4.3V |

## ダイオード論理の限界

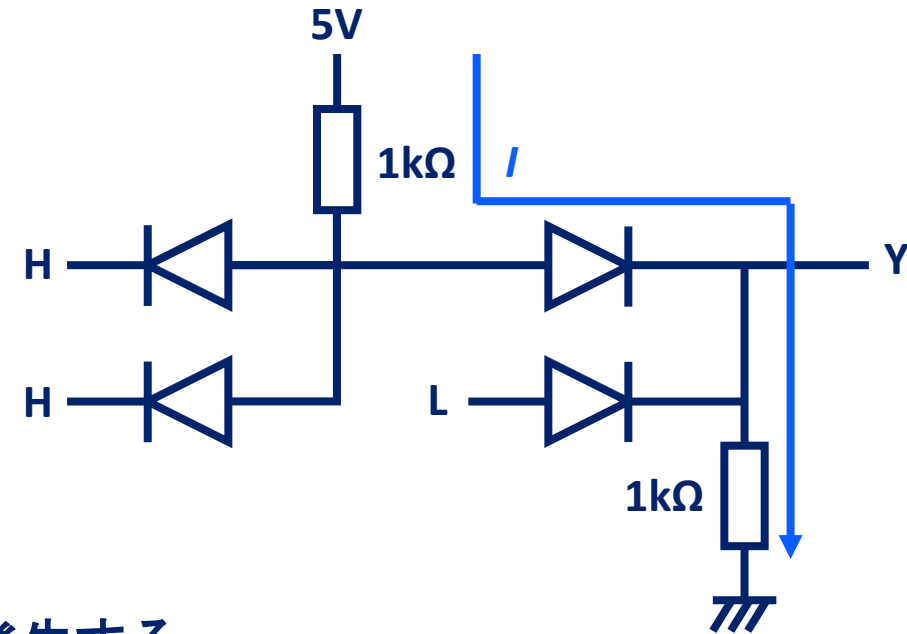
- 論理否定 (NOT) が作れない
- 電圧降下のためにカスケード接続が困難







DDLで実現すると



□ ONしているダイオードでは0.7Vの電圧降下が発生する

$$\Rightarrow \text{電流} I \text{ は } I = \frac{5\text{V} - 0.7\text{V}}{1\text{k}\Omega + 1\text{k}\Omega} = 2.15\text{mA}$$

よってY点の電位は  $2.15\text{mA} \times 1\text{k}\Omega = 2.15\text{V}$

□ 電源電圧（5V）と比較して半分程度の電圧しか出力されない

⇒ DDLをそのまま繋げただけでは正しく論理が伝播されない

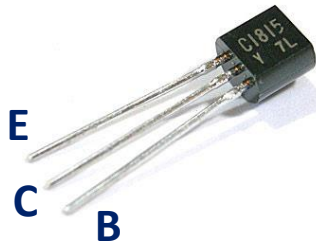
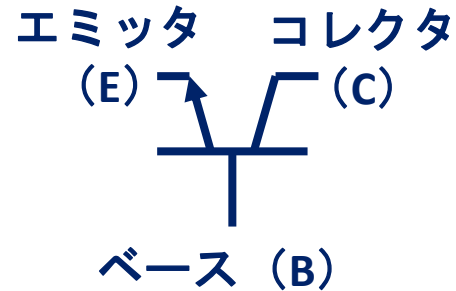
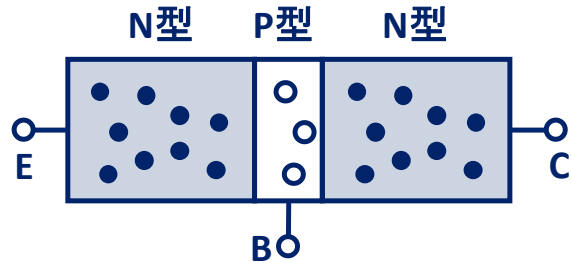
⇒ トランジスタが必要



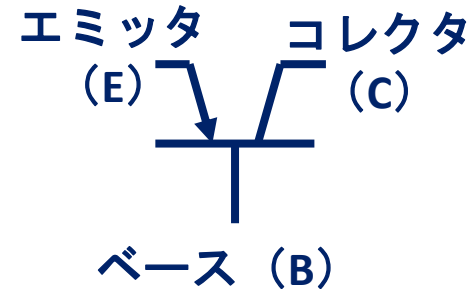
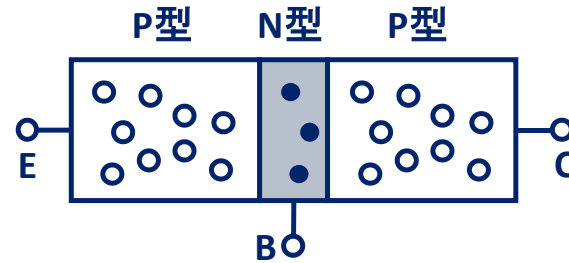
# バイポーラトランジスタ

- ベース領域は薄く（数 $\mu\text{m}$ 程度）作られている
- エミッタ側の不純物濃度はコレクタ側に比べ高い

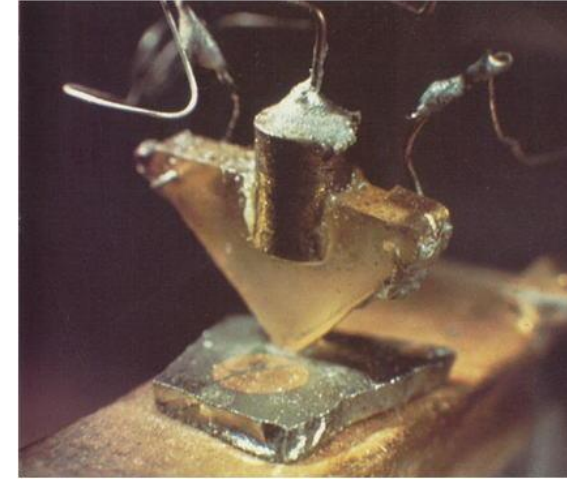
## nnp型トランジスタ



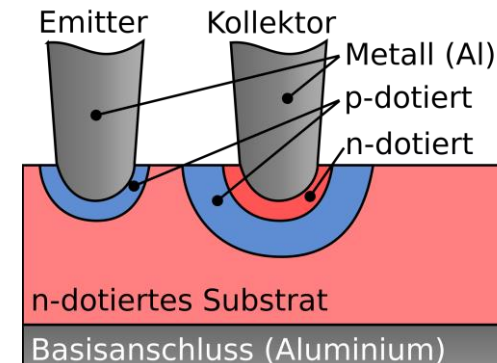
## pnp型トランジスタ



## 点接触型トランジスタ (1947年)

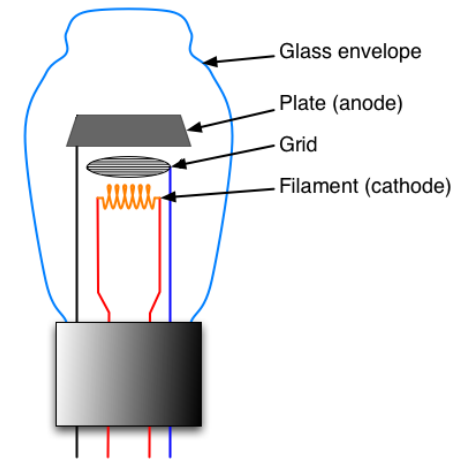


<http://www.shmj.or.jp/museum2010/exhibi304.htm>



<https://ja.wikipedia.org/wiki/点接触型トランジスタ>

## 真空管(1904年)

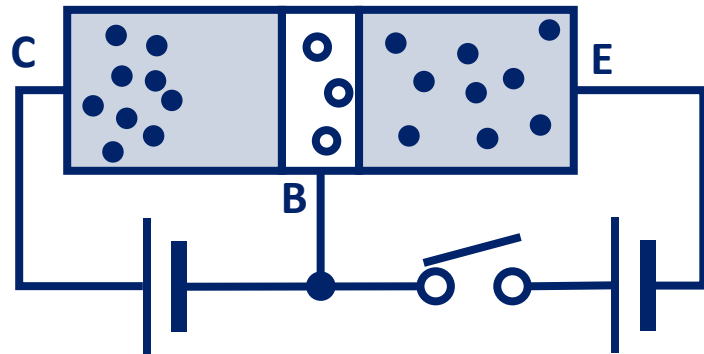


<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E7%9C%9F%E7%A9%BA%E7%AE%A1>

# バイポーラトランジスタの動作

- コレクタ-ベース間にコレクタ側が正となるように電圧を印加

PN接合に逆方向電圧を印加している  
⇒電流は流れない

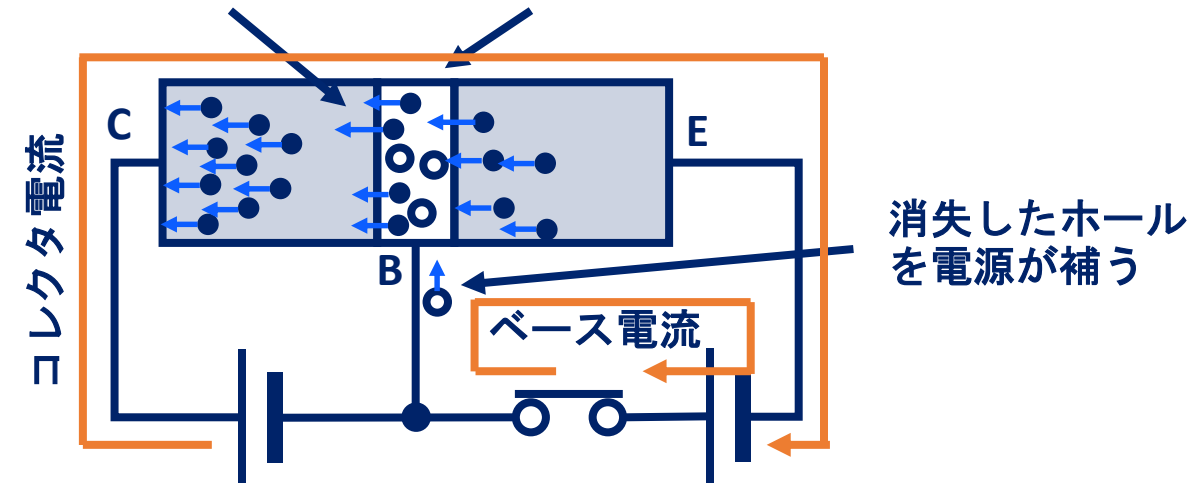


- スイッチを閉じ、ベース-エミッタ間にも電圧を印加

- コレクタ-エミッタ間に電流が流れる

大半（99%程度）の電子はコレクタに流れ込む

ベースに流れ込んだ電子の一部（1%程度）はホールと再結合

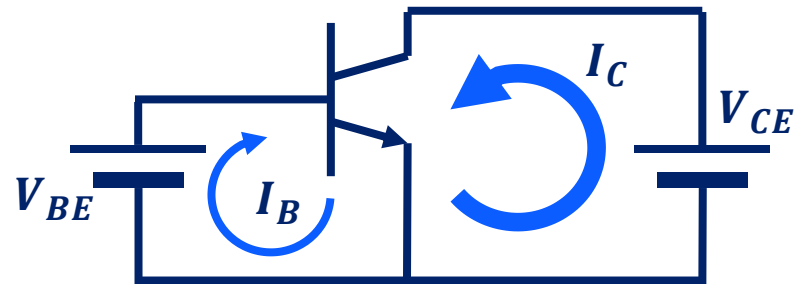


1. エミッタ内の自由電子が電源のマイナスに押し出されベースに入る
2. ベースは非常に薄く作られているため、大部分の電子はベースを通り抜けてコレクタに流れ込む
3. コレクタに突き抜けた電子は電源の正極に引き寄せられ電流が流れる



# バイポーラトランジスタの特性

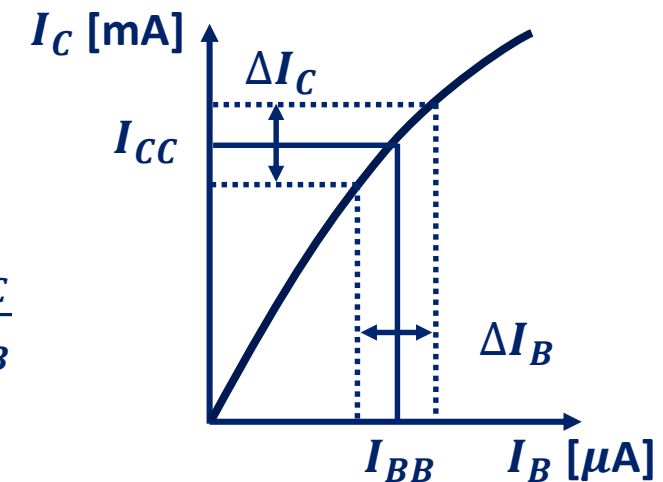
僅かなベース電流の差がコレクタ電流の大きく変化させる



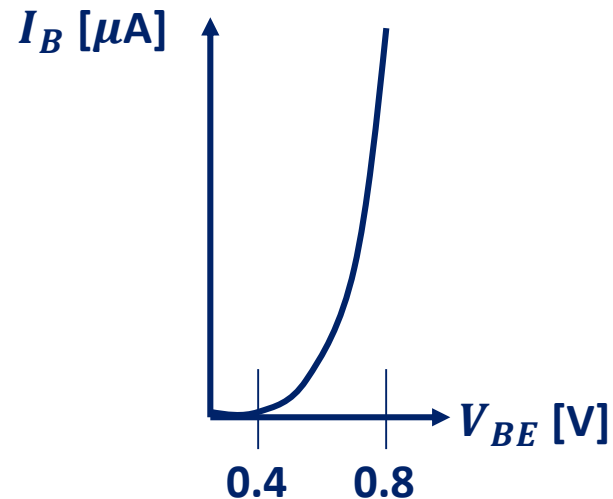
$V_{CE}$ を一定に保った時の  
 $I_C \cdot I_B$ の関係

$$\text{直流電流増幅率} : h_{FE} = \frac{I_{CC}}{I_{BB}}$$

$$\text{小信号電流増幅率} : h_{fe} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B}$$



$V_{CE}$ を一定に保った時の $I_B - V_{BE}$ の関係



$I_B$ を一定に保った時の $I_C - V_{CE}$ の関係

