

電気電子回路

第3回：半導体の基礎

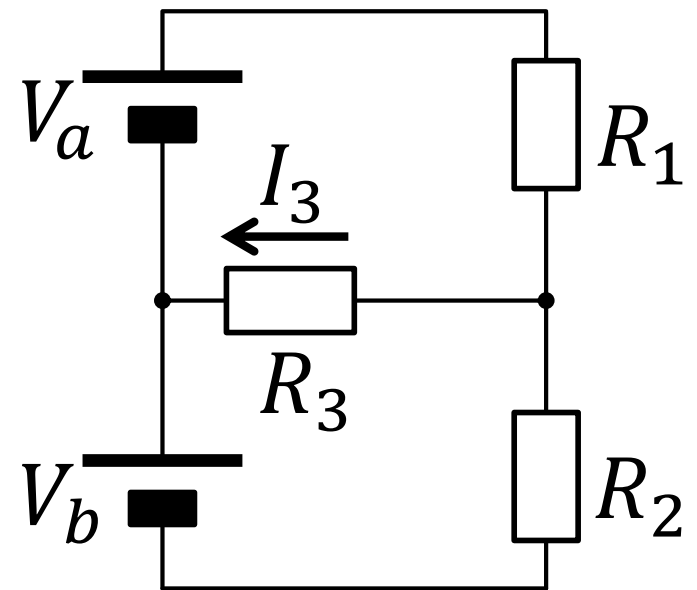
先週の復習

自分でやってみよう！

• 図の回路について、以下の問に答えよ。

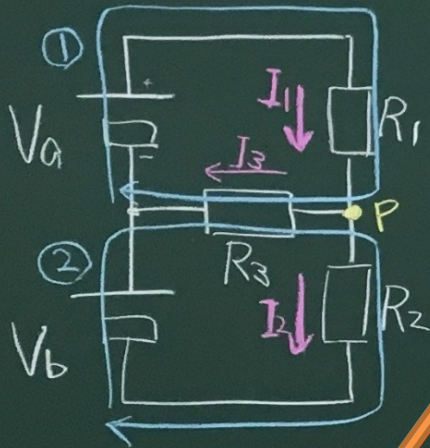
(1) $V_a = 7[\text{V}]$, $V_b = 1[\text{V}]$, $R_1 = R_2 = R_3 = 1[\Omega]$ の時の電流 I_3 を求めよ。

(2) $V_a = 2[\text{V}]$, $V_b = 5[\text{V}]$, $R_1 = R_2 = R_3 = 1[\Omega]$ の時の電流 I_3 を求めよ。



解答例

立式に必要な変数 I_1 , I_2 を定義する
(向きを図示すること!)



図の向きで R_1 , R_2 を流れる
電流を I_1 , I_2 とおく

点PについてKCLより
 $I_1 - I_2 - I_3 = 0$

①についてのKVLとオーム
の法則より

$$V_a - I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0$$

②について同様に

$$V_b + I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0$$

式を書くときは
符号に注意する

(1) 下の3式を解けばよい

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$7 - I_1 - I_3 = 0$$

$$1 + I_3 - I_2 = 0$$

答えは $I_3 = 2 \text{ [A]}$

単位を付ける!

(2) も同様に下の3式を解けばよい

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0$$

$$2 - I_1 - I_3 = 0$$

$$5 + I_3 - I_2 = 0$$

答えは $I_3 = -1 \text{ [A]}$

単位を付ける!

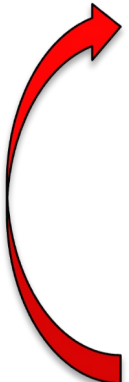
【補足】

(1) は I_3 の符号が正なので、図の矢印の通り、
右から左へ 2 [A] 流れることを意味する。

(2) は I_3 の符号が負なので、図の矢印と逆に、
左から右へ 1 [A] 流れることを意味する。


今週からの授業の流れ

- 先週までは、線形素子(抵抗)だけからなる「電気回路」について学びました
- 今週から、非線形素子を含む「電子回路」について学びます



この授業の目的は基本的な電子回路の動作の解析や設計ができるようになることです

- 整流回路:教科書5.6節、増幅回路:教科書8章
- 論理回路:教科書7章、オペアンプ回路:教科書9章



そのためには準備として、様々な半導体素子の特性を知る必要があります

- ダイオード:教科書5章、トランジスタ:教科書6章

これらの素子の原理を定量的に明らかにするためには、半導体工学の基礎を学ぶ必要があります

- 半導体:教科書4章

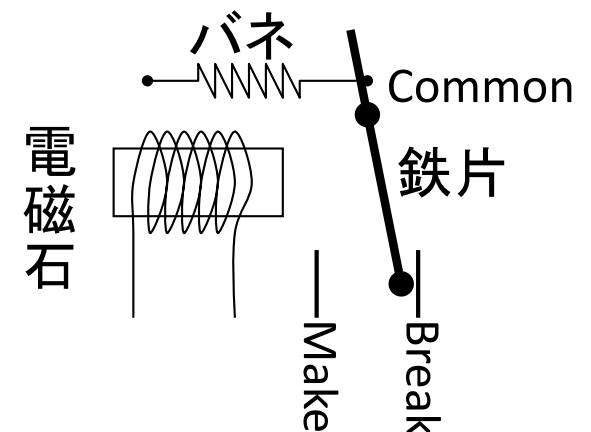
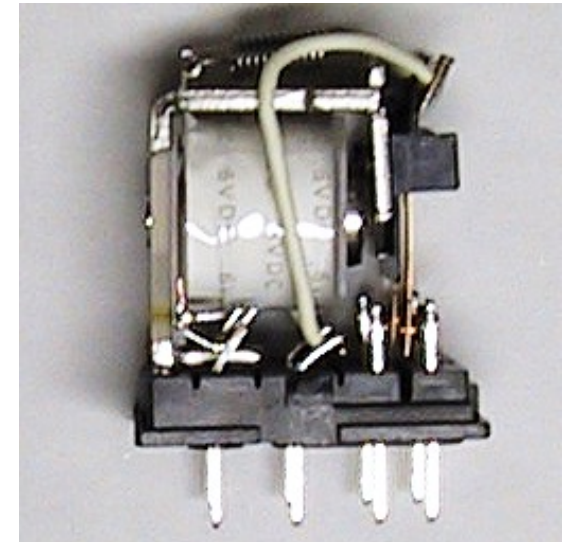
今週の目標

- 半導体がどういうものであるかについて、基本的なところを定性的におさえる
- 特にダイオードの仕組みと動作原理を定性的に理解する

能動素子の歴史

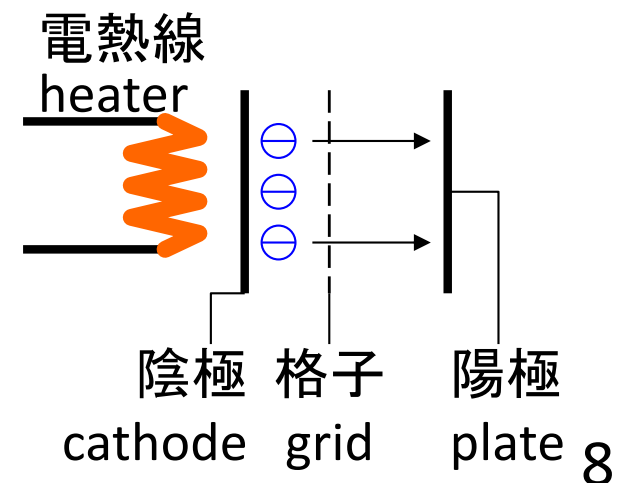
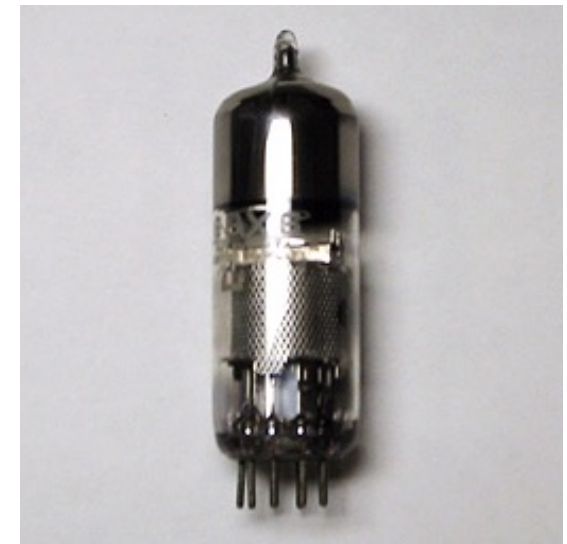
リレー (relay)

- 鉄片やバネのついたスイッチを電磁石と組み合わせたもので、電磁石に電流を流すと、磁力でスイッチが動く
- Harvard大学で1943年に完成された計算機Mark Iで演算素子として使用された
- その後は、電力制御用の素子として様々な製品に使われてきた
 - コイルに数V、数10mAの電流を流すだけで、100V、数Aの電源をON/OFFすることも可能



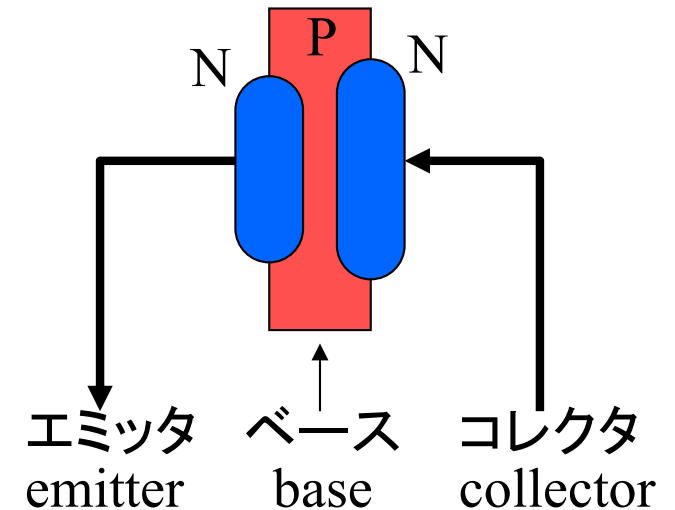
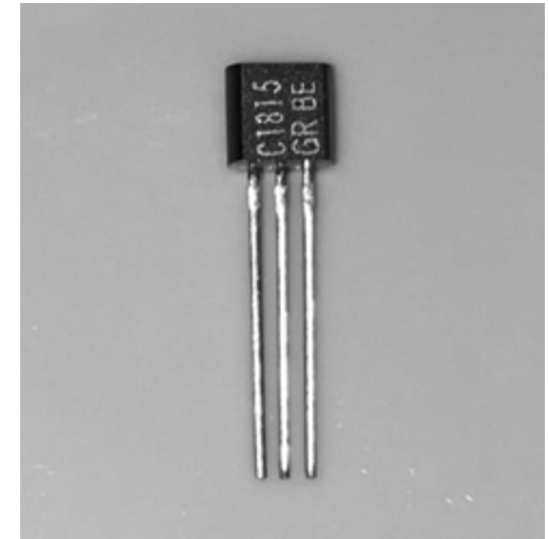
真空管 (vacuum tube)

- 真空にしたガラス管の内部に、格子を挟んで2枚の電極(陰極と陽極)があり、陰極を電熱線で加熱すると陰極から熱電子が飛び出すが、格子の電圧を加減することで陽極に到達する熱電子の量(つまり電流)を制御できる
- Pennsylvania大学で作られた計算機ENIACで使用(1946年)
- その後、アナログ信号の増幅素子として、ラジオ、白黒テレビ、オーディオ機器などに使われていた



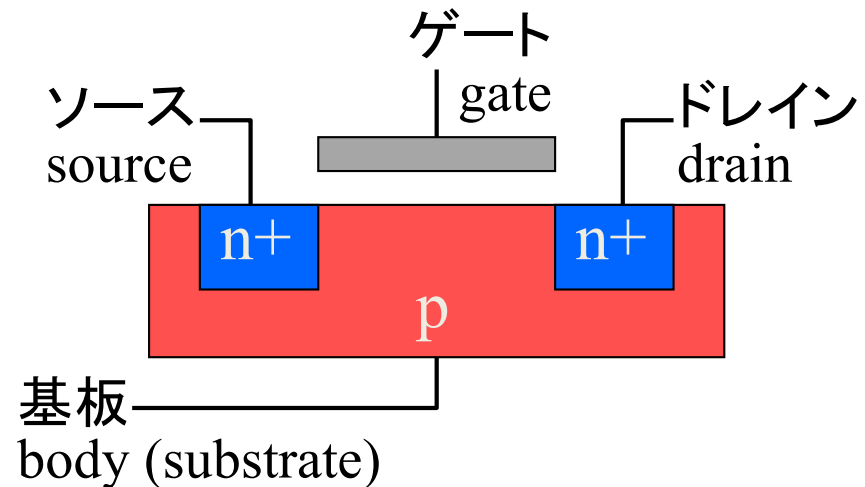
バイポーラトランジスタ (bipolar junction transistor)

- 半導体 (Ge、Si など) の純結晶に、微量のP型不純物を含む部分と微量のN型不純物を含む部分を「PNP」または「NPN」の順に形成したもので、中央の端子を流れる電流により、両端を流れる電流の大きさを制御できる
- 1951年に完成された計算機 UNIVAC I で使用された
- 動作電圧、小ささ、寿命など、あらゆる面で真空管より優れており、電池で動作するラジオなど、電気製品に革新をもたらした



電界効果トランジスタ(FET)

- 半導体に外部から電界をかけると、電流を流すP型・N型領域と電流を流さない空乏層の大きさが変化する性質を利用したもの
- 接合型電界効果トランジスタ(JFET)とMOS電界効果トランジスタ(MOSFET)がある
 - 特にMOSFETは1cm角のシリコンチップ上に1億個以上を集積実装することができる



半導体の基本

導体、半導体、絶縁体(教科書P.38)

- 導体(conductor)
 - 金属など
 - 自由電子が多く存在し、電気抵抗が小さい
 - 温度が高くなると電気抵抗が大きくなる(正の温度係数)
- 半導体(semiconductor)
 - シリコン、ゲルマニウムなどの単結晶
 - 電気抵抗は導体と絶縁体の中間
 - 温度が高くなると電気抵抗が小さくなる(負の温度係数)
- 絶縁体(insulator)
 - ガラス、ゴムなど
 - 電気抵抗が極めて大きい

クイズ(1)

• 半導体の材料となる「シリコン」は、常温ではどのような状態ですか？

1. 気体
2. 液体
3. 固体(軟らかい)
4. 固体(硬い)

クイズ(1)の答

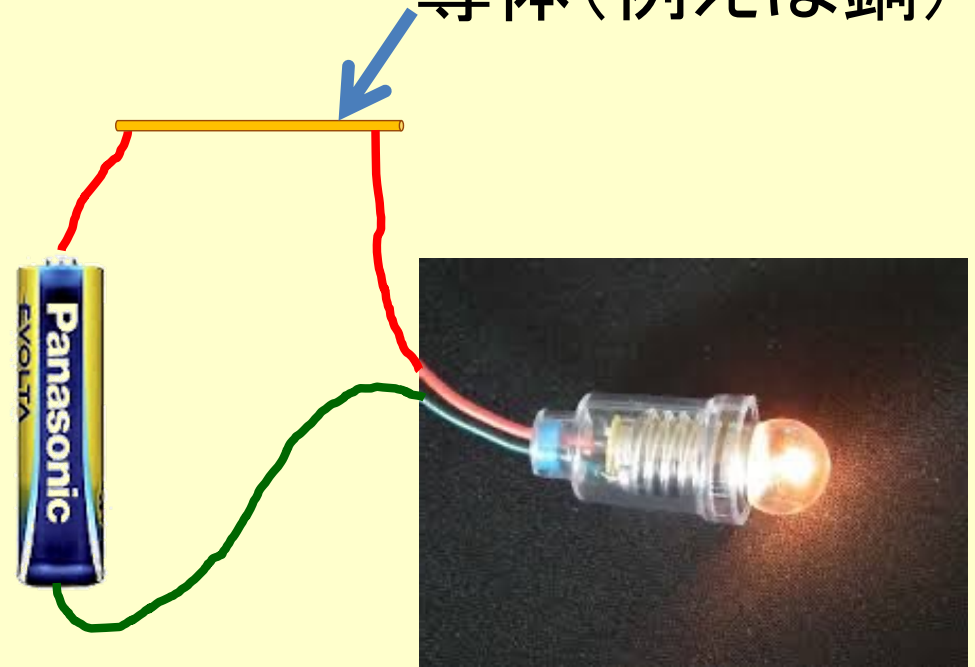
4. 固体(硬い)

- 半導体の原料となる「シリコン(silicon)」は、ケイ素という元素(元素記号 Si、原子番号 14)を指す
- 半導体の材料となるのはシリコン等の**単結晶**
- 常温で**固体**であり、**にぶい灰色**で光沢があり、かなり**硬い**(力をかけると**割れる**)
- ちなみに「**シリコーン**」は、シリコン原子を含む高分子化合物であり、オイルや樹脂(ゴム)等の製品に使われているが、**半導体デバイスとは別物**である

クイズ(2)

- **導体**は電気をよく通すので、右のように電球が**明るく光ります**
- **絶縁体**は電気をほとんど通さないので、電球は**全く光りません**
- **半導体**だとどうでしょうか？
 1. 明るく光る
 2. 薄暗く光る
 3. 全く光らない

断面積 1mm^2 、長さ10cmの
導体(例えば銅)



クイズ(2)の答

3. 全く光らない

- 銅(導体)の場合

- 断面積 1mm^2 、長さ 10cm の銅の針金の抵抗は $1.7 \times 10^{-3} \Omega$

- ガラス(絶縁体)の場合

- 断面積 1mm^2 、長さ 10cm のガラス棒の抵抗は $10^{15} \Omega$

- 純粋なシリコン(ケイ素)単結晶(半導体)の場合

- 断面積 1mm^2 、長さ 10cm のシリコン棒の抵抗は $2.5 \times 10^8 \Omega$

- 不純物添加で抵抗を $\frac{1}{1000}$ にすることは可能

- 電球を光らせるのは **ムリ**

1億～1千億倍

1千万～100億倍

銅の抵抗率

シリコンの抵抗率

ガラスの抵抗率

クイズ(3)

• **炭素**は電気を通しますか？

1. 通さない
2. 通す
3. 通すこともあるし、通さないこともある

クイズ(3)の答

3. 通すこともあるし、通さないこともある

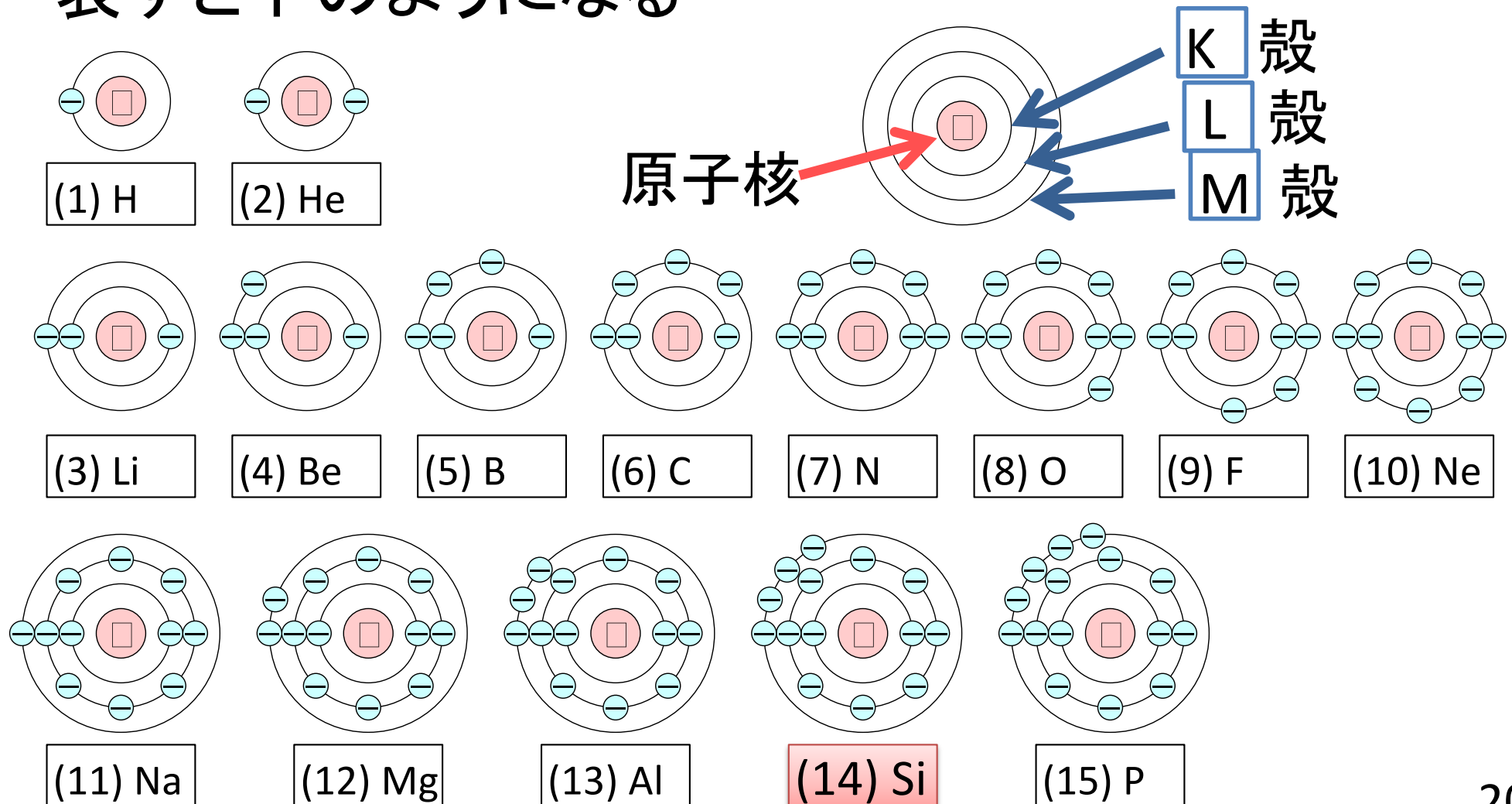
- ダイヤモンドは半導体
 - 純粋なダイヤモンドはほとんど電気を通さない
- グラファイトは導体
 - 鉛筆の芯は、そこそこ電気を通す
- **結晶構造**によって 導電性は **大きく変わる**
- 我々がこれから学ぶ半導体は、シリコンやゲルマニウムなどの「**単結晶**」である
 - **ポリシリコン(多結晶シリコン)**は、**導体**

原子の構造

- 原子核と **電子** からなる
 - 原子核は原子の中央にあり、陽子と中性子からなる
 - 電子はその周囲にある
 - 陽子の数(原子番号)と電子の数は等しい
- 原子核の周囲に電子が存在することができる軌道があり、軌道によって **エネルギー準位** が異なる
 - エネルギー準位の低い方から K 殻、L 殻、M 殻、N 殻、...
 - 更に s、p、d、... といった小軌道に分かれている
 - 各軌道が収容できる最大の電子数は決まっている
 - 電子は通常、エネルギー準位が低い軌道に収容される
 - 一番エネルギー準位の高い軌道上の電子が化学反応や電気伝導に寄与する(価電子)

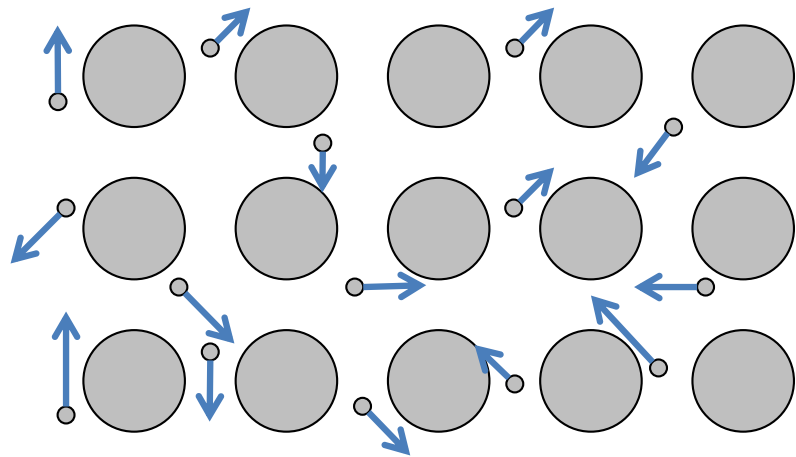
原子の模式図

- 電子がどの電子殻に何個存在するかを模式的に表すと下のようになる

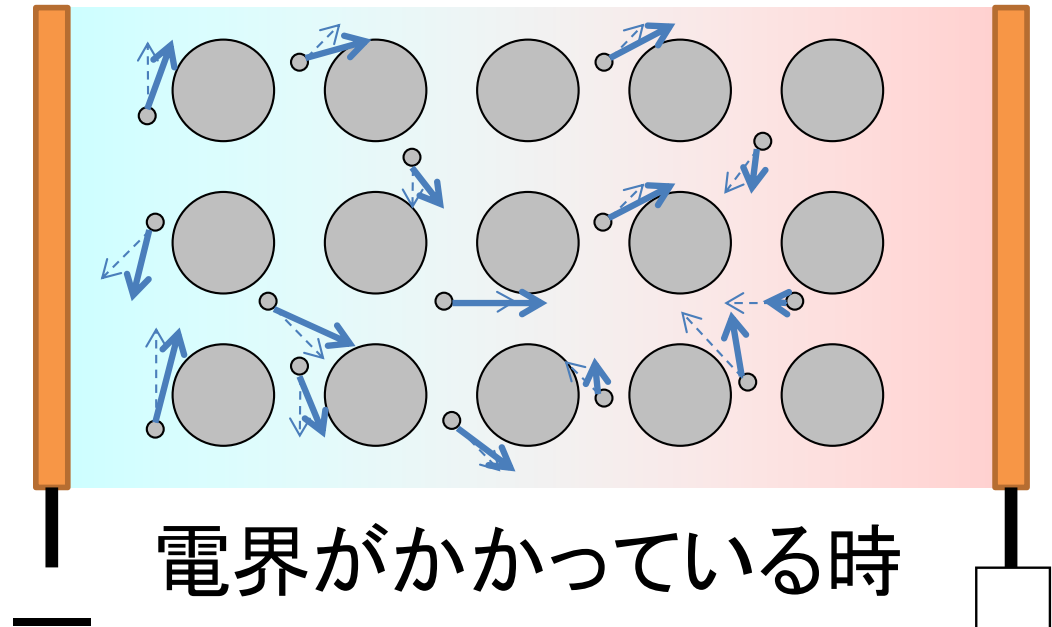


金属と自由電子

- 金属は、各原子の一番外側の軌道の電子が特定の原子から拘束されずに移動できる(自由電子)
- 金属に電界がかかると、自由電子は少しずつプラスの方に向かって動く(ドリフト電流)



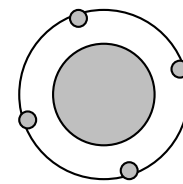
電界がかかってない時



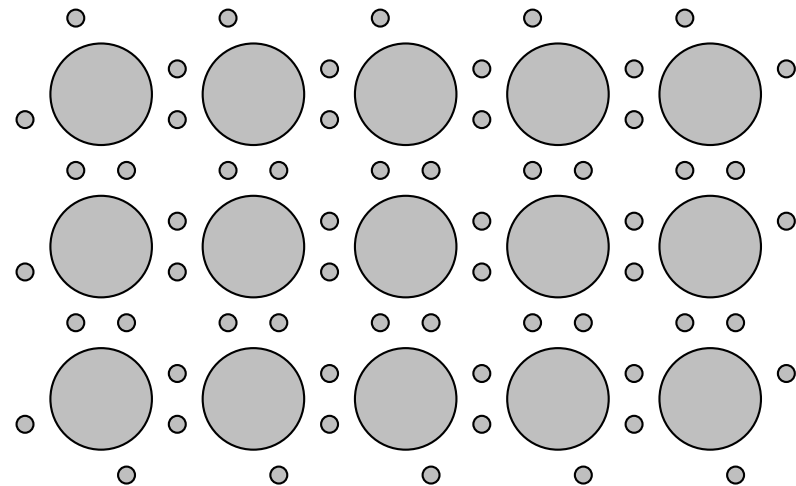
電界がかかっている時

真性半導体（i 型半導体）

- 第4族元素（Ge、**Si**等）の**純粋な単結晶**は、最外殻電子（4個）が過不足無く相互に結合しており移動できないため、**導電性がほとんどありません**



第4族原子

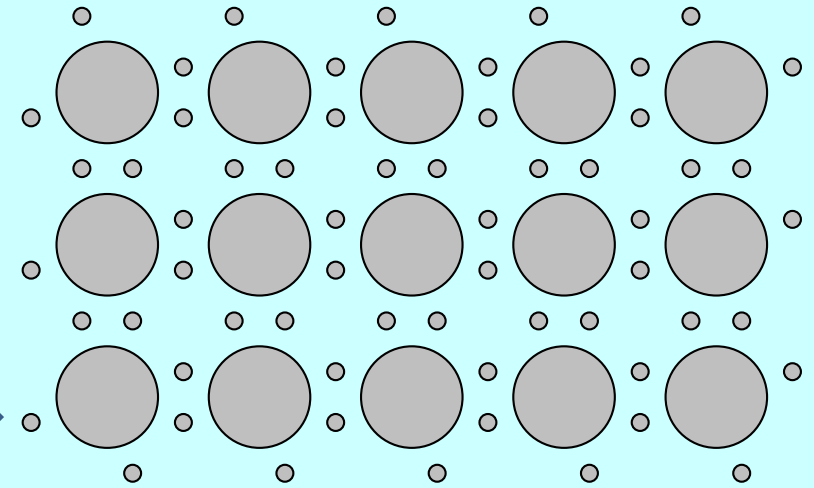


第4族原子の結晶（模式図）

〔参考〕インチキな図に注意

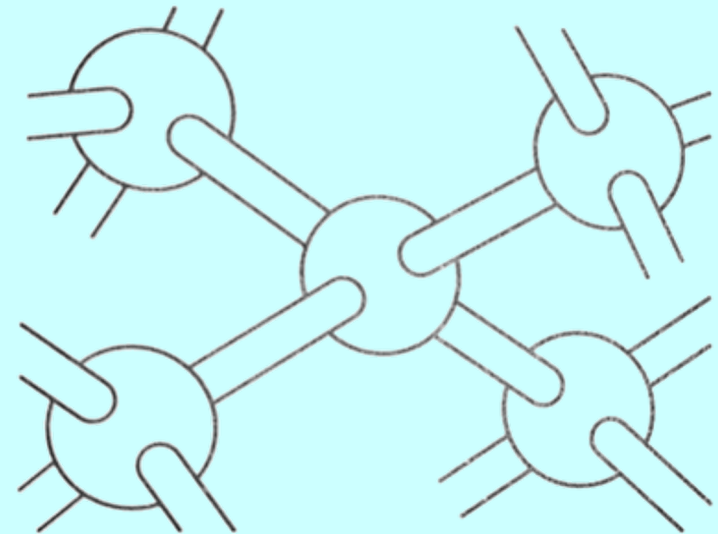
- 便宜上、右上のように原子が平面的に並んでいる図を使って説明しています

インチキな図



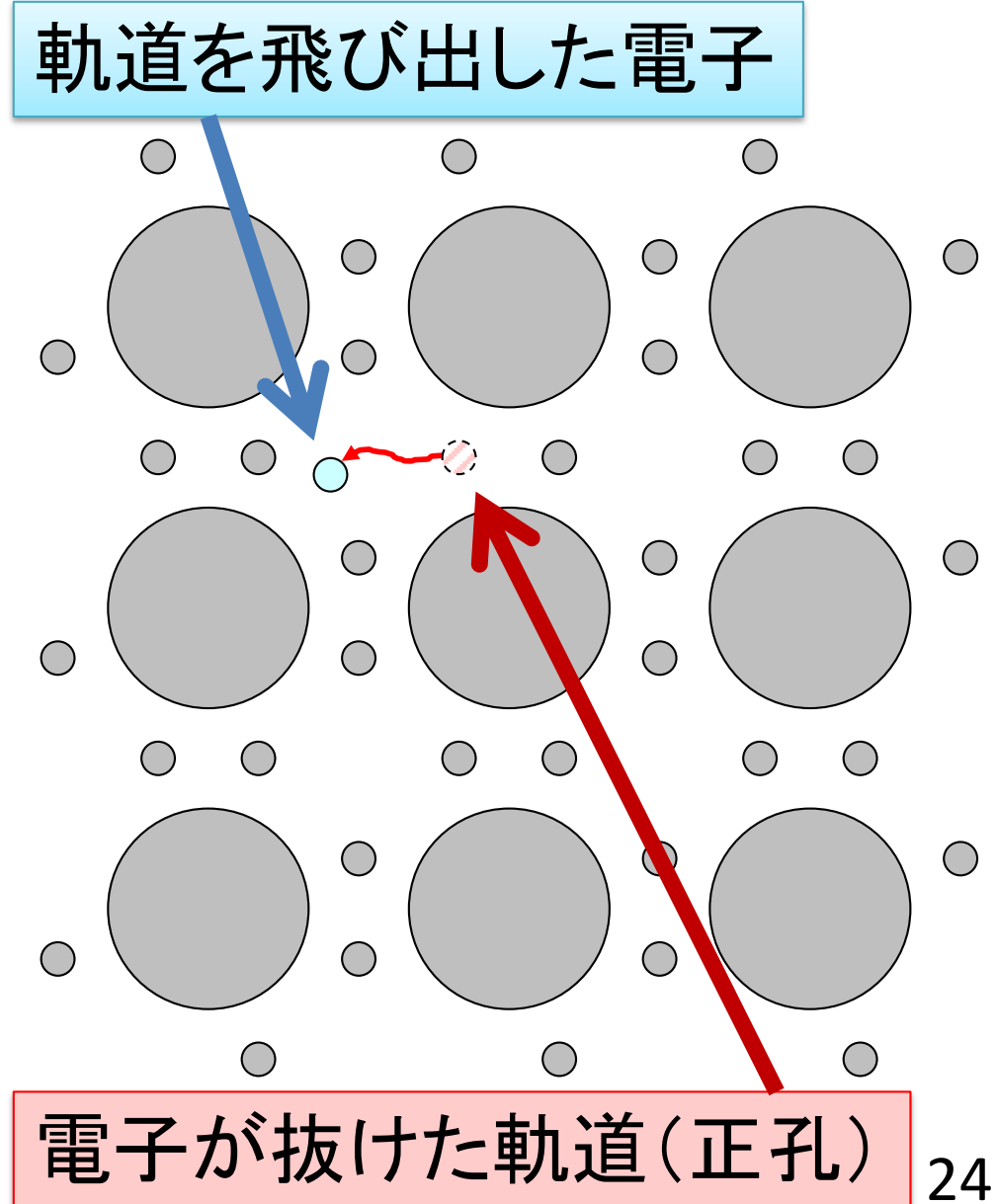
- 実際の結晶は、右下のように3次元的な立体構造をしています

実際に近い図
(教科書図4.3)



電子と正孔(1)

- 真性半導体であっても、常温では共有結合に使われている電子が単位時間あたり一定の確率で軌道から飛び出す
 - この確率は温度が高いほど大きくなる
- 電子が飛び出して空いた軌道を **正孔(ホール)** という
- 飛び出した電子は自由電子のように結晶内を動くことができる



クイズ(4)

Q1:「電子」の英語のスペルは？

- (1) erelectron
- (2) electron
- (3) erectlon
- (4) electlon

×

○ 正解

×

×

Q2:「正孔(ホール)」の英語のスペルは？

- (1) hall
- (2) haul
- (3) hole
- (4) whole

×

広間、公会堂

×

引っぱる

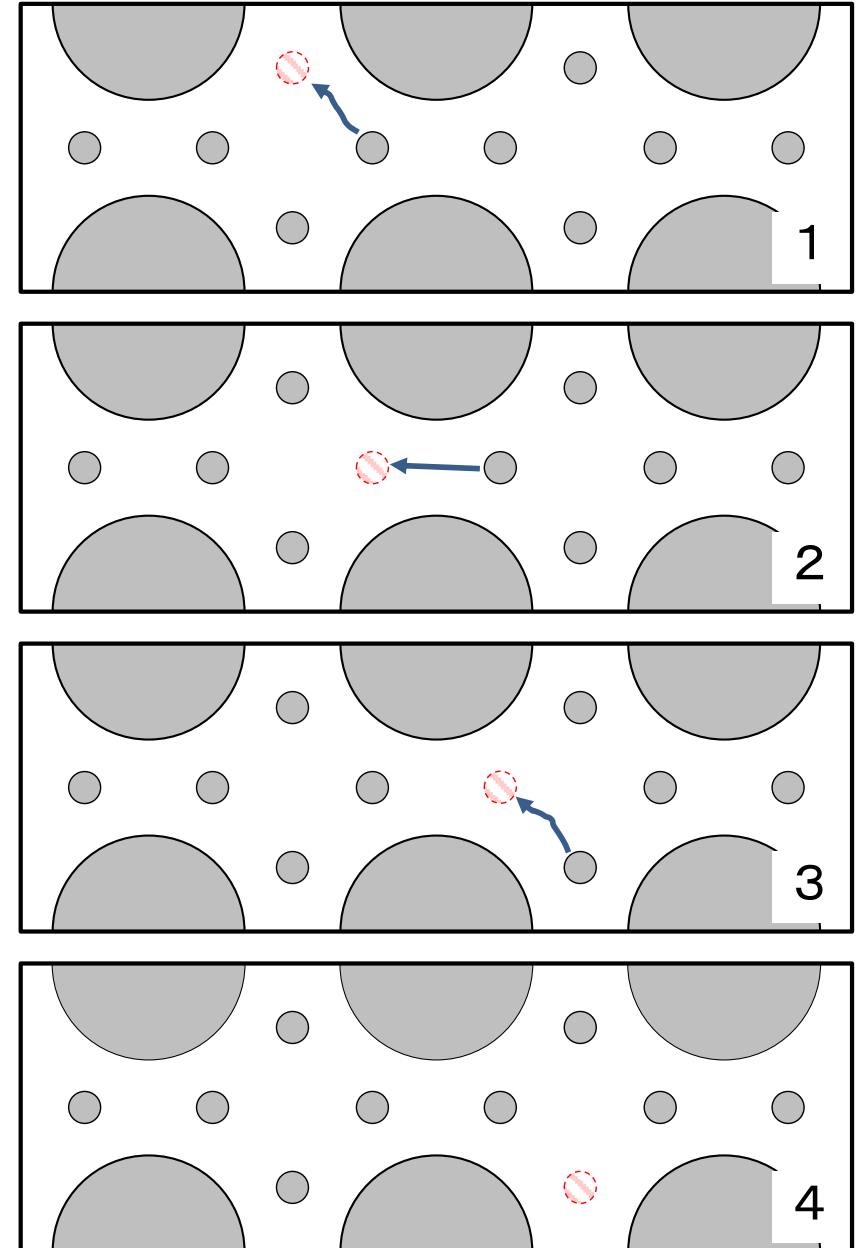
○ 穴、正孔

×

全体の

電子と正孔(ホール)(2)

- 正孔には隣から電子が移動することができる
- これが繰り返される様子は正孔が結晶内を移動しているようにも見える
- 正孔が右に移動した時、実際には負の電荷を持つ電子が左に移動しているので、あたかも正の電荷が右に移動したように見える(つまり、正孔は正の電荷を持つ粒子のように振る舞う)

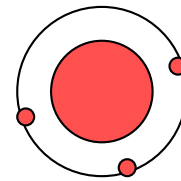


電子と正孔(ホール)(3)

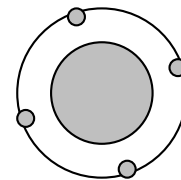
- 電子と正孔が接近すると、電子が正孔の軌道に入るので、正孔は消滅し、電子は動けなくなる
(再結合)
- 単位時間あたりに電子が軌道を飛び出す確率は温度などで決まる
- それによって生じた電子や正孔が再結合する確率は、単位体積あたりの電子の数 n_i および正孔の数 p_i に比例する
- 以上のことを定量的に表すと、教科書の式(4.5)のようになる

p型半導体とn型半導体の 不純物として使う元素

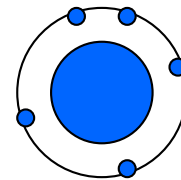
- 第3族元素 (Alなど) は、
最外殻の電子が3個しか
ありません (アクセプタ)
- 第5族元素 (Asなど) は、
最外殻の電子が5個もあ
ります (ドナー)



第3族原子
(B、Al、Gaなど)



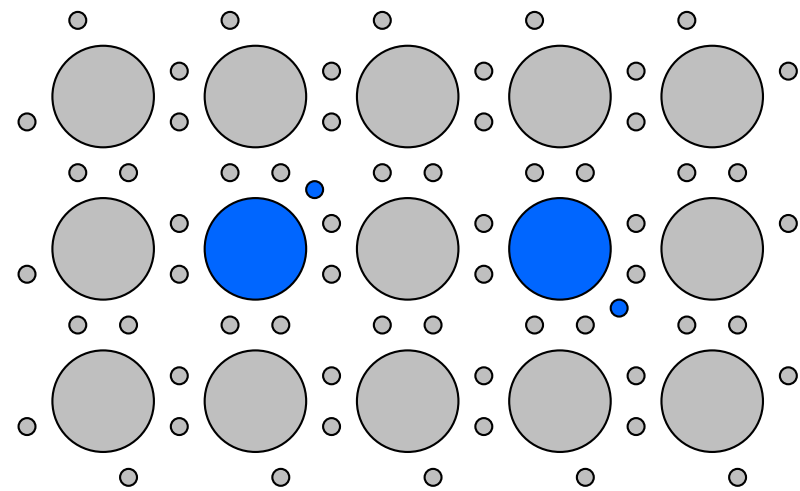
第4族原子
(Si、Geなど)



第5族原子
(P、Asなど)

n型半導体

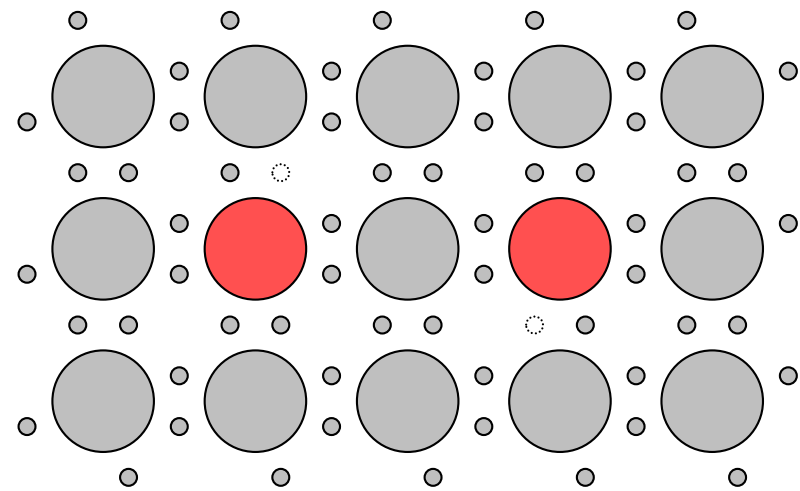
- 第4族元素の結晶中に不純物として微量の第5族元素(ドナー)が存在すると、結合に使われない最外殻**電子**が移動できるので、**導電性が生じます**



n型半導体(模式図)

p型半導体

- 第4族元素の結晶中に不純物として微量の第3族元素(アクセプタ)が存在すると、最外殻電子が足りない箇所(正孔)が生じ、ここれが移動できるので、導電性が生じます



p型半導体(模式図)

不純物濃度

- n型半導体における電子、p型半導体におけるホールを総称して **キャリア** (carrier) と呼びます
- n型半導体も、p型半導体も、不純物濃度が高いほどキャリアが多く、導電性が高くなります
- 参考
 - 不純物濃度が低濃度 (1cm^3 あたり $10^{15} \sim 10^{16}$ 程度) の領域を「n-」および「p-」と表すことがあります
 - 不純物濃度が高濃度 (1cm^3 あたり $10^{18} \sim 10^{20}$ 程度) の領域を「n+」および「p+」と表すことがあります

ダイオード(diode)の概要

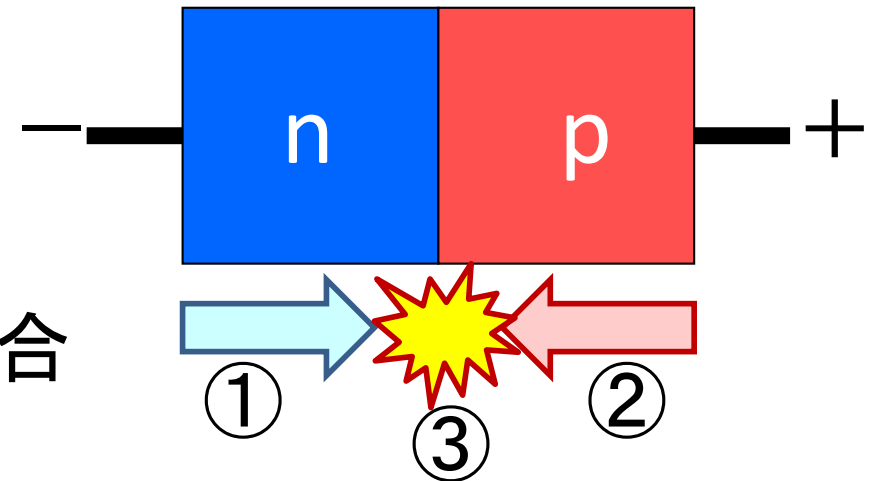
- n型領域とp型領域が隣接した半導体の結晶(ダイオード)があった場合
 - p→n方向(順方向)には電流が流れる
 - n→p方向(逆方向)には電流は流れない
 - これをダイオードの整流作用という
 - n型領域に高電圧、p型領域に低電圧をかけると、n型領域の電子(電荷はマイナス)は高電圧に、p型領域のホール(電荷はプラス)は低電圧に引き寄せられるので、領域の境界付近にキャリアが存在しなくなるためです

ダイオードの模式図

p型に+、n型に-の電圧をかけた時(順方向バイアス)

⇒ 電流が流れる

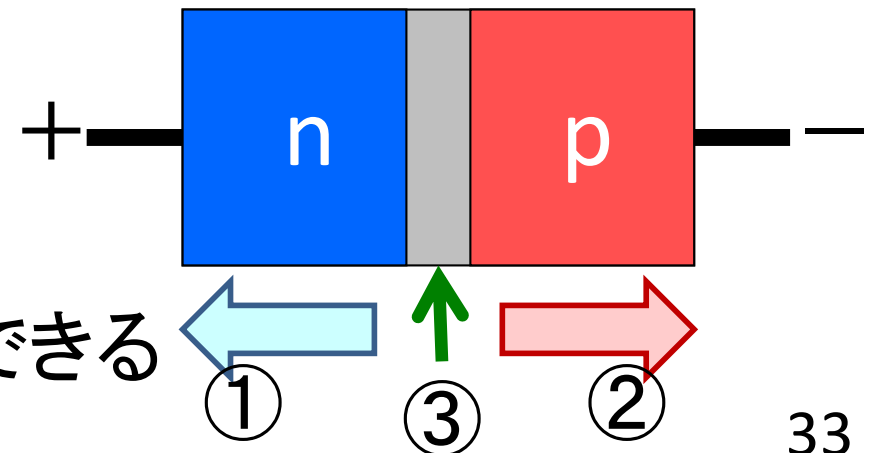
- ①電子が+へ移動(ドリフト電流)
- ②正孔が-へ移動(ドリフト電流)
- ③電子と正孔が拡散しながら再結合



n型に+、p型に-の電圧をかけた時(逆方向バイアス)

⇒ 電流が流れない

- ①電子は+に引き寄せられる
- ②正孔は-に引き寄せされる
- ③電子も正孔もない **空乏層** ができる



来週の予定

- ダイオードの電圧-電流特性 $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ を理解します(教科書の式(5.25))
- ダイオードの応用回路を学びます

解答例

図のように R_1 と R_2 に流れる電流を下向きにそれぞれ I_1 、 I_2 とおくと、KCL より

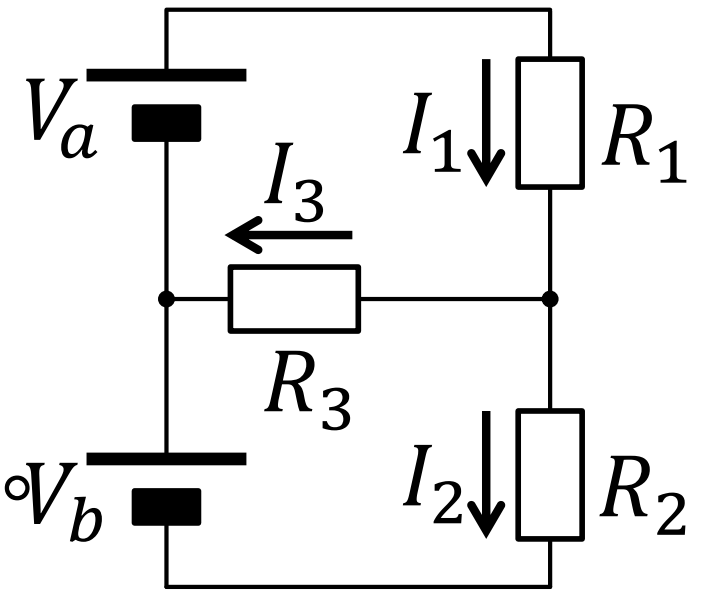
$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \quad (\text{ア})$$

KVLとオームの法則より

$$V_a - I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0 \quad (\text{イ})$$

$$V_b + I_3 R_3 - I_2 R_2 = 0 \quad (\text{ウ})$$

上の3式を I_3 について解けばよい。



答: (1) $I_3 = 2[\text{A}]$ (左向きに2[A])

(2) $I_3 = -1[\text{A}]$ (右向きに1[A])

電気電子回路(第3回)講義は これで終わりです

質問: support_eecra@sl.is.ritsumei.ac.jp

直接返信する場合と、まとめてmanaba+に掲示する場合があります。ご了承ください。