

アナログ電子回路

授業開始までしばらくお待ちください。

- 講義資料（スライド等）は Google drive に置く。授業前には虫喰い状態のスライドのみを提供するが、授業後に穴埋め版を uncovered フォルダに置くので復習に活用されたい。

<https://drive.google.com/drive/folders/1yzIsRZsVGFErhnfzn8Hycsn6nRPNCczn>



- 授業の録画も同じところに置く。
- ミニレポートは **Google Forms** (<https://forms.gle/MpUmErDi6qk8GSUC6>) に提出。

- 出席は UNIPA で取るが、出席そのものは評価せず。極論するとテストのみ出席で他は全欠席でも A 評価はあり得る。なお、**不正出席をした場合は 21 点の減点**とする。
- 基本的には**中間演習**と**期末試験**で評価。
- 毎回ミニレポートを課す。出す者は提出期間を厳守すること。
- 試験の不合格者は**毎回のミニレポート**と**出席**で少し救済する。
(しっかりした内容のミニレポートを概ね 9 割以上提出し、かつ UNIPA で 8 割以上遅刻せず出席していた場合最大 10 点程度の救済。提出数や出席数が少ない場合は救済幅が縮小する。いずれかが 7 割を下回ったら一切救済しない。締め切り後の提出は認めない。)
- スライド穴埋め版はその回の授業終了後に公開。
- **授業中に**スライドの誤りを見つけて指摘してくれた者には、誤り一箇所につき先着一名様限り 100 点満点 1 点相当の加点を行う。(ただしごく軽微なものなど、内容によっては加点しない場合もあり。)

2025

S 科アナログ電子回路

Analog Electronics

『はじめの半導体 — ダイオード』

小林裕之

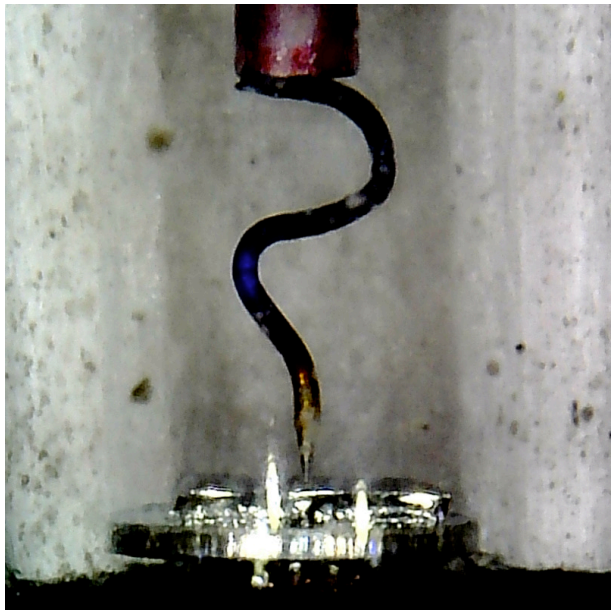
大阪工業大学 RD 学部システムデザイン工学科



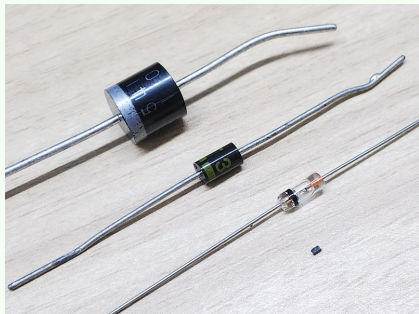
OSAKA INSTITUTE OF TECHNOLOGY

3 of 14

a L^AT_EX + Beamer slideshow

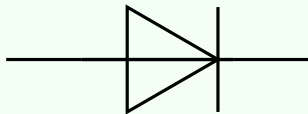
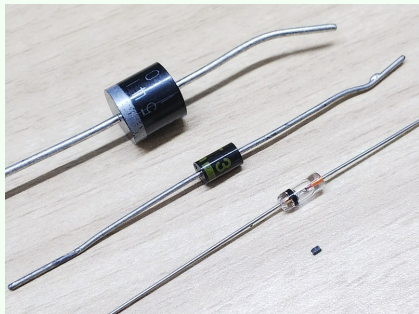


diode



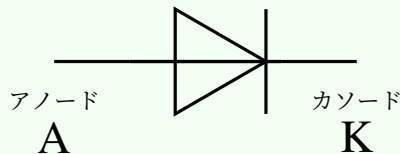
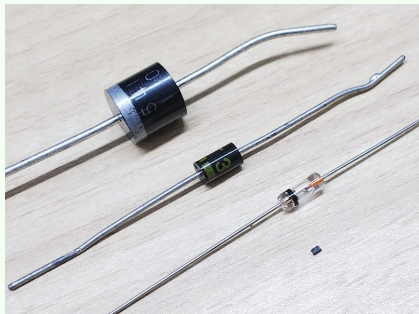
- アノード (A; anode) とカソード (K; cathode) の 2 端子を持つ素子。
- 電流は $A \rightarrow K$ 向きによく流れ、逆向きにはほとんど流れない。
(作用)

diode



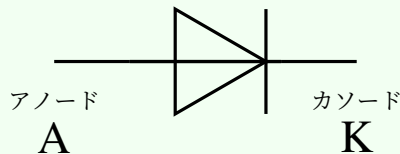
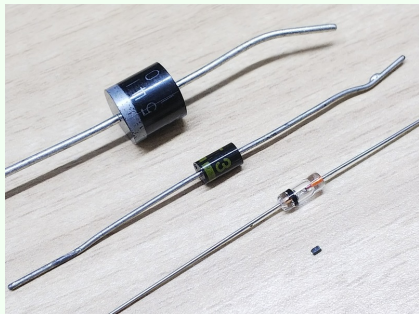
- アノード (A; anode) とカソード (K; cathode) の 2 端子を持つ素子。
- 電流は A→K 向きによく流れ、逆向きにはほとんど流れない。
(整流 作用)

diode



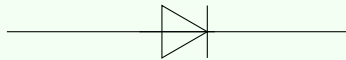
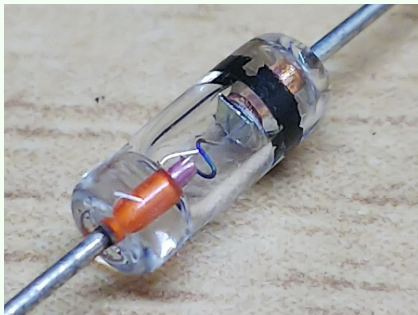
- アノード (A; anode) とカソード (K; cathode) の 2 端子を持つ素子。
- 電流は A→K 向きによく流れ、逆向きにはほとんど流れない。
(整流 作用)

diode



- アノード (A; anode) とカソード (K; cathode) の 2 端子を持つ素子。
- 電流は $A \rightarrow K$ 向きによく流れ、逆向きにはほとんど流れない。
(**整流 作用**)

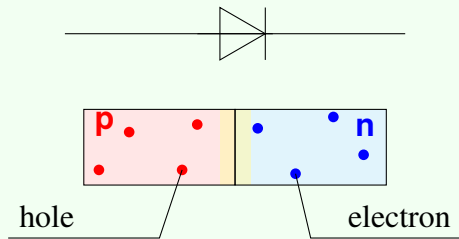
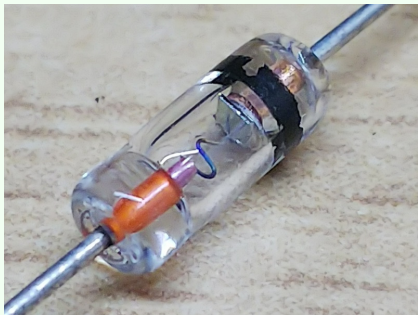
structure of diode



と が接合している。(写真は点接触ダイオードといい、金属針の先端部分が pn 接合になっている。)

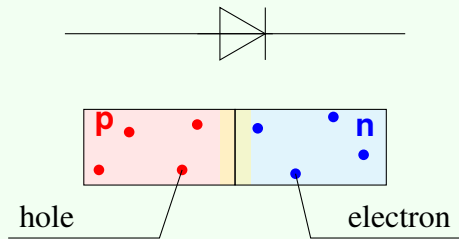
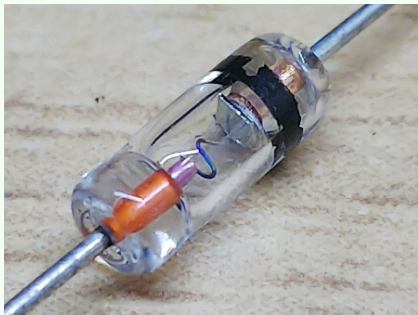
ダイオードの構造

structure of diode



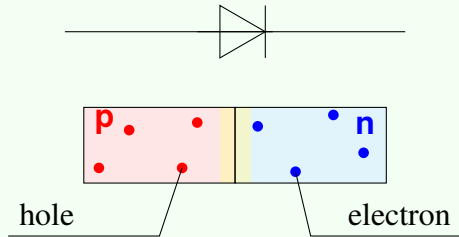
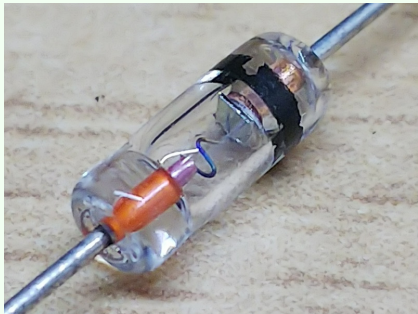
と が接合している。(写真は点接触ダイオードといい、金属針の先端部分が pn 接合になっている。)

structure of diode



- **p 型半導体**と **n 型半導体** が接合している。(写真は点接触ダイオードといい、金属針の先端部分が pn 接合になっている。)

structure of diode



- **p 型半導体**と**n 型半導体**が接合している。(写真は点接触ダイオードといい、金属針の先端部分がpn接合になっている。)

真性半導体

- Si や Ge そのもの。
- 電子 (electron) と正孔 (hole) が同数。

p 型半導体

- Si や Ge に添加物 (B や In や Ga など) をドーピングしたもの。

が多数キャリア。

n 型半導体

- Si や Ge に添加物 (P や Sb など) をドーピングしたもの。

が多数キャリア。

絶縁体よりは電流が流れやすいが、導体よりは流れにくい（ので**半**導体）。真性半導体は p 型, n 型よりも電流を流しにくい。

(cf. <https://ja.wikipedia.org/wiki/電気抵抗率の比較>)

真性半導体

- Si や Ge そのもの。
- 電子 (electron) と正孔 (hole) が同数。

p 型半導体

- Si や Ge に添加物 (B や In や Ga など) をドーピングしたもの。
- **正孔**が多数キャリア。

n 型半導体

- Si や Ge に添加物 (P や Sb など) をドーピングしたもの。
- 電子が多数キャリア。

絶縁体よりは電流が流れやすいが、導体よりは流れにくい（ので**半**導体）。真性半導体は p 型, n 型よりも電流を流しにくい。

(cf. <https://ja.wikipedia.org/wiki/電気抵抗率の比較>)

真性半導体

- Si や Ge そのもの。
- 電子 (electron) と正孔 (hole) が同数。

p 型半導体

- Si や Ge に添加物 (B や In や Ga など) をドーピングしたもの。
- **正孔**が多数キャリア。

n 型半導体

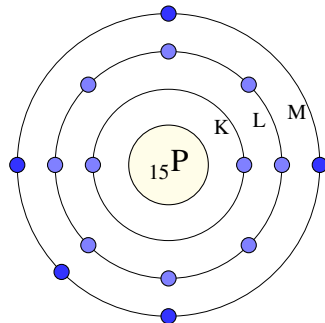
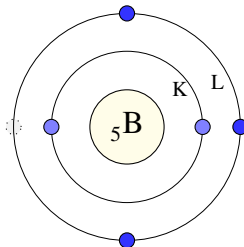
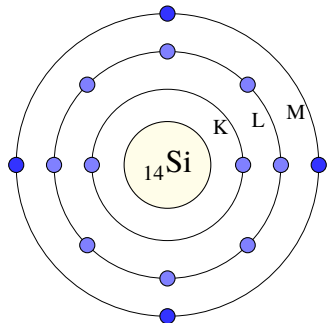
- Si や Ge に添加物 (P や Sb など) をドーピングしたもの。
- **電子**が多数キャリア。

絶縁体よりは電流が流れやすいが、導体よりは流れにくい（ので**半**導体）。真性半導体は p 型, n 型よりも電流を流しにくい。

(cf. <https://ja.wikipedia.org/wiki/電気抵抗率の比較>)

固体物理学超入門

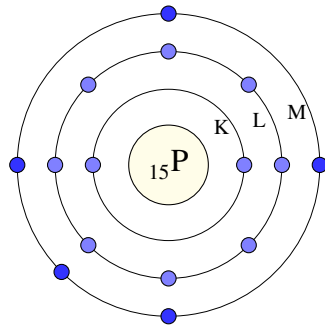
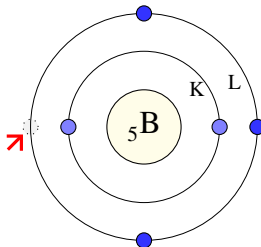
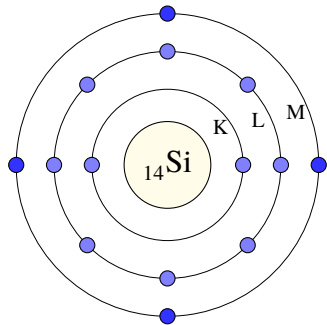
専門の先生に見せたら叱られそうなくらいいい加減ですみません…。



- Si だけで共有結合すると M 殻に 8 個電子が入りとても安定。(真性半導体)
- B を添加すると正孔ができるので電流が流れやすくなる。(p 型半導体)
- P を添加すると自由電子ができるので電流が流れやすくなる。(n 型半導体)

固体物理学超入門

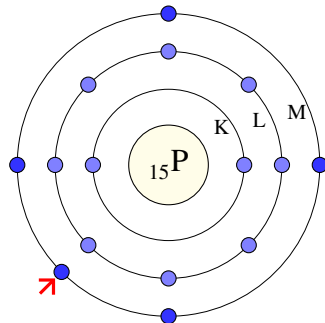
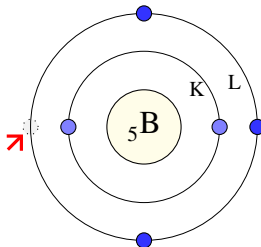
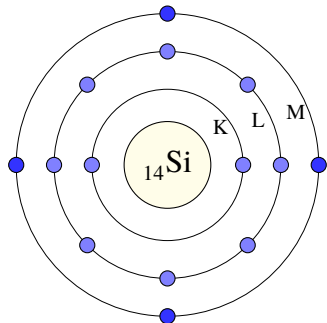
専門の先生に見せたら叱られそうなくらいいい加減ですみません…。



- Si だけで共有結合すると M 殻に 8 個電子が入りとても安定。(真性半導体)
- B を添加すると正孔ができるので電流が流れやすくなる。(p 型半導体)
- P を添加すると自由電子ができるので電流が流れやすくなる。(n 型半導体)

固体物理学超入門

専門の先生に見せたら叱られそうなくらいいい加減ですみません…。

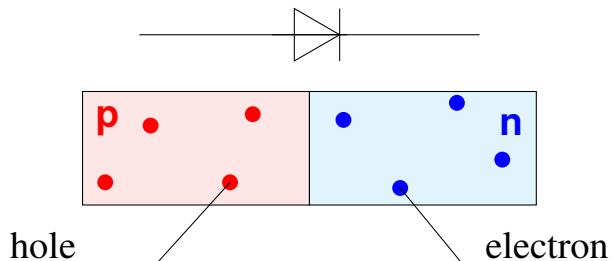


- Si だけで共有結合すると M 殻に 8 個電子が入りとても安定。(真性半導体)
- B を添加すると正孔ができるので電流が流れやすくなる。(p 型半導体)
- P を添加すると自由電子ができるので電流が流れやすくなる。(n 型半導体)

p 型 ・ n 型半導体のイメージ

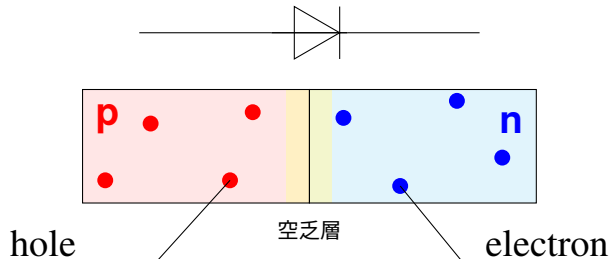
◦ Si や Ge
● 添加物

ダイオードの原理 1: 何もしないとき



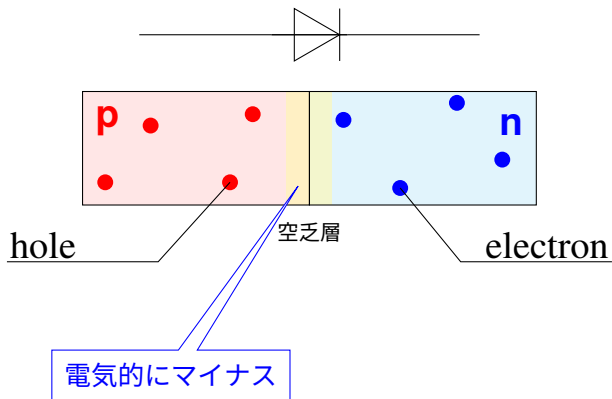
- pn 境界近くの正孔と電子は (近いので) 結合してなくなってしまふ。こうして
ができる。
- p 型部分の空乏層は (n 型から電子が入ってきた結果できるので)、電気的には 。
- n 型部分の空乏層は (p 型に電子が出ていった結果できるので)、電気的には 。

ダイオードの原理 1: 何もしないとき



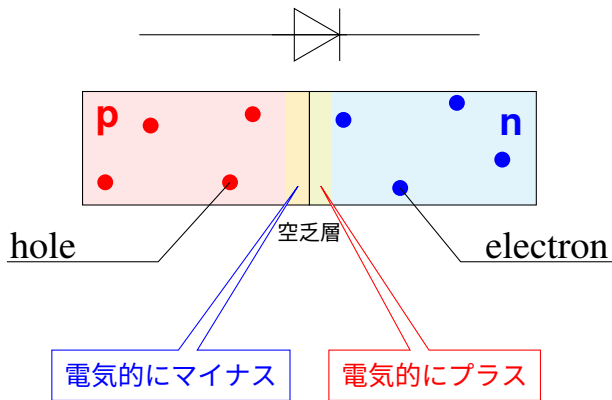
- pn 境界近くの正孔と電子は (近いので) 結合してなくなってしまいます。こうして **空乏層 (depletion layer)** ができる。
- p 型部分の空乏層は (n 型から電子が入ってきた結果できるので)、電気的には \ominus 。
- n 型部分の空乏層は (p 型に電子が出ていった結果できるので)、電気的には \oplus 。

ダイオードの原理 1: 何もしないとき



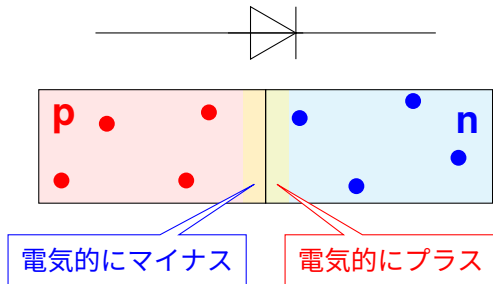
- pn 境界近くの正孔と電子は (近いので) 結合してなくなってしまふ。こうして **空乏層 (depletion layer)** ができる。
- p 型部分の空乏層は (n 型から電子が入ってきた結果できるので)、電氣的には **マイナス**。
- n 型部分の空乏層は (p 型に電子が出ていった結果できるので)、電氣的には 。

ダイオードの原理 1: 何もしないとき



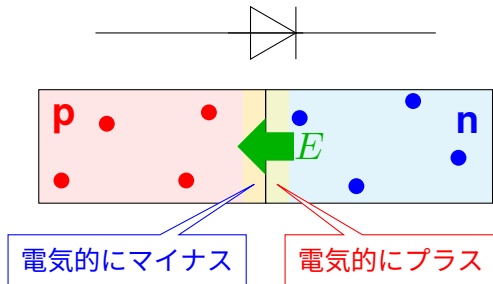
- pn 境界近くの正孔と電子は (近いので) 結合してなくなってしまふ。こうして **空乏層 (depletion layer)** ができる。
- p 型部分の空乏層は (n 型から電子が入ってきた結果できるので)、電気的には **マイナス**。
- n 型部分の空乏層は (p 型に電子が出ていった結果できるので)、電気的には **プラス**。

ダイオードの原理 1: 何もしないとき (続き)



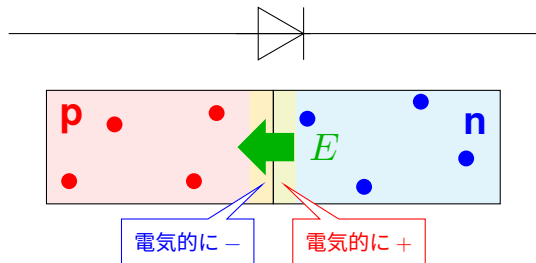
- これにより、 \quad の向きの電界が発生する。この電界を作り出す電圧を **拡散電位** という。
- 拡散電位は Si のダイオードでだいたい **0.6~0.7 V** くらい。
- この電界により、正孔も電子も相手側領域への移動を阻まれる。(わかる?)
- だから電流は流れない。

ダイオードの原理 1: 何もしないとき (続き)



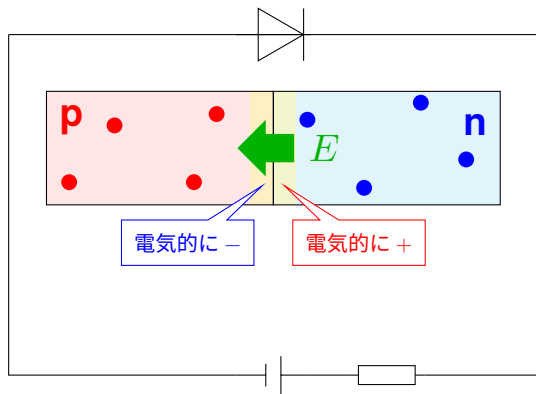
- これにより、 $p \leftarrow n$ の向きの電界が発生する。この電界を作り出す電圧を **拡散電位** という。
- 拡散電位は Si のダイオードでだいたい **0.6~0.7 V** くらい。
- この電界により、正孔も電子も相手側領域への移動を阻まれる。(わかる?)
- だから電流は流れない。

ダイオードの原理 2: 逆電圧をかけたとき



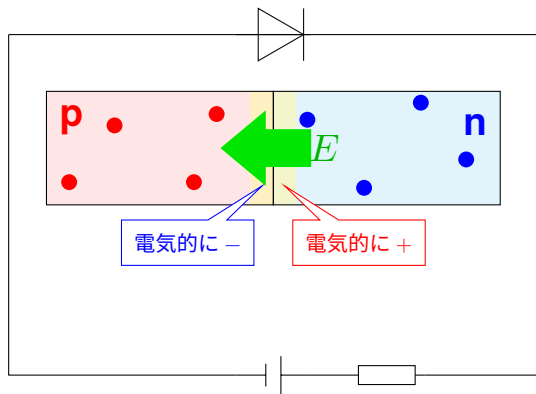
- 外部からの電圧がキャリア移動を妨げる電界をさらに強める。
- だから電流は流れない。

ダイオードの原理 2: 逆電圧をかけたとき



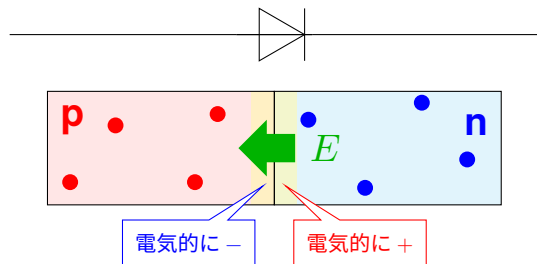
- 外部からの電圧がキャリア移動を妨げる電界をさらに強める。
- だから電流は流れない。

ダイオードの原理 2: 逆電圧をかけたとき



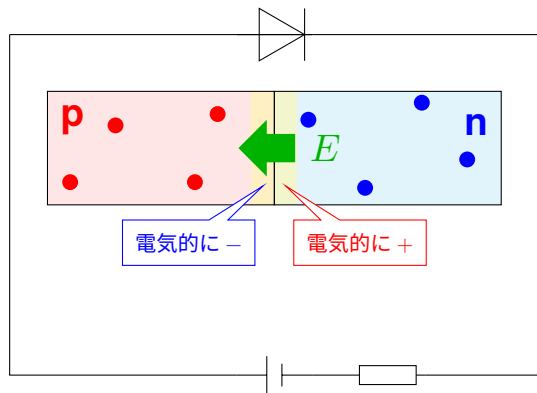
- 外部からの電圧がキャリア移動を妨げる電界をさらに強める。
- だから電流は流れない。

ダイオードの原理 3: 順電圧をかけたとき



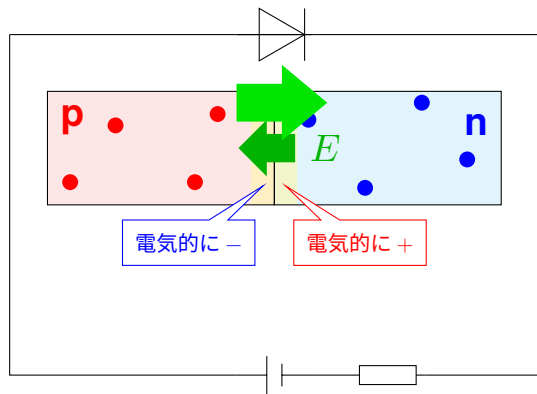
- 拡散電位より大きな順方向電圧を印加すると、移動を妨げる電界が打ち消される。
- これによって、キャリア（正孔と電子）が移動できるようになり電流が流れる。

ダイオードの原理 3: 順電圧をかけたとき



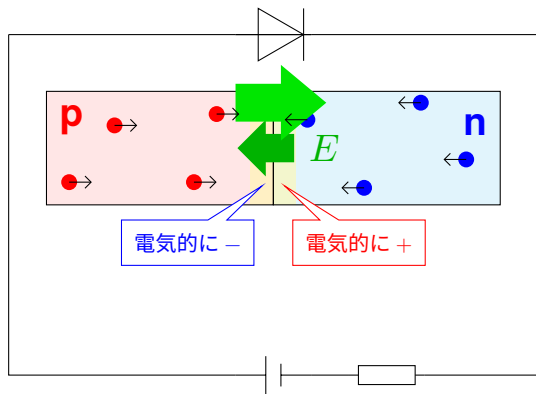
- 拡散電位より大きな順方向電圧を印加すると、移動を妨げる電界が打ち消される。
- これによって、キャリア（正孔と電子）が移動できるようになり電流が流れる。

ダイオードの原理 3: 順電圧をかけたとき



- 拡散電位より大きな順方向電圧を印加すると、移動を妨げる電界が打ち消される。
- これによって、キャリア（正孔と電子）が移動できるようになり電流が流れる。

ダイオードの原理 3: 順電圧をかけたとき



- 拡散電位より大きな順方向電圧を印加すると、移動を妨げる電界が打ち消される。
- これによって、キャリア（正孔と電子）が移動できるようになり電流が流れる。

あなたの知らなかったダイオードの世界 (現実に近いもの)

$$I_d =$$

I_s 飽和電流 数 nA 程度

q 電気素量 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$

V_d ダイオード電圧 (順方向)

k ボルツマン定数
 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

T 絶対温度

あなたの知らなかったダイオードの世界 (現実に近いもの)

$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$

I_s 飽和電流 数 nA 程度

q 電気素量 $1.60 \times 10^{-19} \text{C}$

V_d ダイオード電圧 (順方向)

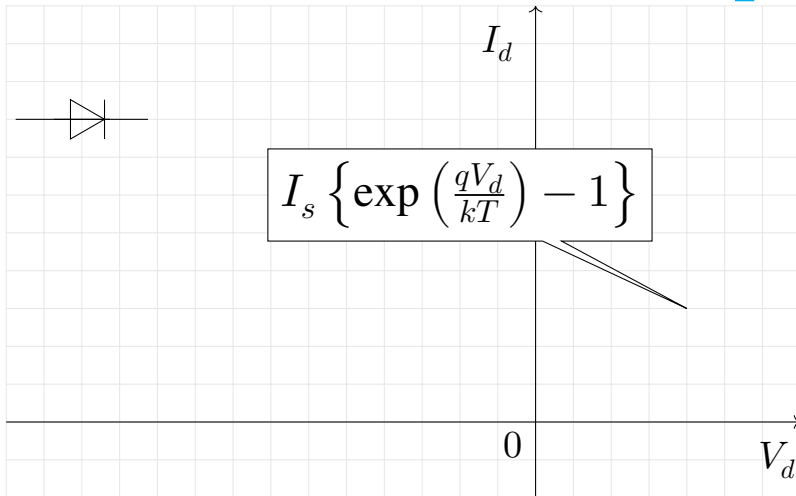
k ボルツマン定数

$1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$

T 絶対温度

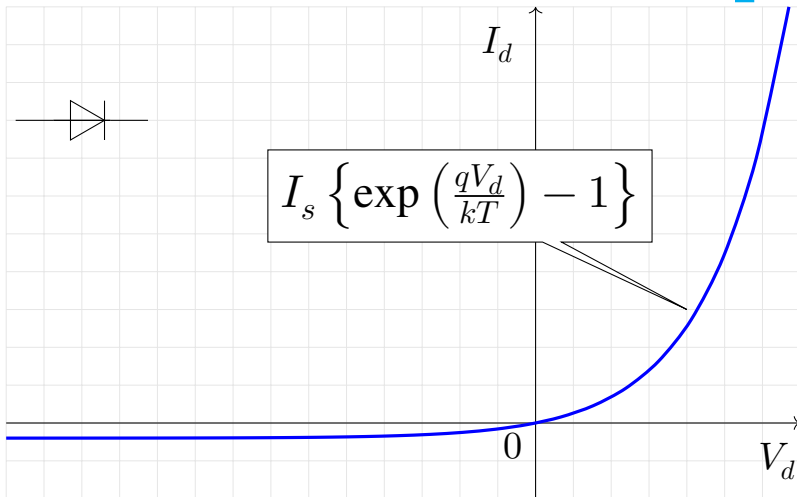
ダイオードの特性

前のページの式をプロットするとこんな感じ



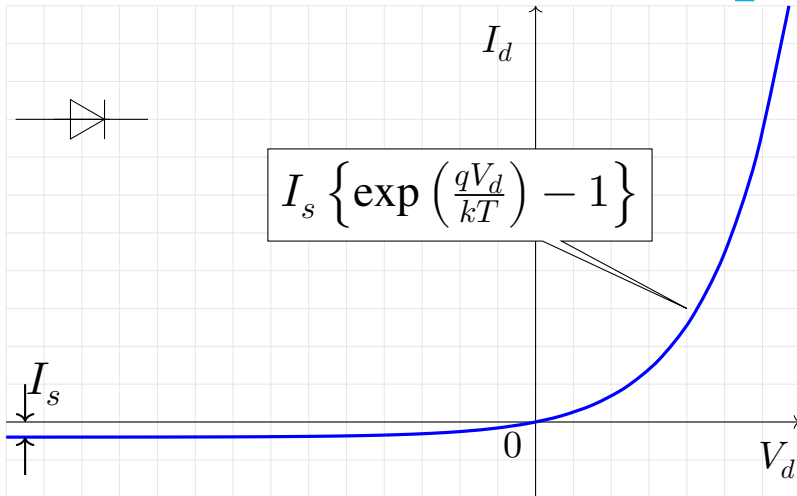
ダイオードの特性

前のページの式をプロットするとこんな感じ



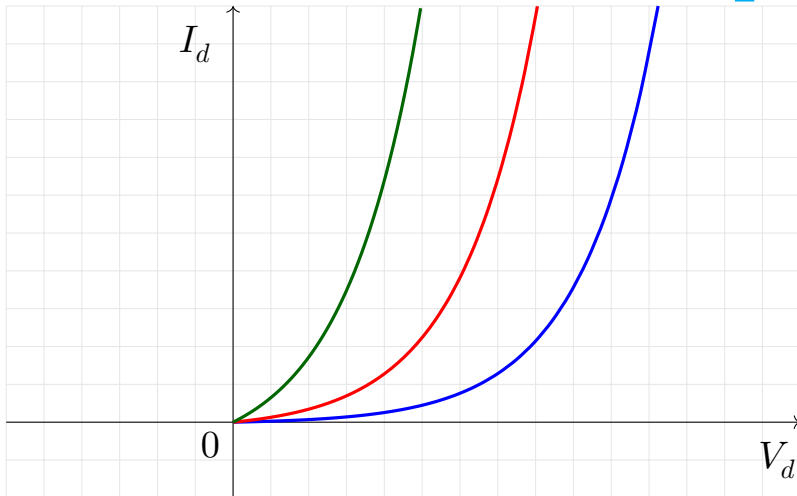
ダイオードの特性

前のページの式をプロットするとこんな感じ



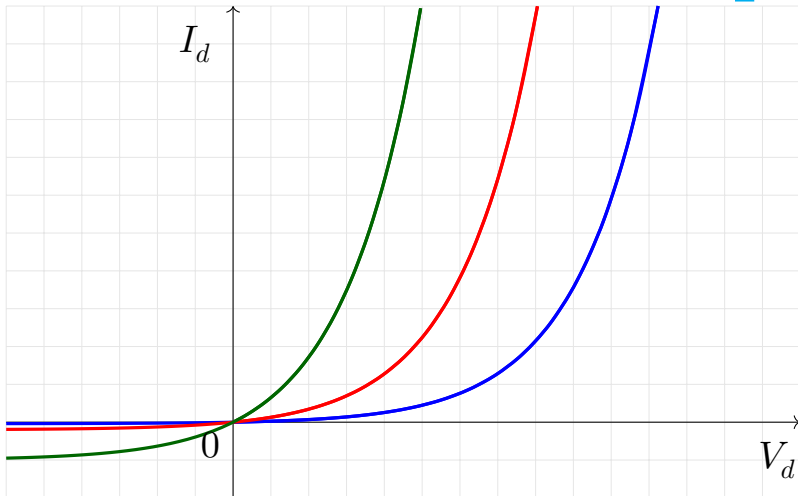
飽和電流と特性の関係

“良い” ダイオードとは何か？



飽和電流と特性の関係

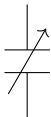
“良い” ダイオードとは何か？



横道: ダイオードでつくる AM ラジオ

材料これだけ!

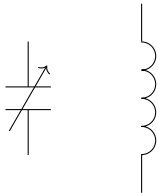
横道: ダイオードでつくる AM ラジオ



材料これだけ!

- キャパシタ

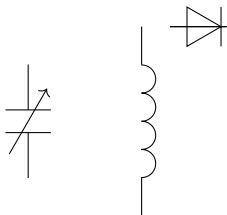
横道: ダイオードでつくる AM ラジオ



材料これだけ!

- キャパシタ
- インダクタ

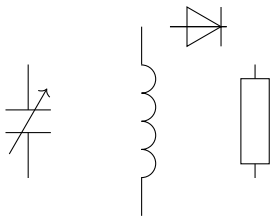
横道: ダイオードでつくる AM ラジオ



材料これだけ!

- キャパシタ
- インダクタ
- ダイオード

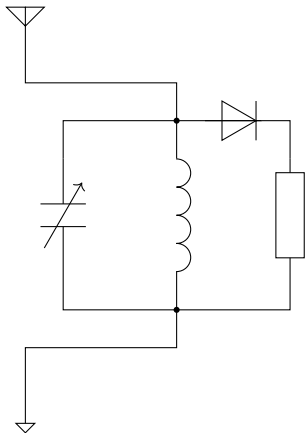
横道: ダイオードでつくる AM ラジオ



材料これだけ!

- キャパシタ
- インダクタ
- ダイオード
- 圧電スピーカ

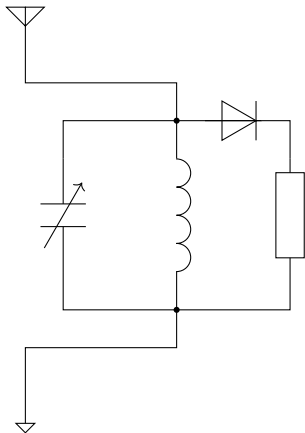
横道: ダイオードでつくる AM ラジオ



材料これだけ!

- キャパシタ
- インダクタ
- ダイオード
- 圧電スピーカ
- その他配線材

横道: ダイオードでつくる AM ラジオ

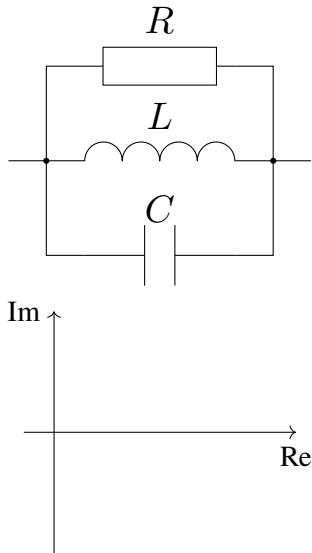


材料これだけ!

- キャパシタ
- インダクタ
- ダイオード
- 圧電スピーカ
- その他配線材

こんなときは I_S 大きめのダイオードが良い!

さらに逸脱【電気回路】復習



$$\dot{Y}_R = 1/R$$

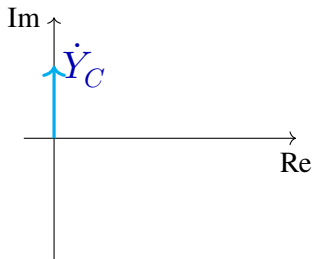
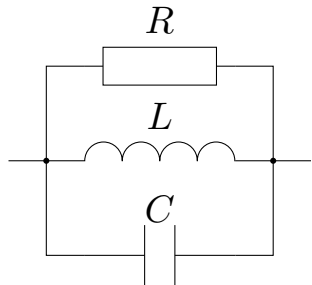
$$\dot{Y}_L = \frac{1}{i\omega L}$$

$$\dot{Y}_C = i\omega C$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}_R + \dot{Y}_L + \dot{Y}_C = \frac{1}{R} + i \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

これがチューニングの原理

さらに逸脱【電気回路】復習



$$\dot{Y}_R = 1/R$$

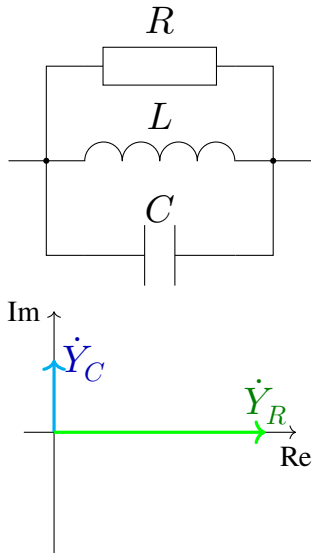
$$\dot{Y}_L = \frac{1}{i\omega L}$$

$$\dot{Y}_C = i\omega C$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}_R + \dot{Y}_L + \dot{Y}_C = \frac{1}{R} + i \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

これがチューニングの原理

さらに逸脱【電気回路】復習



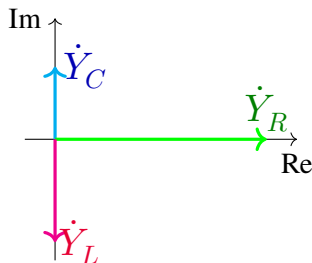
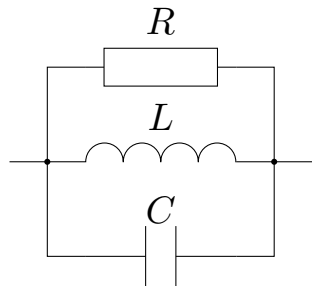
$$\dot{Y}_R = 1/R$$

$$\dot{Y}_L = \frac{1}{i\omega L}$$

$$\dot{Y}_C = i\omega C$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}_R + \dot{Y}_L + \dot{Y}_C = \frac{1}{R} + i \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

これがチューニングの原理



$$\dot{Y}_R = 1/R$$

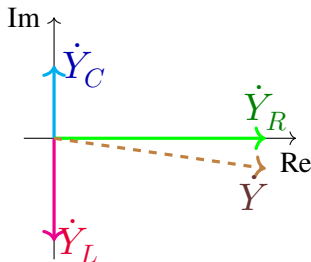
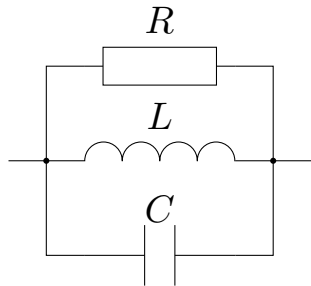
$$\dot{Y}_L = \frac{1}{i\omega L}$$

$$\dot{Y}_C = i\omega C$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}_R + \dot{Y}_L + \dot{Y}_C = \frac{1}{R} + i \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

これがチューニングの原理

さらに逸脱【電気回路】復習



$$\dot{Y}_R = 1/R$$

$$\dot{Y}_L = \frac{1}{i\omega L}$$

$$\dot{Y}_C = i\omega C$$

$$\dot{Y} = \dot{Y}_R + \dot{Y}_L + \dot{Y}_C = \frac{1}{R} + i \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

これがチューニングの原理

ダイオードの順方向電流を I_d 、順方向電圧を V_d とする。 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ (C), $k = 1.4 \times 10^{-23}$ (J/K) とする。このダイオードは $I_s = 1$ (pA) であるとし、 $T = 250 \times 8/7 \simeq 285.7$ (K) とする。

- $I_d = 1$ (mA) となる V_d を求めよ。
- $I_d = 1$ (A) となる V_d を求めよ。

ダイオードの順方向電流を I_d 、順方向電圧を V_d とする。 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ (C), $k = 1.4 \times 10^{-23}$ (J/K) とする。このダイオードは $I_s = 1$ (pA) であるとし、 $T = 250 \times 8/7 \simeq 285.7$ (K) とする。

- $I_d = 1$ (mA) となる V_d を求めよ。
- $I_d = 1$ (A) となる V_d を求めよ。

約 0.5V

ダイオードの順方向電流を I_d 、順方向電圧を V_d とする。 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ (C), $k = 1.4 \times 10^{-23}$ (J/K) とする。このダイオードは $I_s = 1$ (pA) であるとし、 $T = 250 \times 8/7 \simeq 285.7$ (K) とする。

- $I_d = 1$ (mA) となる V_d を求めよ。
- $I_d = 1$ (A) となる V_d を求めよ。

約 0.5V , 約 0.7V

練習問題 2 (電卓不要)

この計算とは後日ふたたび遭遇することになります。

ダイオードの電流 I_d と順方向電圧 V_d の関係を

$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$

とする。 V_d を微小変化させたときの I_d の変化を求めよ。ついでに $\exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) \gg 1$ を使って少しシンプルにせよ。

練習問題 2 (電卓不要)

この計算とは後日ふたたび遭遇することになります。

ダイオードの電流 I_d と順方向電圧 V_d の関係を

$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$

とする。 V_d を微小変化させたときの I_d の変化を求めよ。ついでに $\exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) \gg 1$ を使って少しシンプルにせよ。

V_d の微小変化分を dV_d とすると $I_s \frac{q}{kT} \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) \times dV_d$

練習問題 2 (電卓不要)

この計算とは後日ふたたび遭遇することになります。

ダイオードの電流 I_d と順方向電圧 V_d の関係を

$$I_d = I_s \left\{ \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) - 1 \right\}$$

とする。 V_d を微小変化させたときの I_d の変化を求めよ。ついでに $\exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) \gg 1$ を使って少しシンプルにせよ。

$$V_d \text{ の微小変化分を } dV_d \text{ とすると } I_s \frac{q}{kT} \exp \left(\frac{qV_d}{kT} \right) \times dV_d \\ \frac{q}{kT} I_d \times dV_d$$

練習問題 3 (電卓使用)

ダイオードには (この授業ではここ以外ではやらないが) 実はもう一つ n というパラメタもあって、より正確なモデルは $I_d = I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right\}$ である。某ダイオードデータシートの V_d — I_d グラフを読み取ったところ、摂氏 25 度において以下のとおりであった。 I_s と n を関数電卓を使って求めよ。

- $V_d = 0.52$ (V) のとき $I_d = 0.1$ (mA)
- $V_d = 0.6$ (V) のとき $I_d = 1$ (mA)
- $V_d = 0.72$ (V) のとき $I_d = 12$ (mA)



練習問題 3 (電卓使用)

ダイオードには (この授業ではここ以外ではやらないが) 実はもう一つ n というパラメタもあって、より正確なモデルは $I_d = I_s \left\{ \exp\left(\frac{qV_d}{nkT}\right) - 1 \right\}$ である。某ダイオードデータシートの V_d — I_d グラフを読み取ったところ、摂氏 25 度において以下のとおりであった。 **I_s と n を関数電卓を使って求めよ。**

- $V_d = 0.52$ (V) のとき $I_d = 0.1$ (mA)
- $V_d = 0.6$ (V) のとき $I_d = 1$ (mA)
- $V_d = 0.72$ (V) のとき $I_d = 12$ (mA)



$$I_s \simeq 5.2 \times 10^{-10}, \quad n \simeq 1.6$$

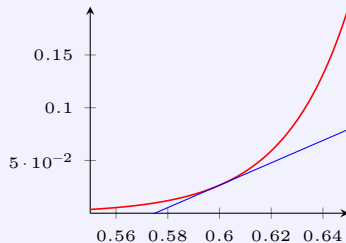
ミニレポート課題 (受付期間: 授業当日～次回授業の前日)

受付期間外には提出しないこと。(自動処理しています。)

練習問題 1 のダイオードについて

- ① V_d と I_d の関係を $0.55 \leq V_d \leq 0.65$ の範囲でグラフで示せ。(答 → 右図赤)
- ② $V_d = 0.6$ まわりで一次近似した場合を同じグラフに重ねて示せ。(答 → 右図青)

グラフは PC 等で電子的に作成すること。



提出は下記 URL の Google Forms。歪んでいない、開いた時に横倒しになっていない、コントラストが読むに耐えうる **PDF で提出** すること。**手書きを写真撮影する場合はスキャナもしくはスキャナアプリの使用を必須とする。**

<https://forms.gle/MpUmErDi6qk8GSUC6>

