

電子回路基礎

アナログ電子回路・デジタル電子回路の基礎と応用

月曜2時限目 教室:D205

天野英晴

hunga@am.ics.keio.ac.jp

講義の構成

第1部 アナログ電子回路

(4/7, 4/14, 4/21, 5/12, 5/19)

- 1 ダイオードの動作と回路
- 2 トランジスタの動作と増幅回路
- 3 トランジスタ増幅回路の小信号等価回路
- 4 演算増幅器の動作
- 5 演算増幅器を使った各種回路の解析

講義の構成

第2部 デジタル電子回路

(5/26, 6/2, 6/9:まっちゃん, 6/16, 6/23:まっちゃん, 6/30, 6/30, 7/7, 7/14)

6 デジタル回路とは？ CMOSの基本回路

7 CMOSの動作原理とレイアウト

8 CMOSの静特性と動特性

9 BJTを使ったデジタル回路

10 特殊な入出力

11 フリップフロップの動作原理、基本回路

12 フリップフロップの動特性とStatic Timing Analysis

13 メモリ回路

14 FPGA設計

15 ASIC設計

講義資料

- 参考書

高橋進一，岡田英史共著，培風館，「電子回路」

天野英晴、コロナ社「デジタル設計者のための電子回路」

- 講義で使う電子資料：

<http://www.am.ics.keio.ac.jp>で配布

- 演習の結果はkeio.jpで公開

コンピュータ実習（重野先生） からの伝言

- コンピュータ実習では，第一回からMS-Windows等で実習を行います．
- アカウントやパスワードの確認し，ログインできるように準備しておいてください．
- パスワードが分からない場合は，ITCの窓口で，パスワードのリセットを依頼できます．

第1部 アナログ電子回路

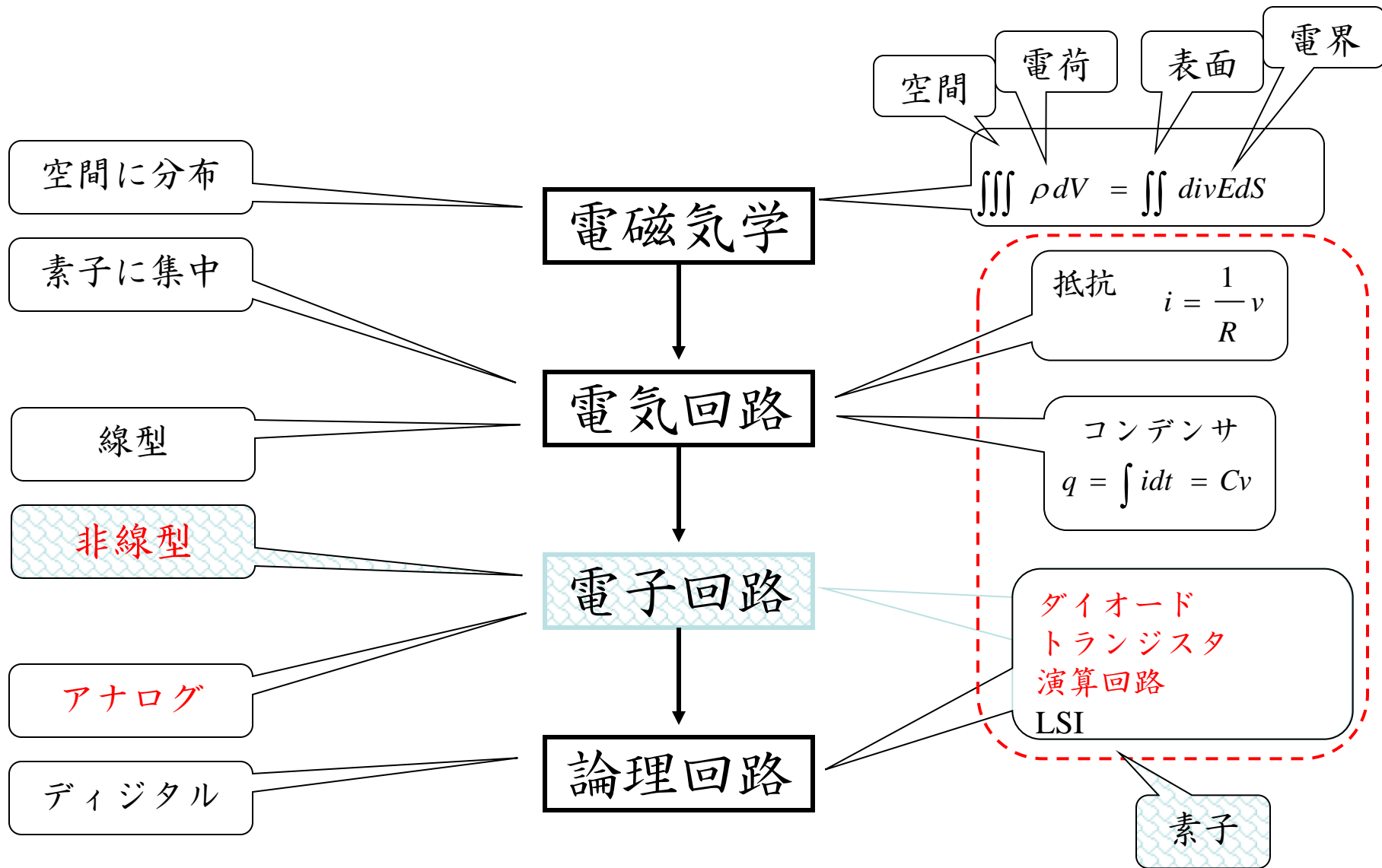
講義予定

0. 電子回路を学ぶ前に	テキスト1章
1. ダイオードの動作と回路	テキスト2章
2. トランジスタの動作と増幅回路	テキスト3章
3. トランジスタ増幅回路の 小信号等価回路	テキスト4章
4. 演算増幅器の動作	テキスト5章
5. 演算増幅器を使った各種回路の解析	テキスト5章

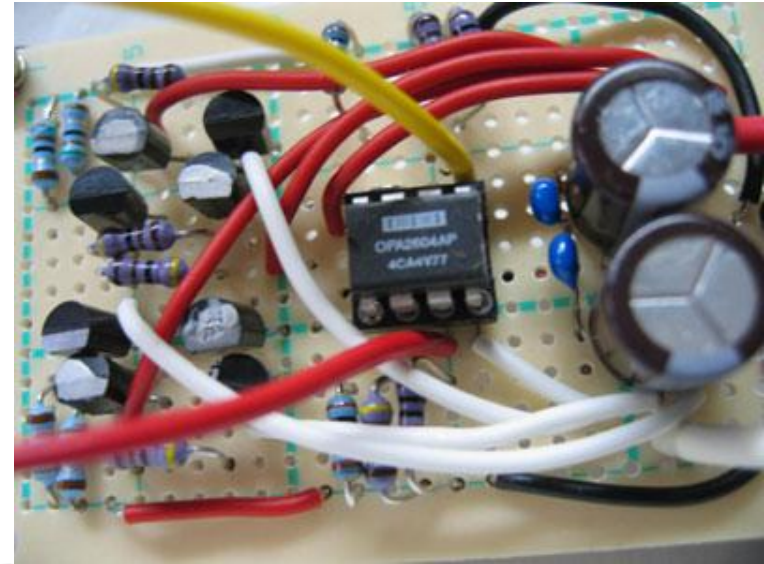
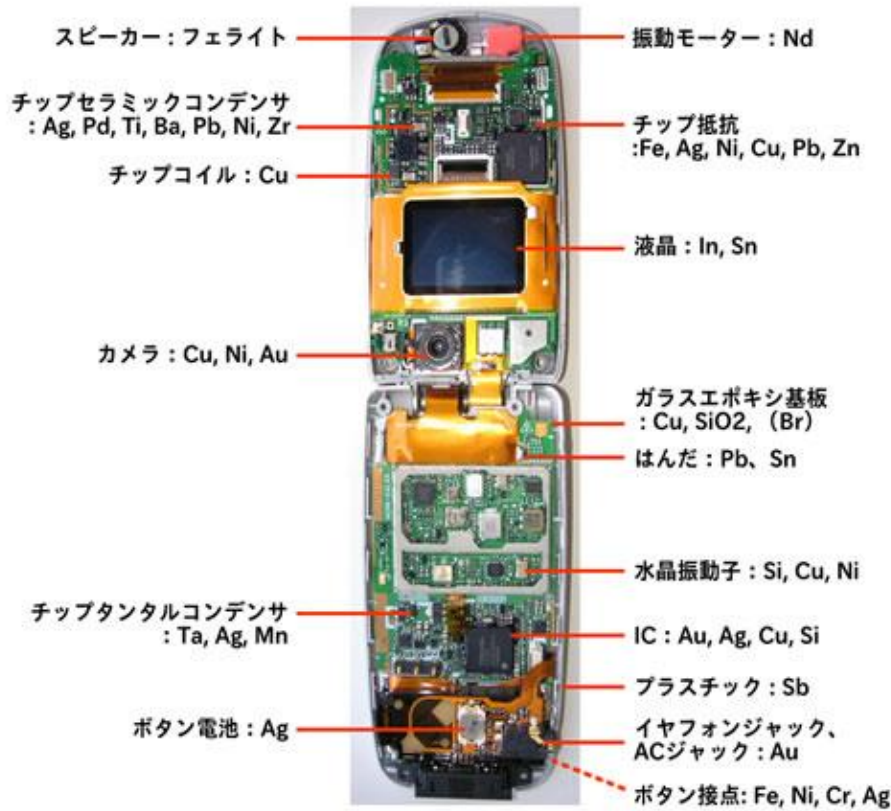
0. 電子回路を学ぶ前に

- 関連科目と電子回路の関連
- 情報機器の基盤技術：電子回路
- アナログとデジタル
 - 連続と離散
- 素子と回路
 - 自由と拘束
- 線形と非線形
 - 理想と現実
- 電気回路と電子回路の基礎

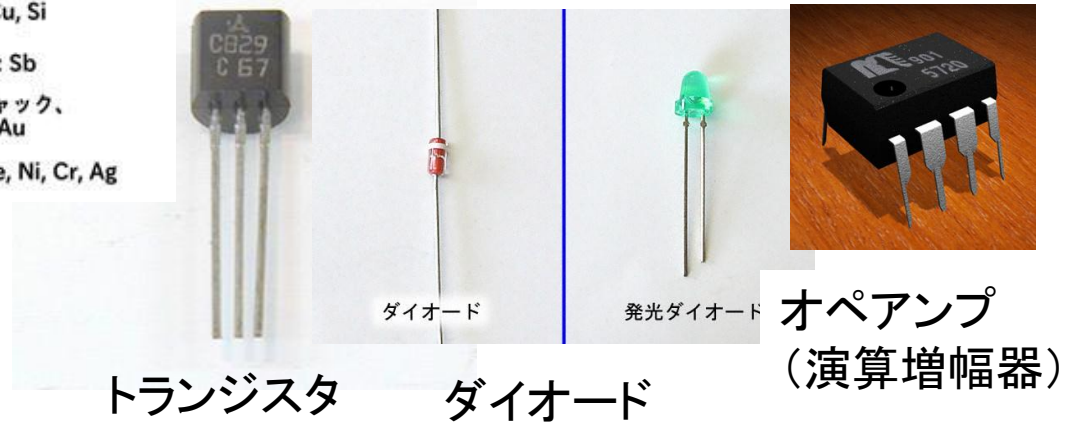
関連科目と電子回路の関連



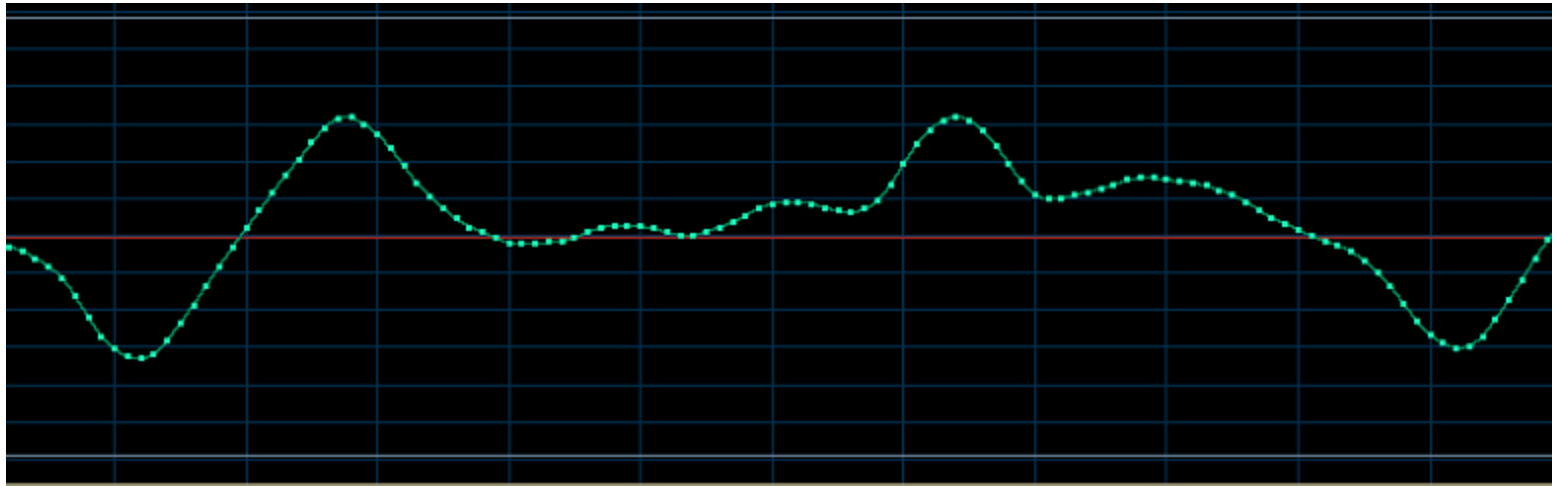
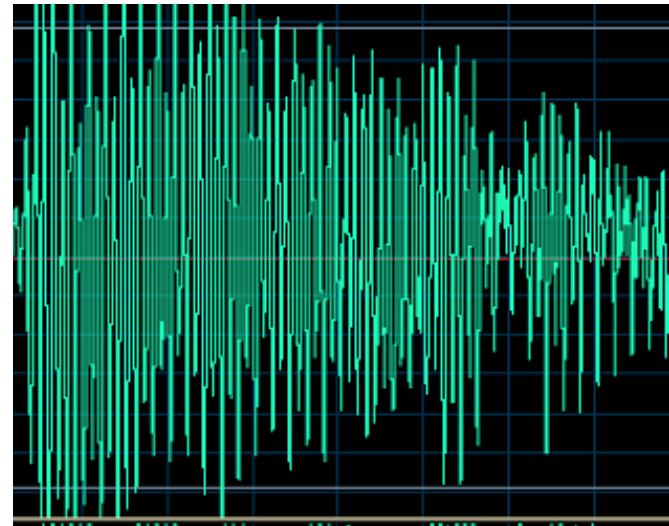
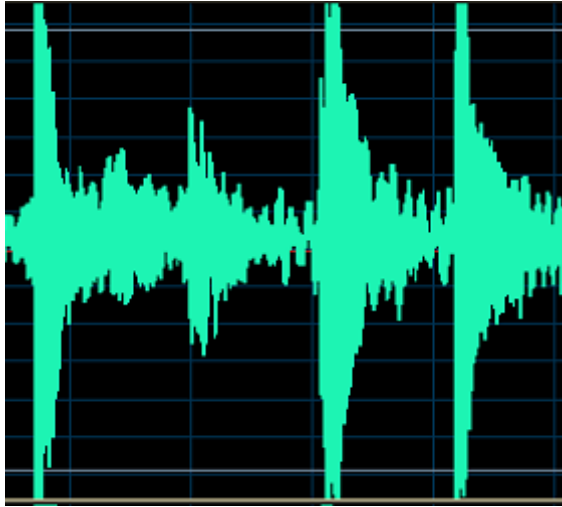
情報機器の基盤技術：電子回路



オーディオアンプ



アナログ波形



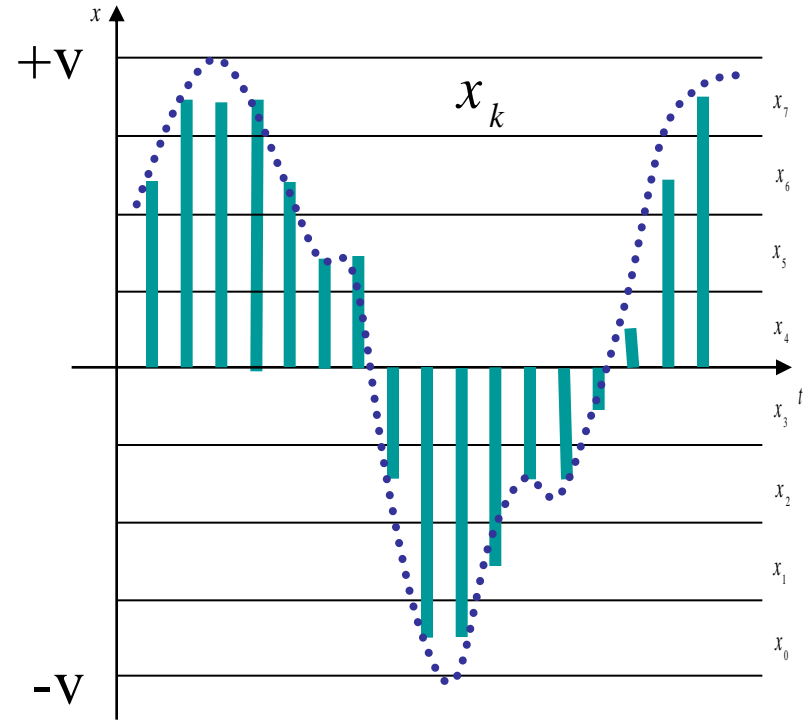
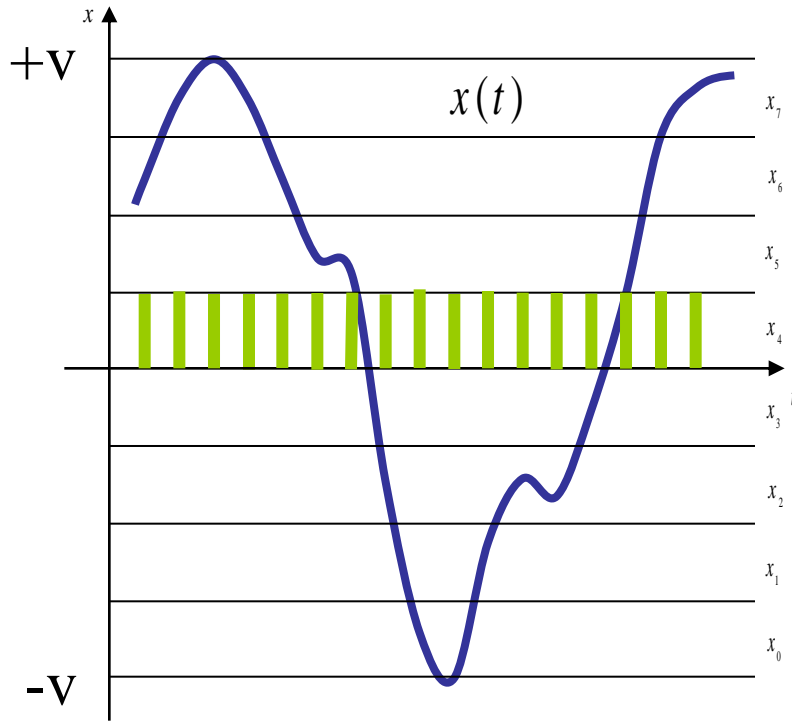
アナログとデジタル

連続と離散

連続な電圧変化

標本化

離散的な電圧計測値



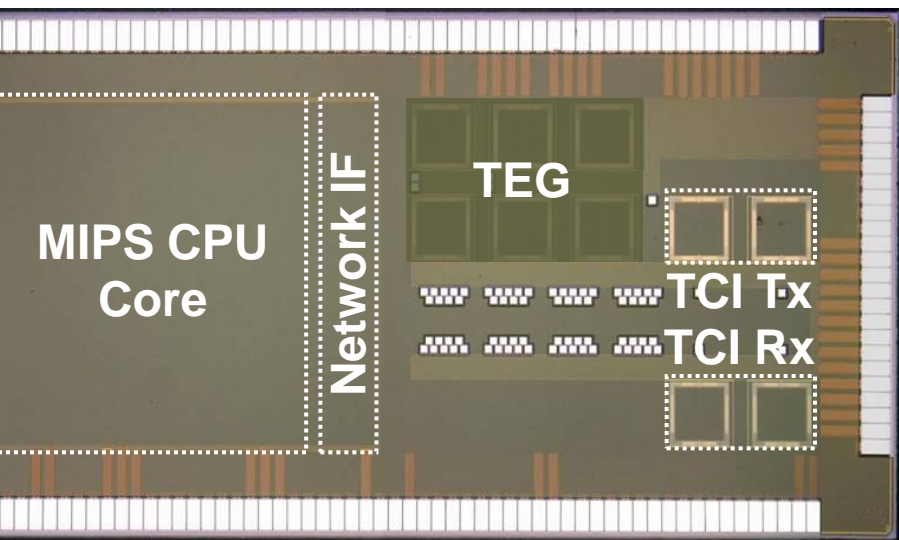
連続な電圧値

量子化

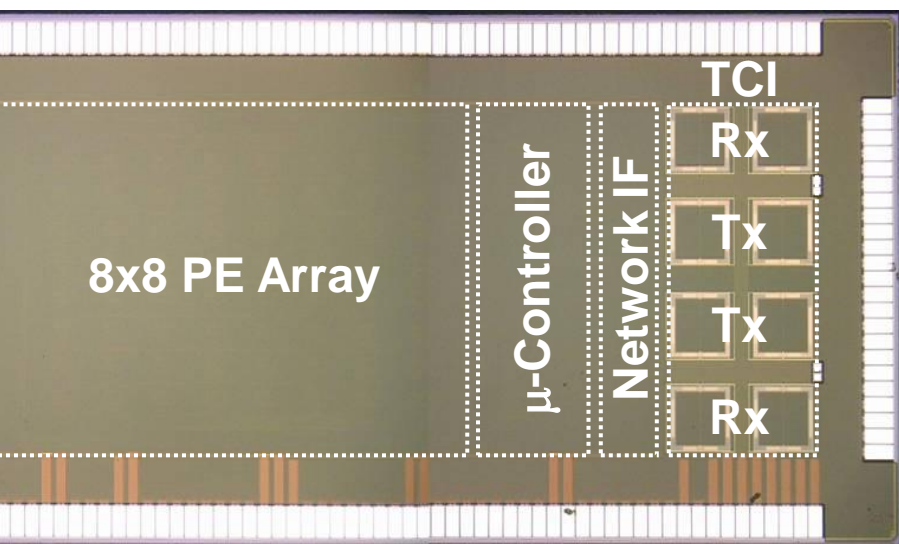
8種類の電圧値

なぜアナログを？

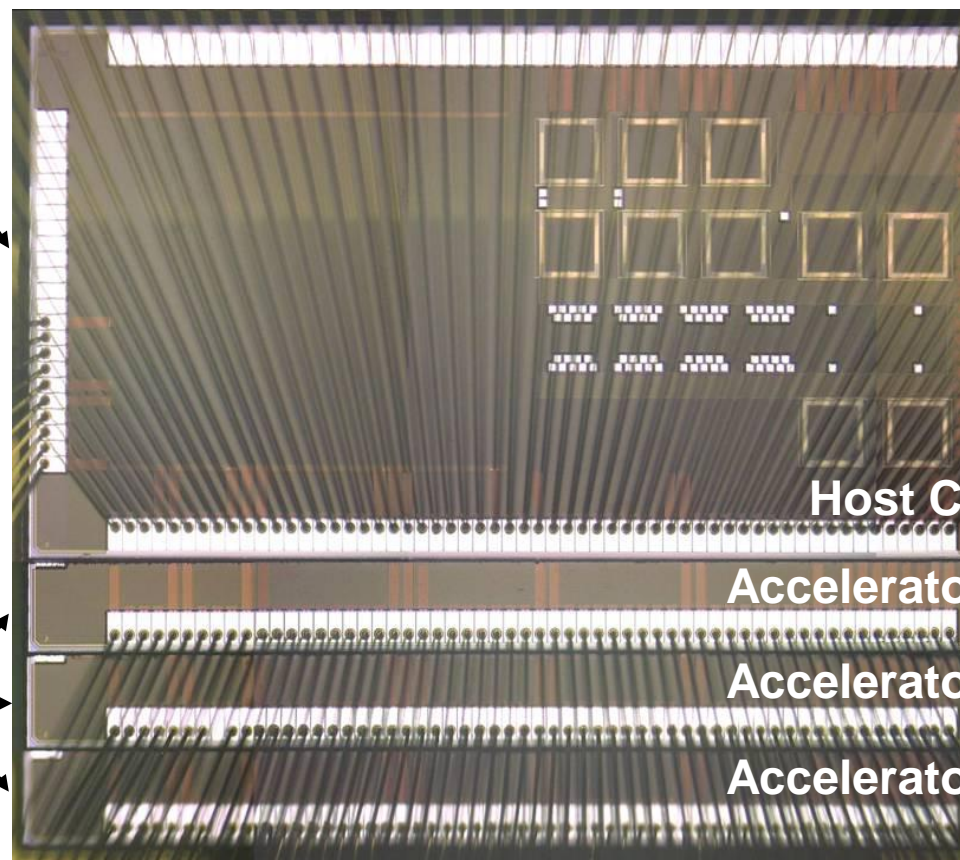
- 本当はデジタルの方が簡単なのでそちらを先にやりたい
- 基本的にアナログ電子回路は電子工学科の領分
- 今、何でもデジタルなのに、なぜアナログを？
 - 計算機基礎との関係、論理設計をやってからの方がデジタル回路の解説がうまく行く
 - 今はやはりミックスドアナログ・デジタル
 - 日本半導体の一部はこれで生きようとしている



Host CPU Chip



Accelerator Chip



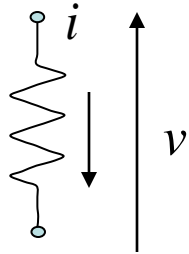
**Host CPU + Accelerator x3 Chip Stack
Fabricated in 65nm CMOS**

Microphotograph of stacked test chips.

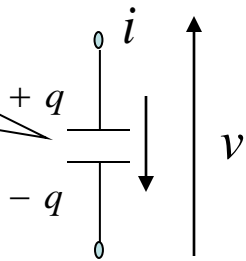
素子と回路

- 自由と拘束

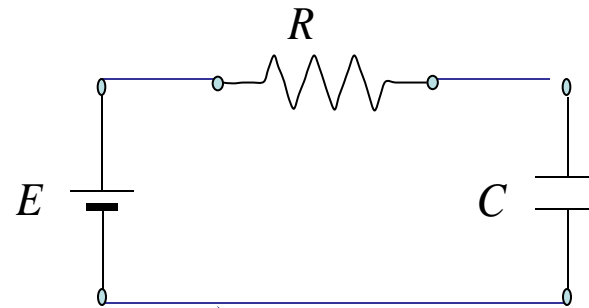
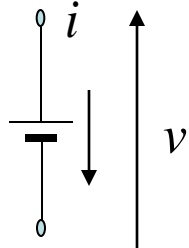
$$i = \frac{1}{R}v$$



$$q = \int idt = Cv$$



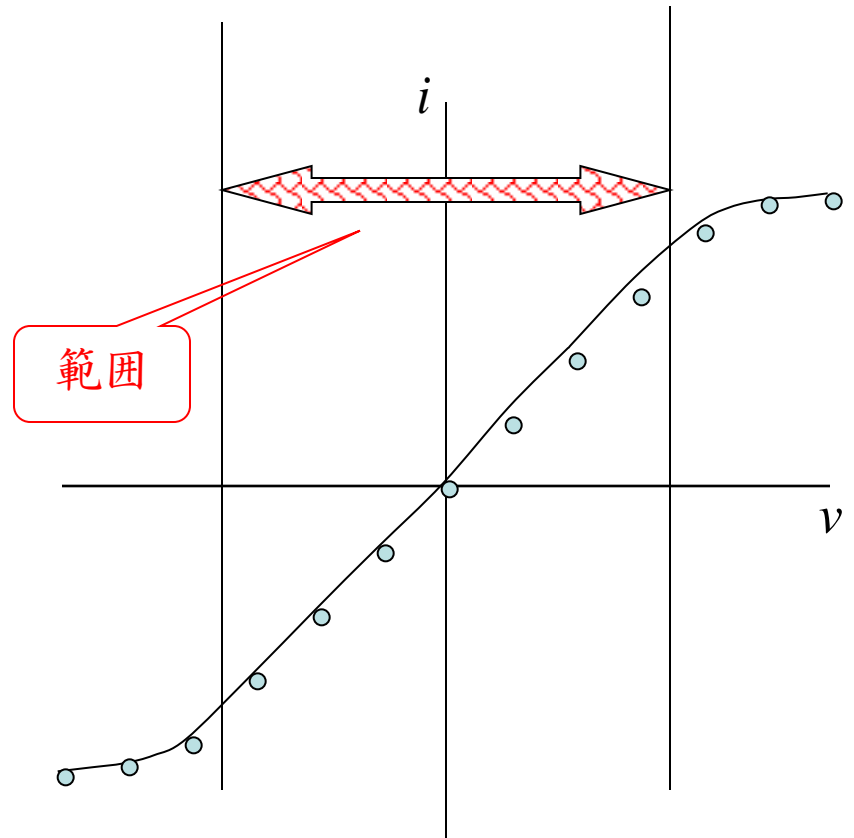
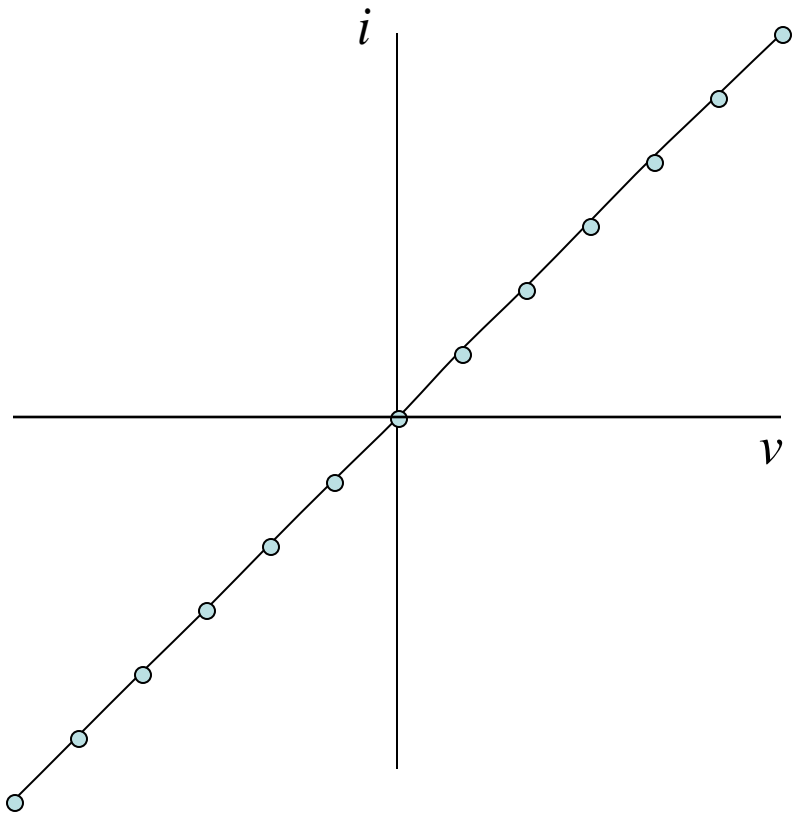
$$v = E$$



$$E = v_R + v_C = R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C}q$$

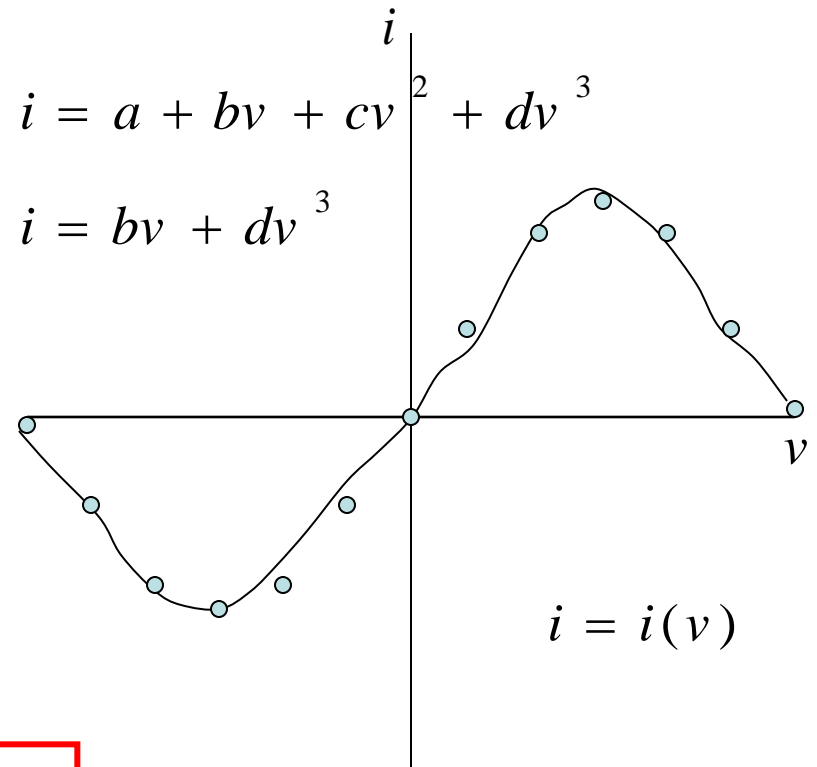
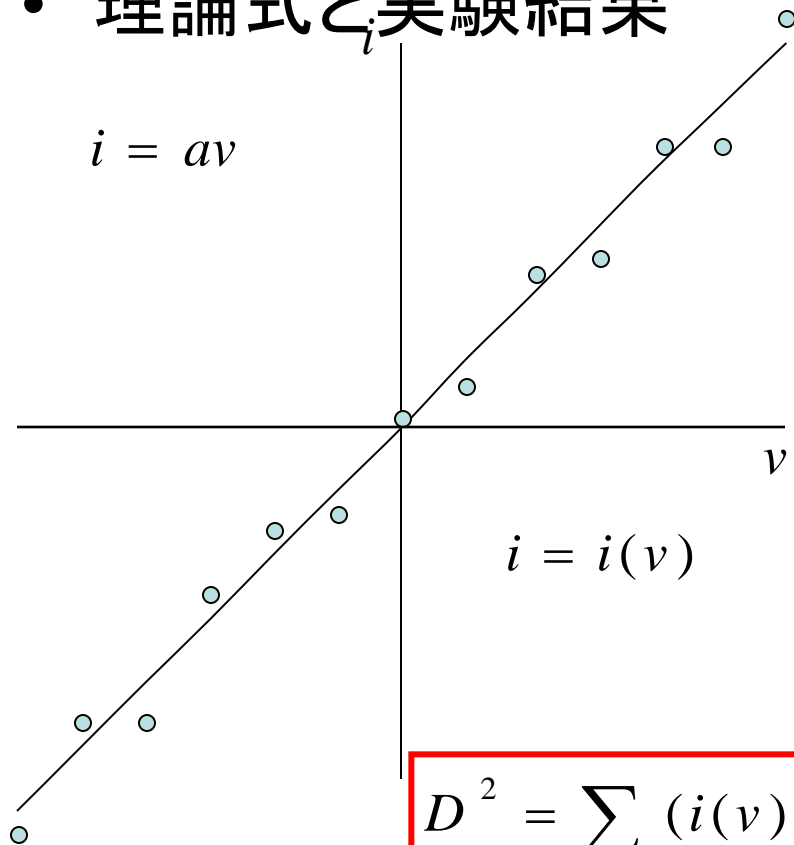
線形と非線形

- 理想と現実



線形と非線形

- 理論式と実験結果

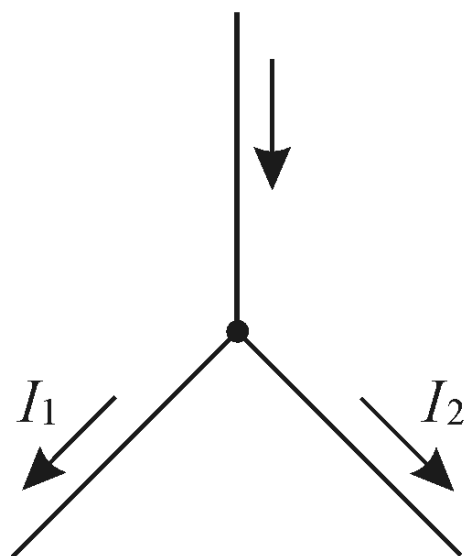


$$D^2 = \sum_v (i(v) - av)^2$$

電気回路と電子回路

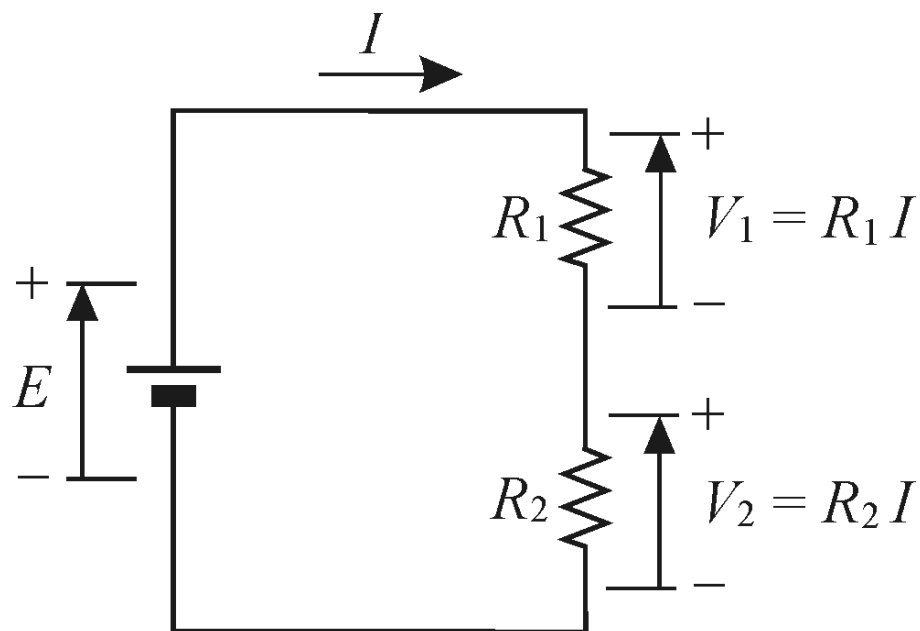
- 電気回路の基本的性質
- 電気回路素子の性質
- インピーダンス

キルヒホフの法則



$$I = I_1 + I_2$$

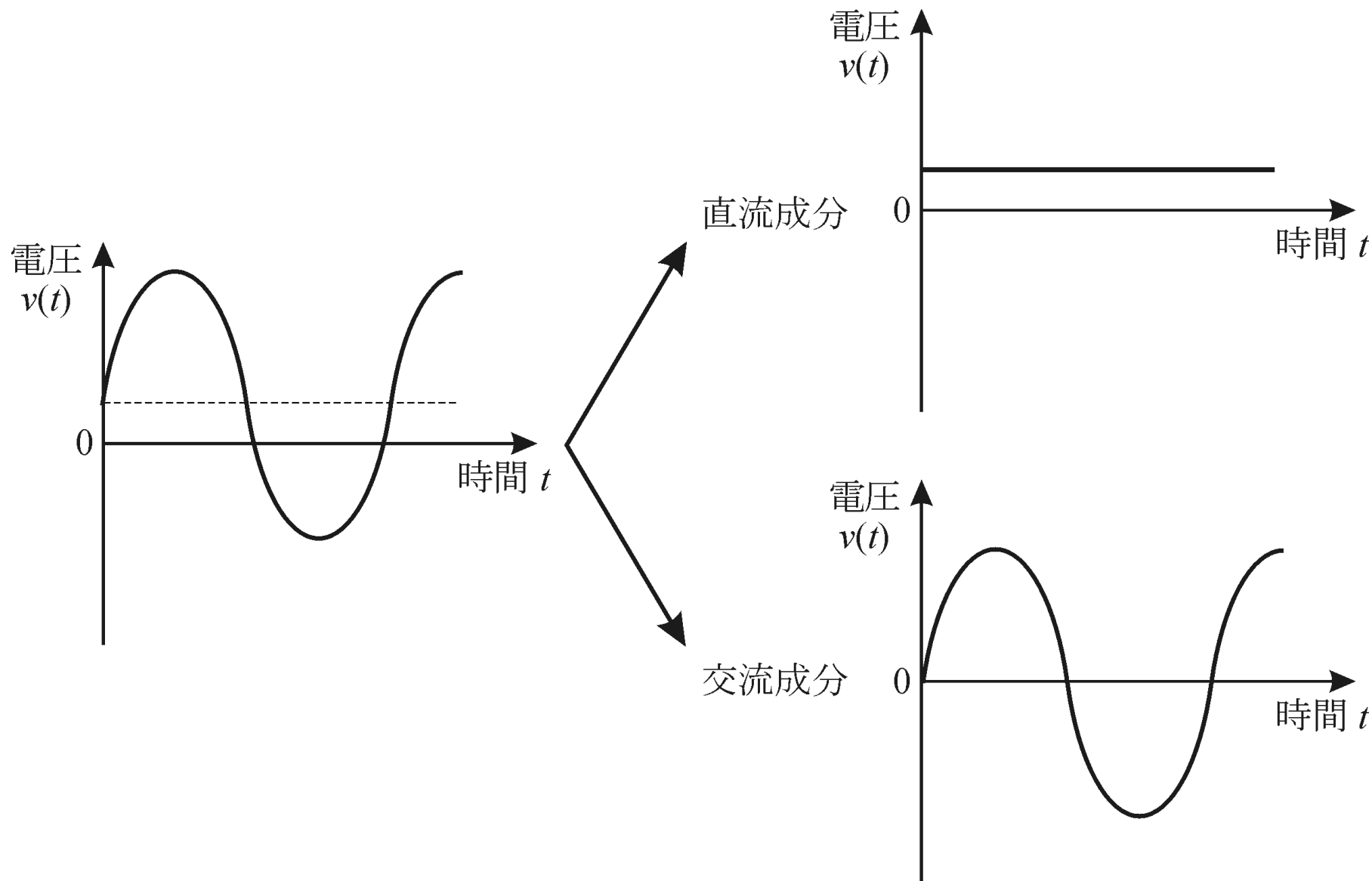
(a) 電流則



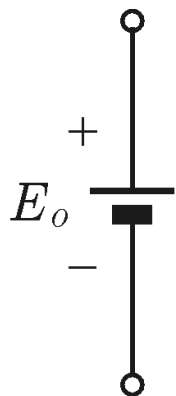
$$E = V_1 + V_2$$

(b) 電圧則

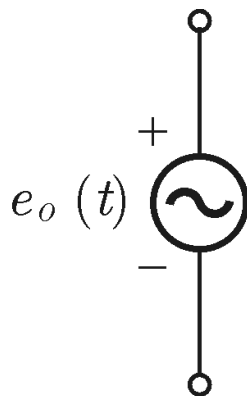
交流と直流



電圧源・電流源

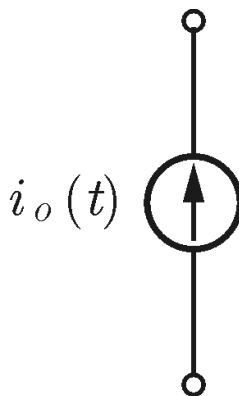


(a-1)

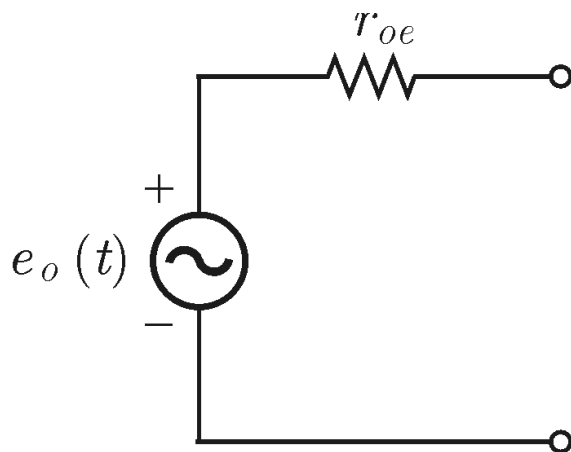


(a-2)

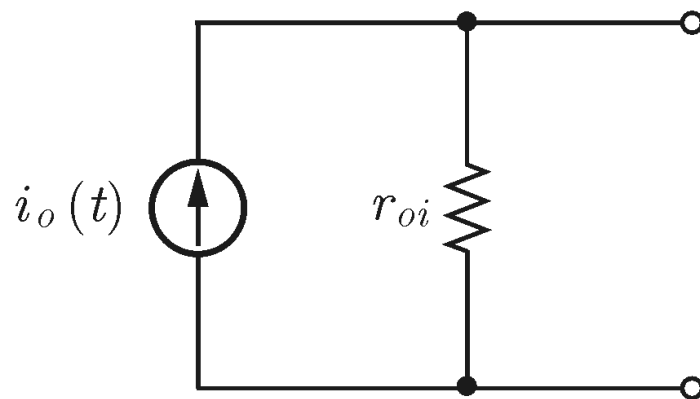
(a) 電圧源



(b) 電流源

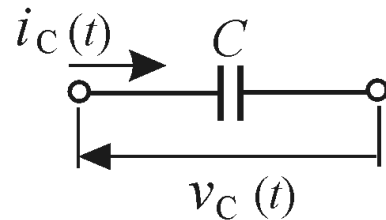
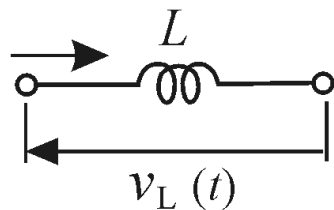
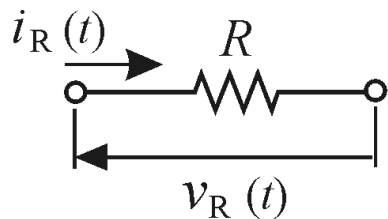


(a) 電圧源

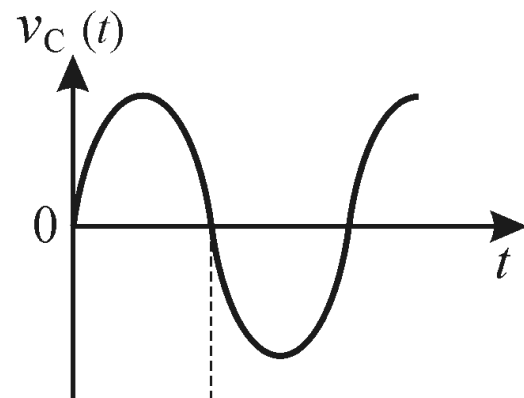
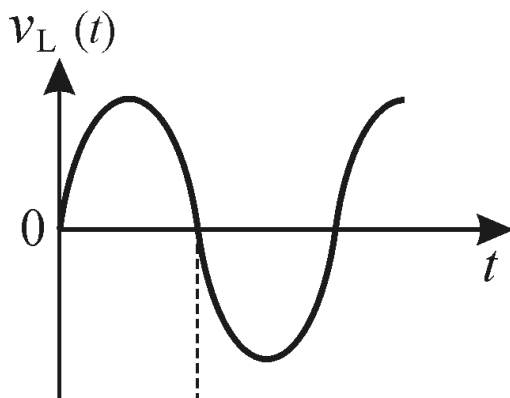
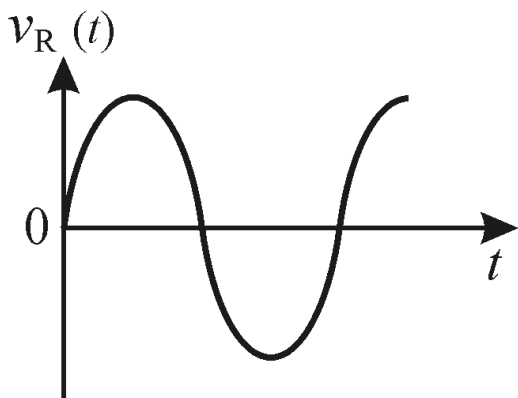


(b) 電流源

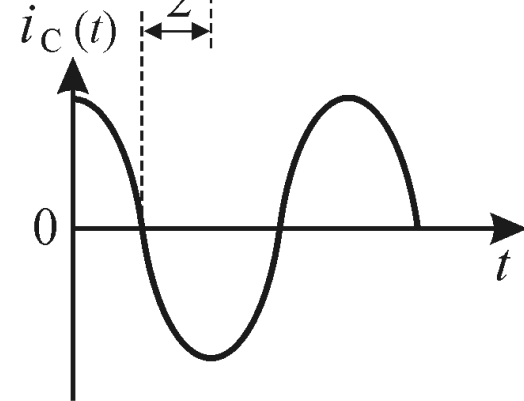
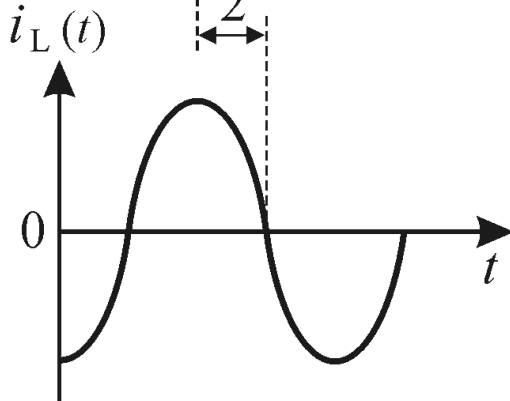
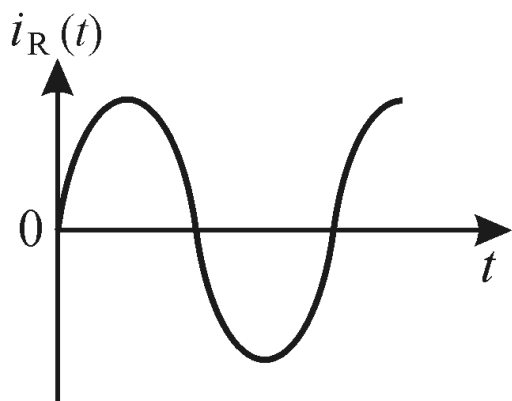
基本電気回路素子の性質



電圧波形



電流波形

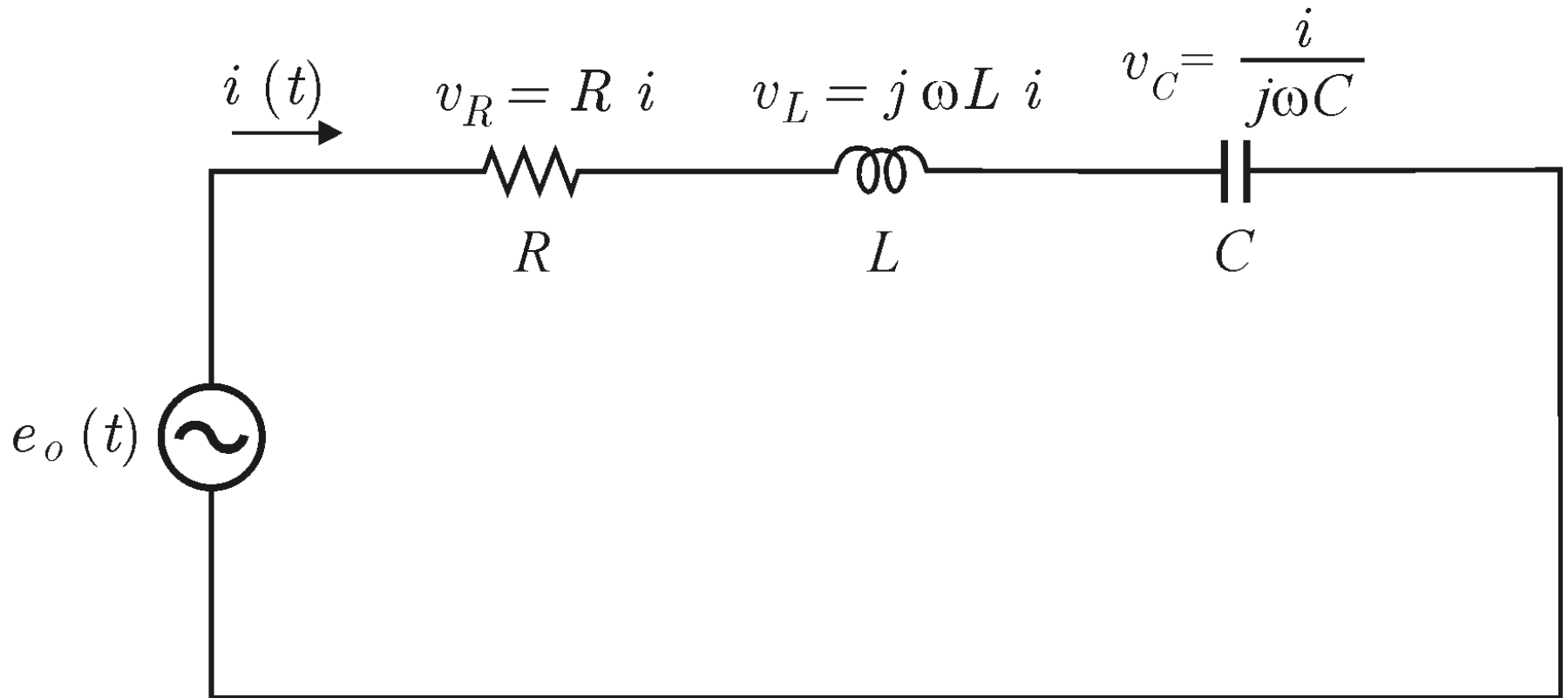


(a) 抵抗

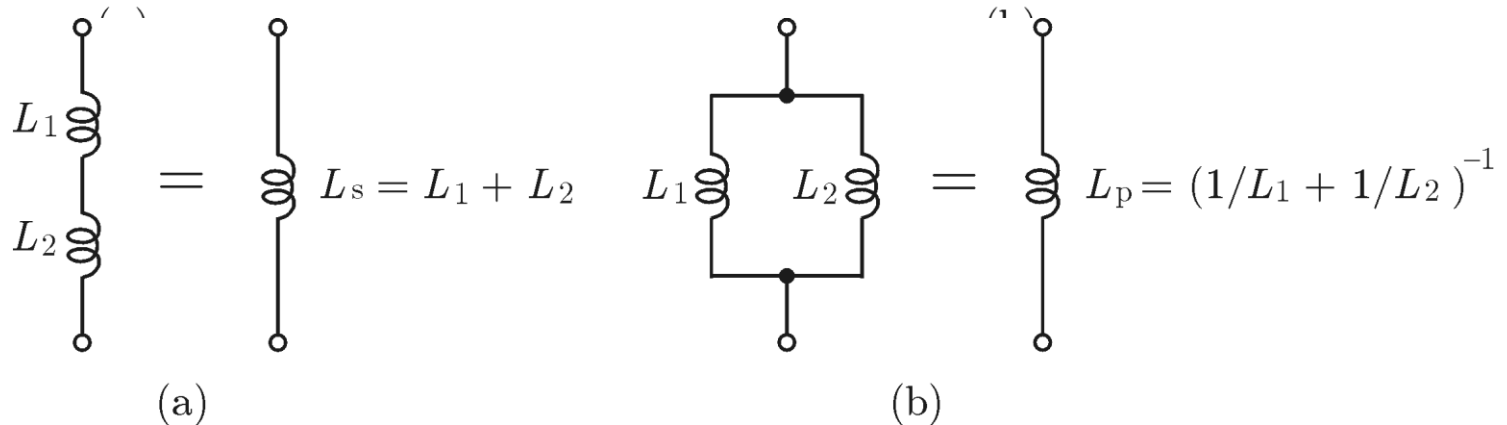
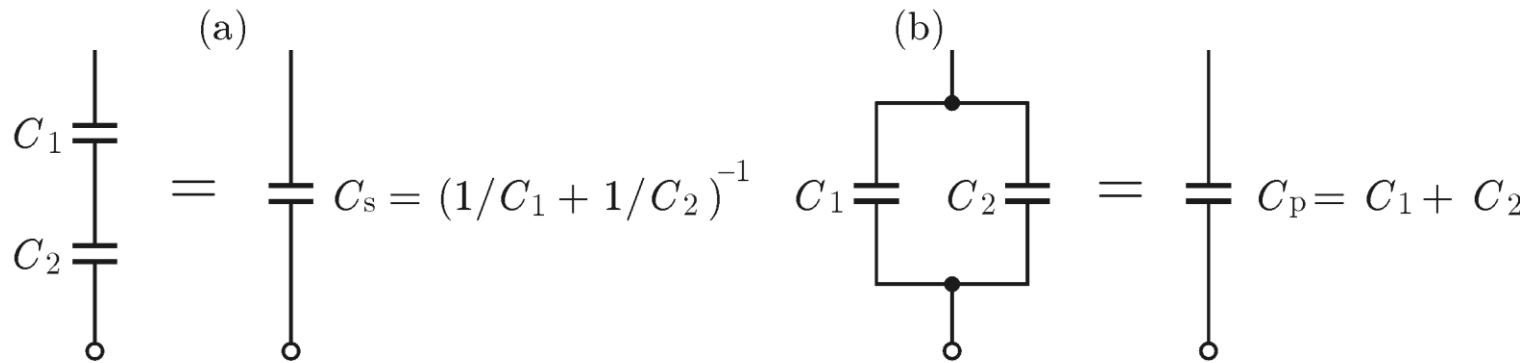
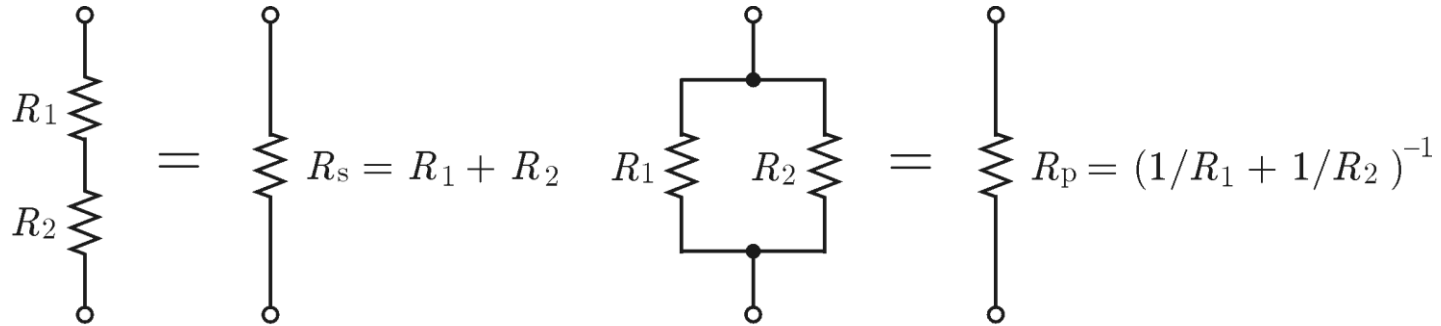
(b) インダクタンス

(c) コンデンサ

各素子のインピーダンス



回路素子の直列・並列接続



1. ダイオードの動作と回路

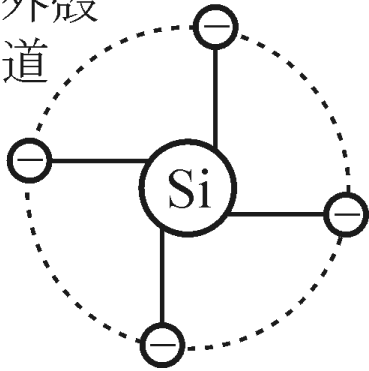
- 半導体の動作原理
- ダイオードの動作
- ダイオード回路
- バイポーラトランジスタの動作
- 電界効果トランジスタの動作

真性半導体

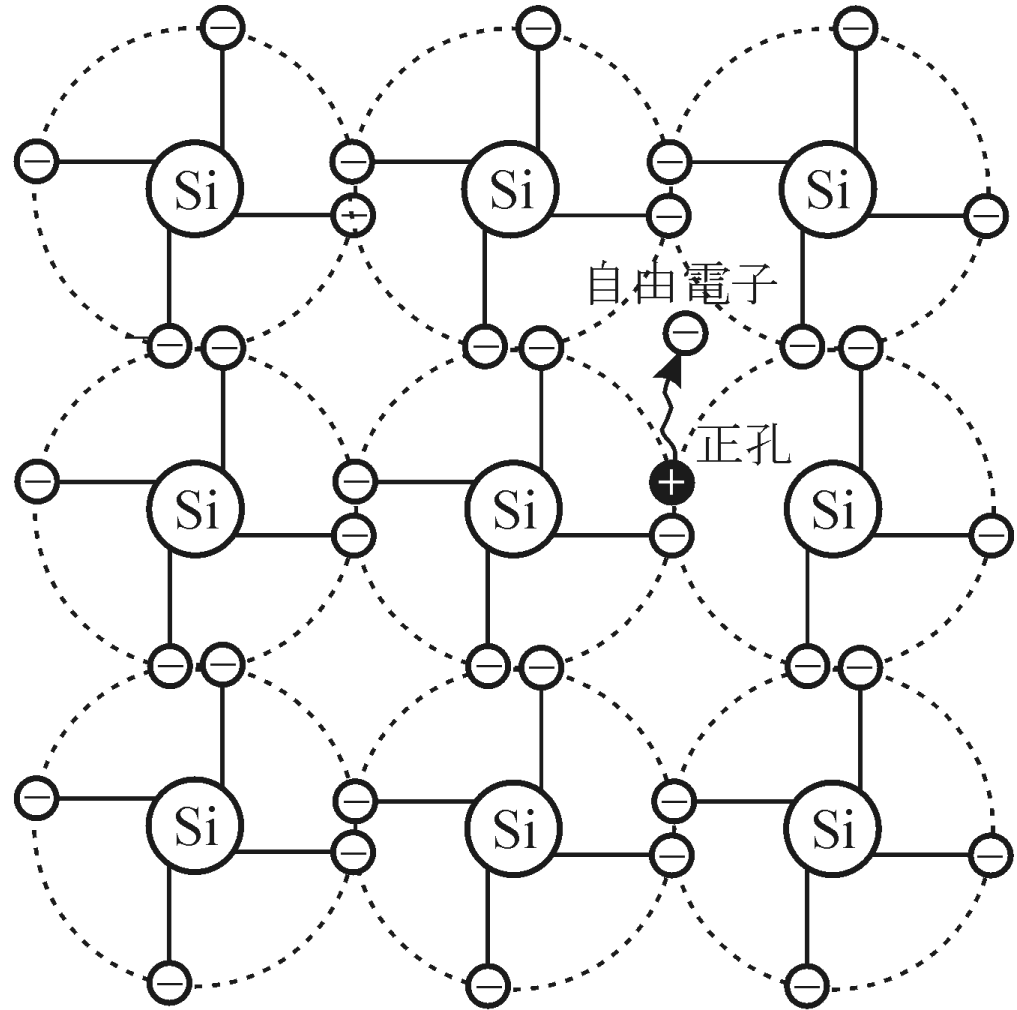
- 例: シリコン

- 自由電子数 = 正孔数

最外殻
軌道



(a) シリコン原子



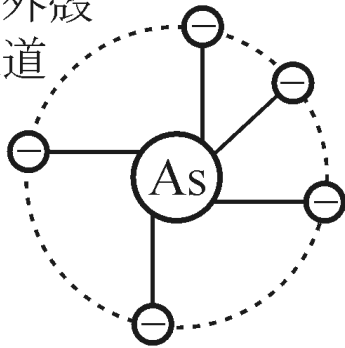
(b) 共有結合状態

不純物半導体 (n型半導体)

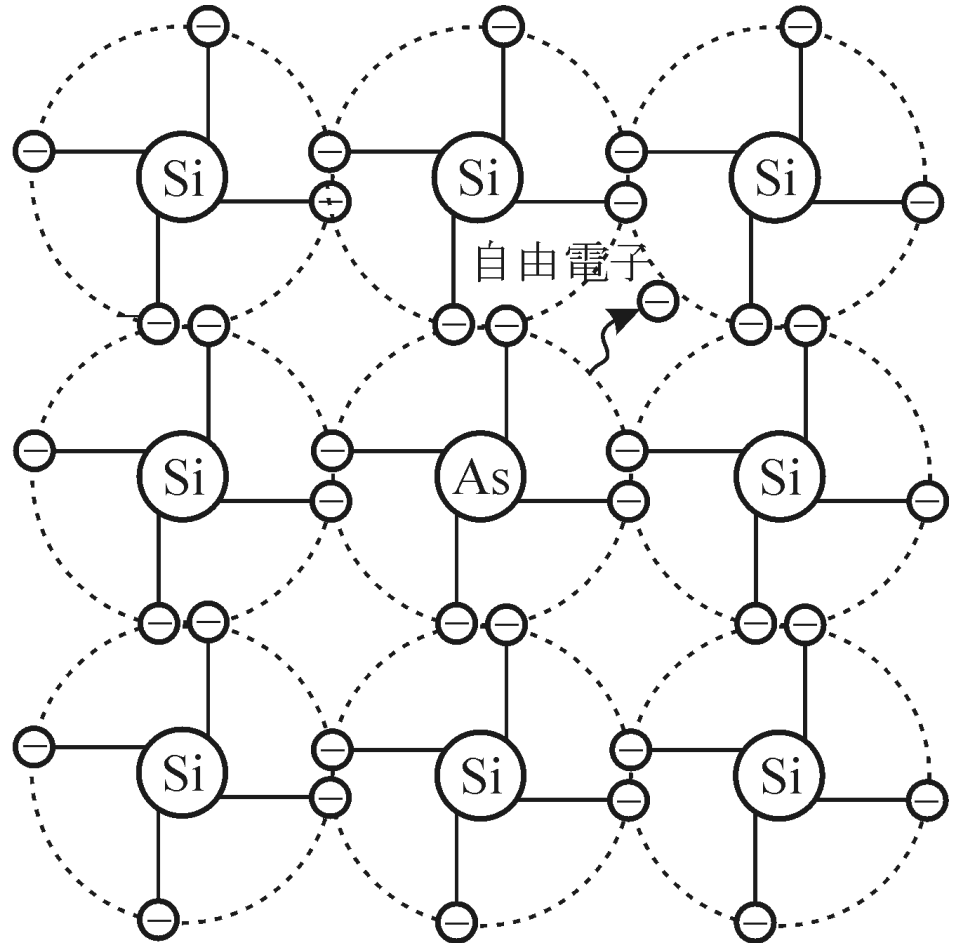
- 5価の不純物としてヒ素AsをSiに混入

– 自由電子が発生
(ドナー)

最外殻
軌道



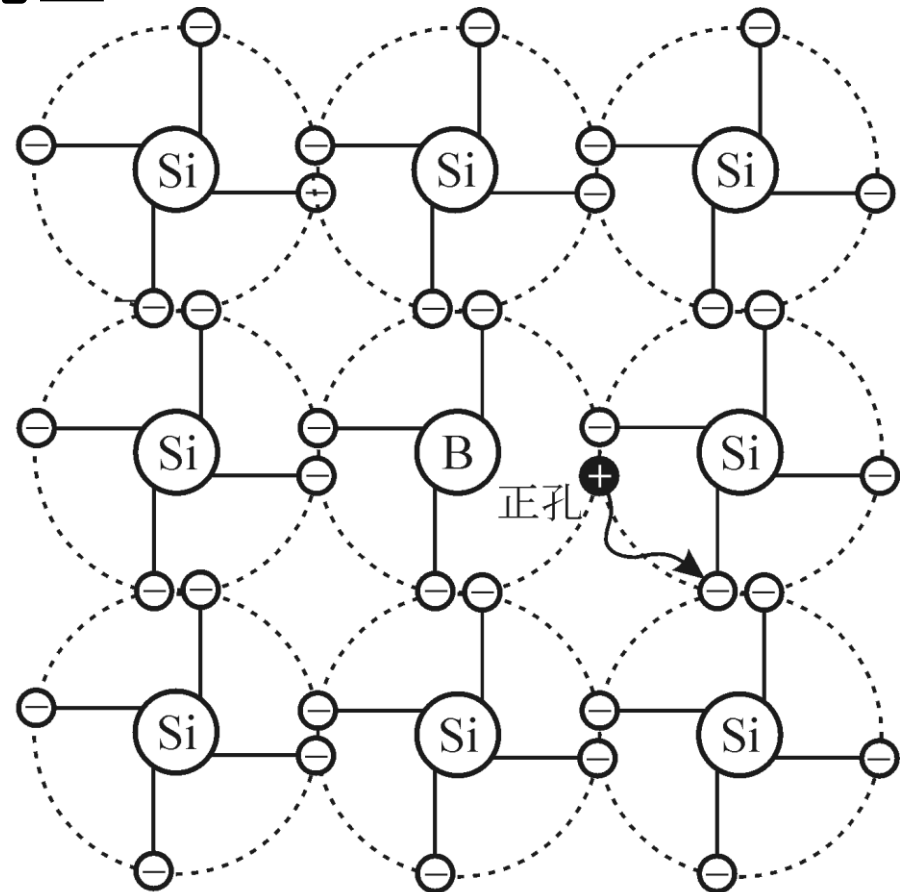
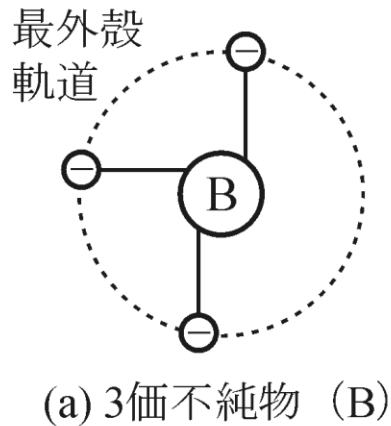
(a) 5価不純物 (As)



(b) 共有結合状態

不純物半導体 (p型半導体)

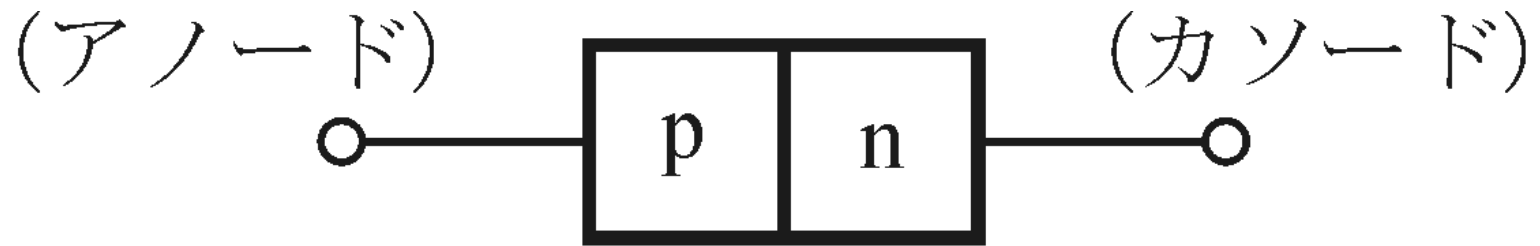
- 3価の不純物としてホウ素BをSiに混入
 - 電子が不足し正孔が発生 (アクセプタ)



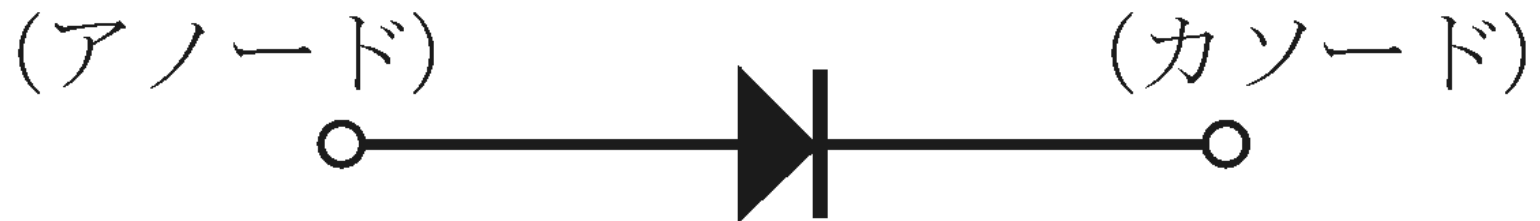
(b) 共有結合状態

ダイオード

- pn接合 (p型半導体とn型半導体の接合)

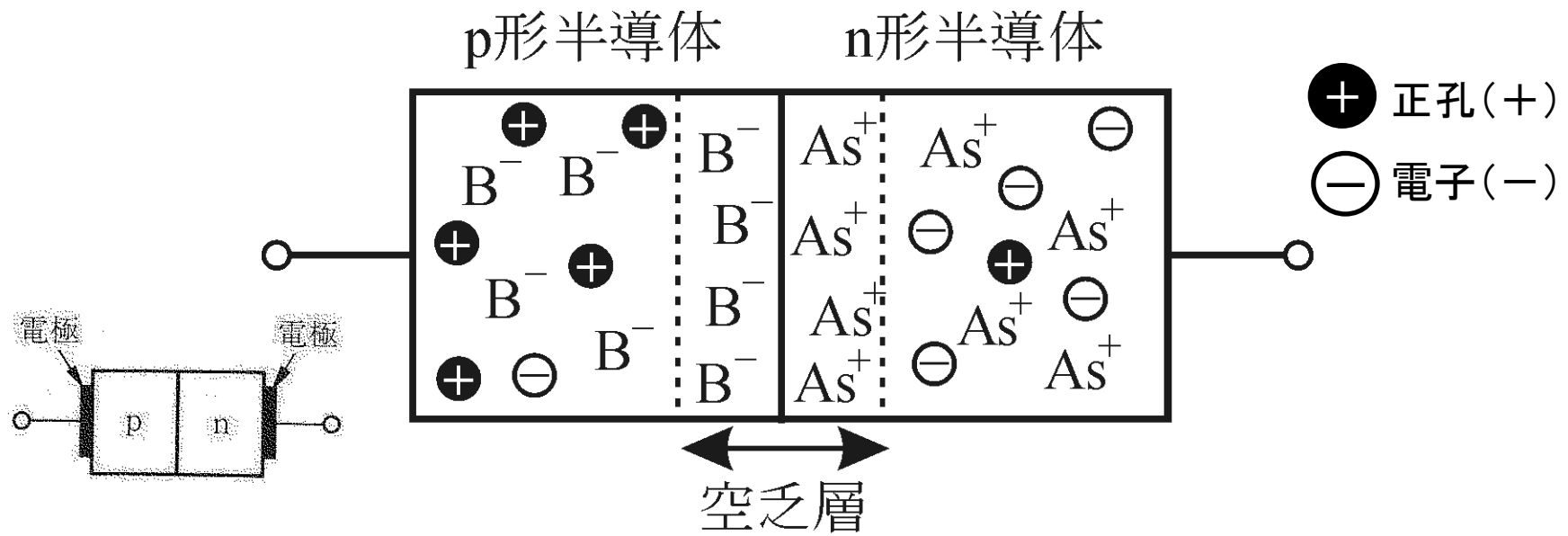


(a) 構造

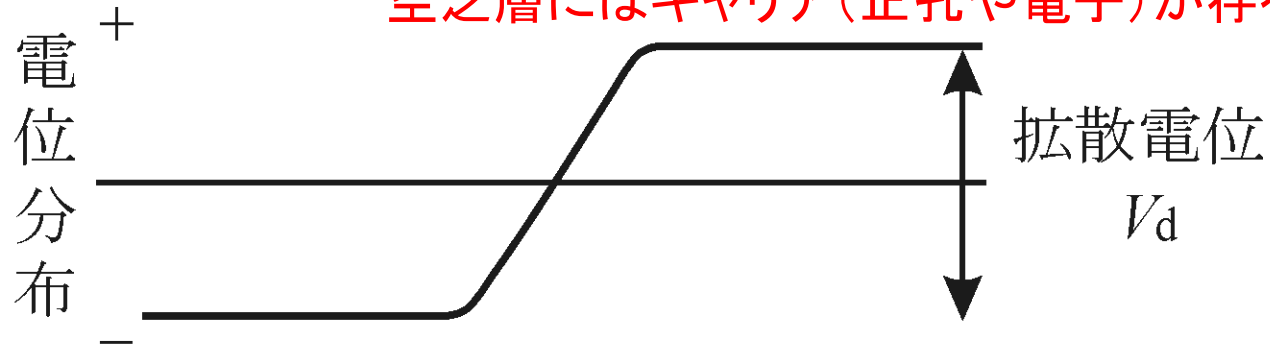


(b) 記号

ダイオードの動作 (電圧未印加)

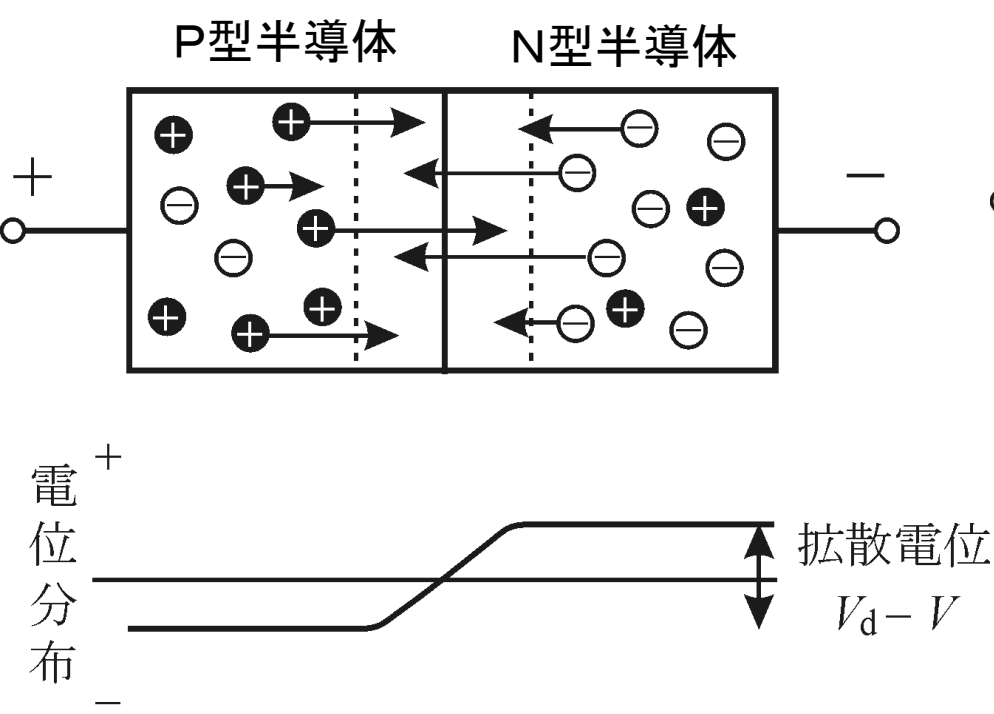


空乏層にはキャリア(正孔や電子)が存在しない



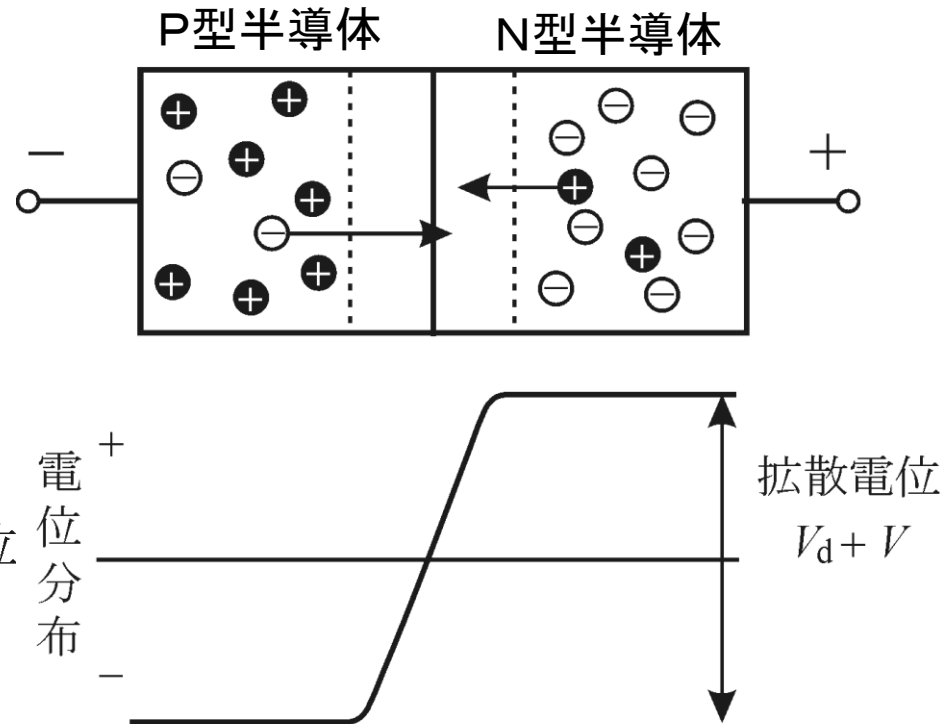
(a) 電圧未印加

ダイオードの動作 (電圧印加)



(b) 順電圧印加

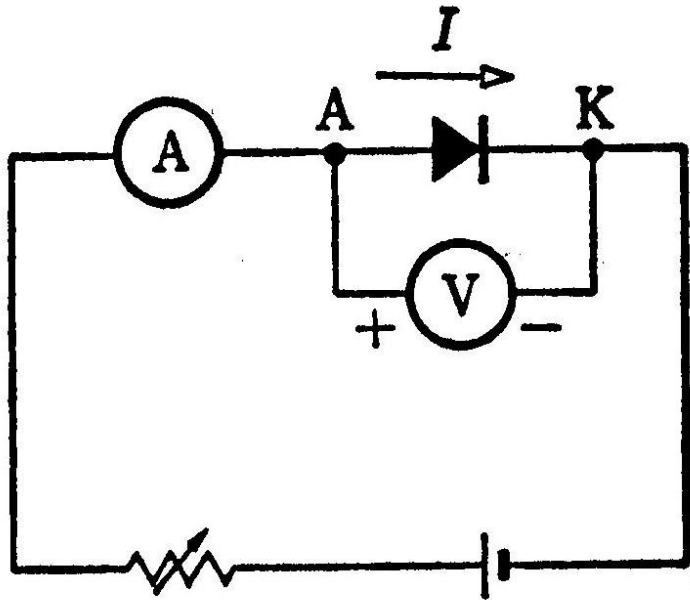
多数キャリア (p型における正孔, n型における電子) が移動し, 電流として流れる



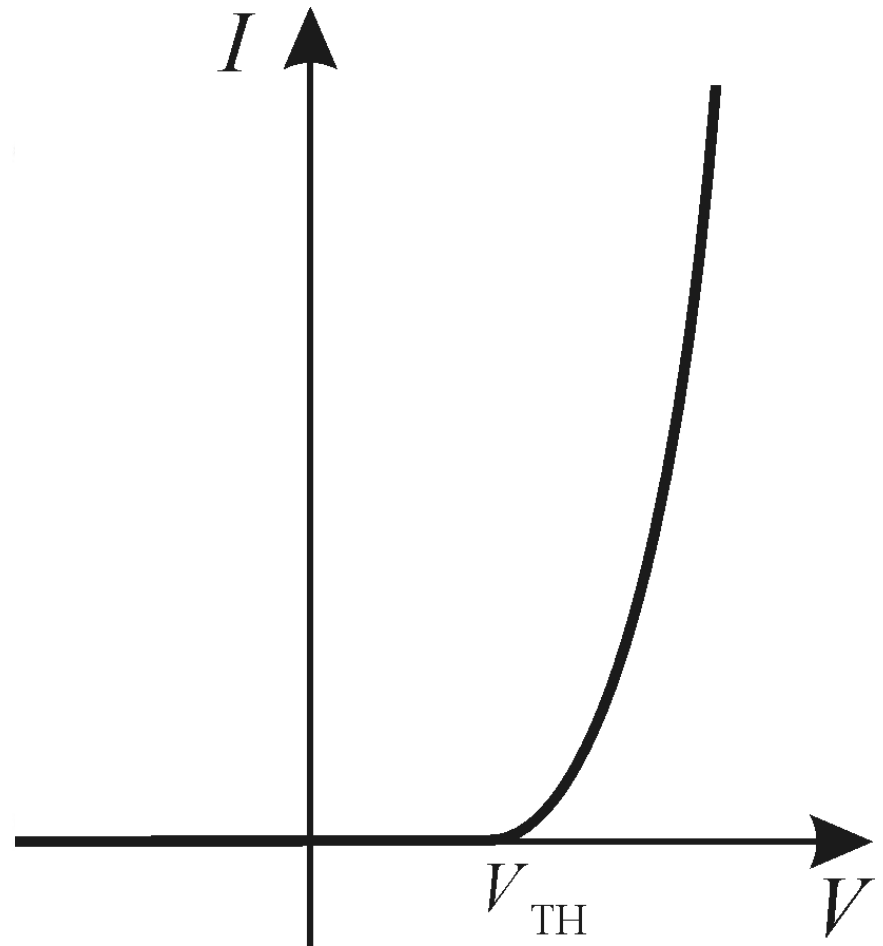
(c) 逆電圧印加

少数キャリア (p型における電子, n型における正孔) の移動はあるが, 数が少ないため電流にはならない

ダイオードの電流－電圧特性



(a) 測定回路 (A, V はそれぞれ電流計, 電圧計)



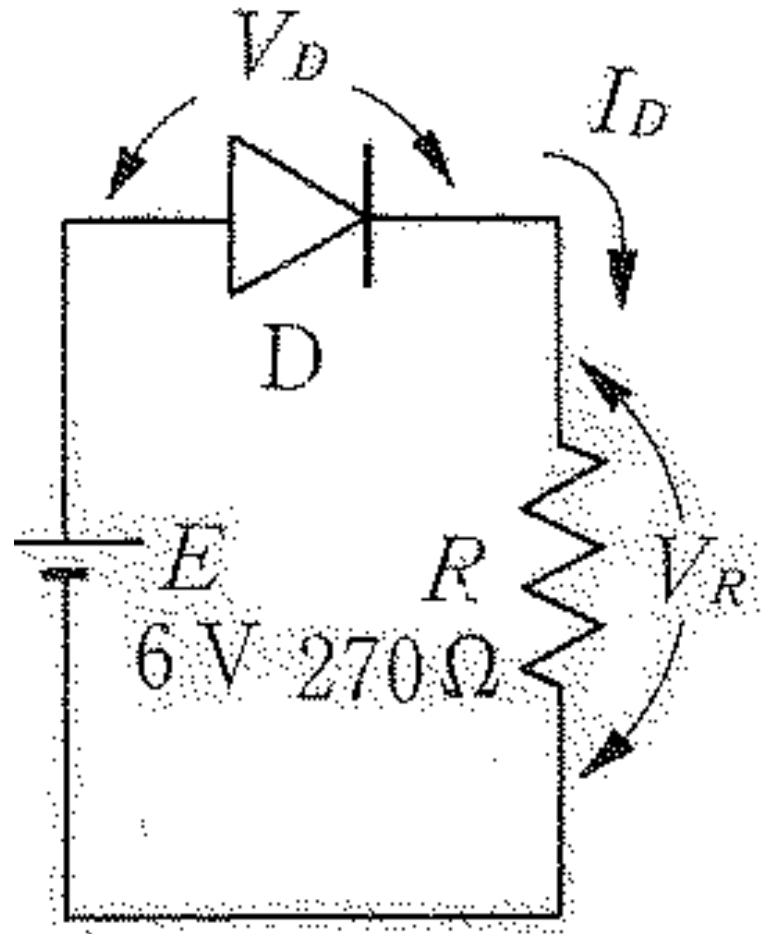
$$V_{TH} \doteq 0.7V$$

ダイオード回路

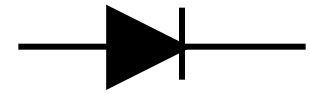
$$E = V_D + V_R = V_D + RI_D$$

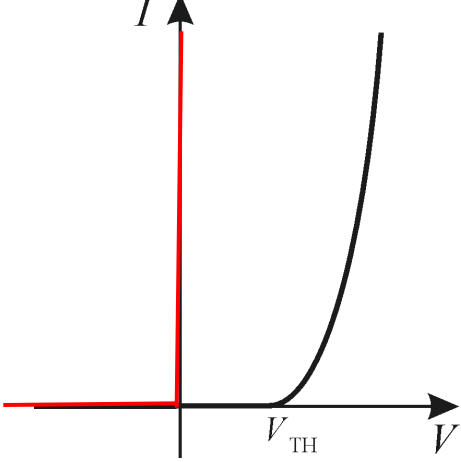
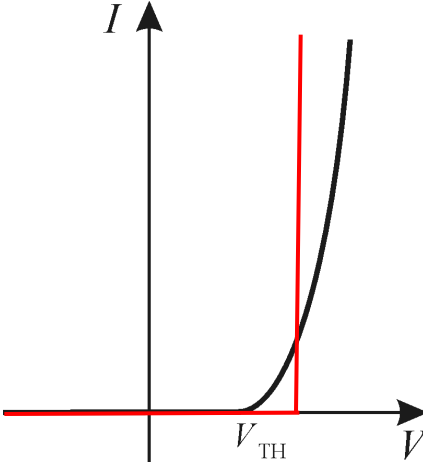
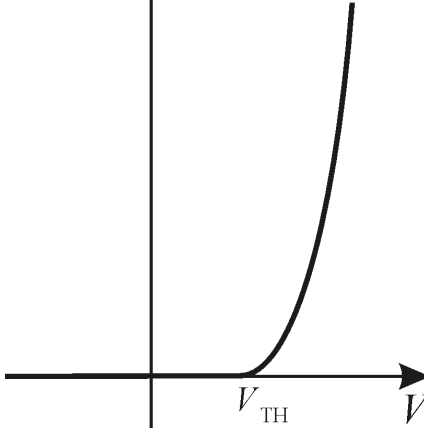
$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{1}{R}V_D$$

E - I_D 特性は？

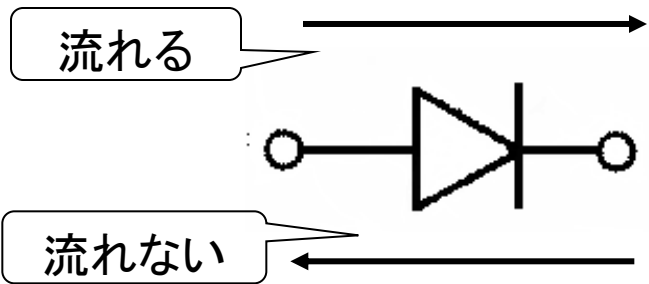


ダイオード特性

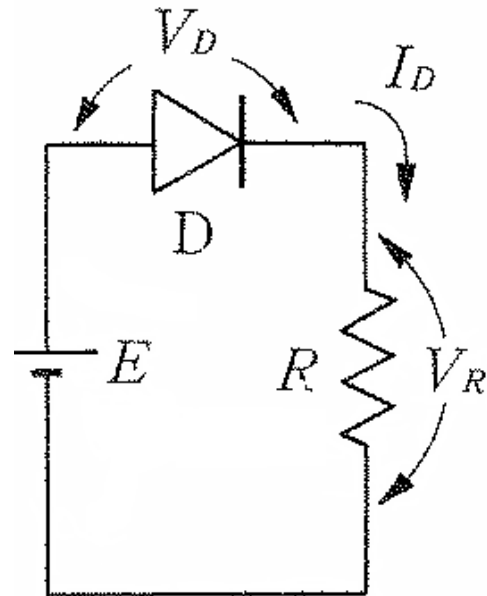


理想	近似	現実
<p>if $V_D \geq 0$, ON ($V_D = 0, I_D > 0$)</p> <p>If $V_D < 0$, OFF ($V_D < 0, I_D = 0$)</p>	<p>if $V_D \geq 0.7$, ON ($V_D = 0.7, I_D > 0$)</p> <p>If $V_D < 0.7$, OFF ($V_D < 0.7, I_D = 0$)</p>	
		

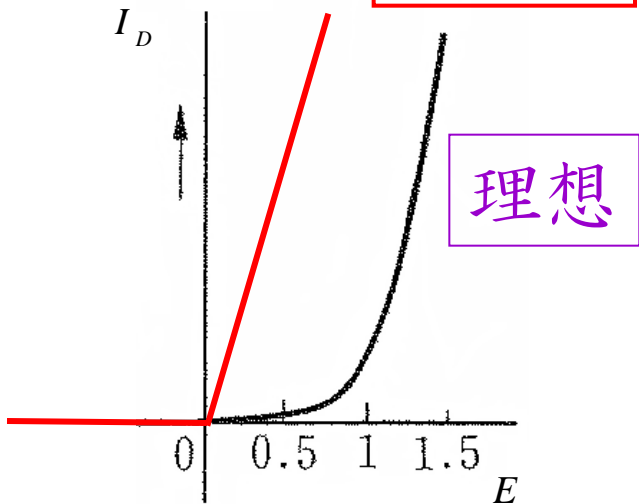
ダイオード回路の特性



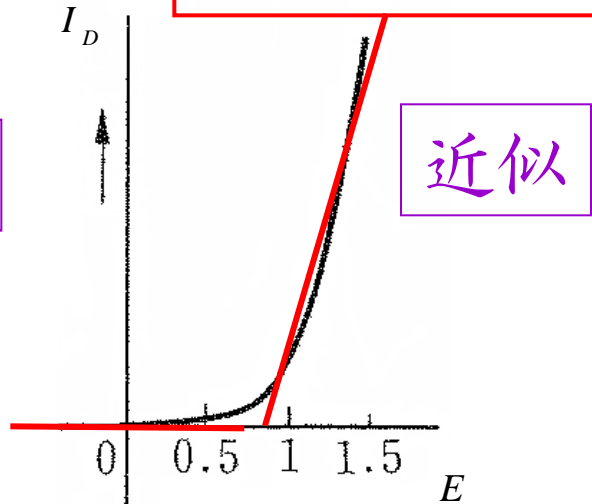
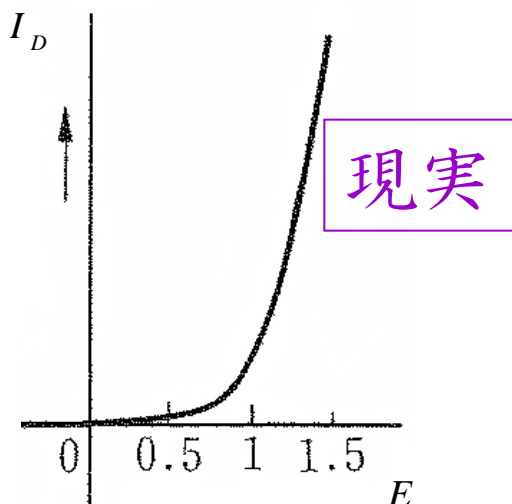
$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{1}{R} V_D$$



$$I_D = \frac{1}{R} E$$



$$I_D = \frac{1}{R} (E - 0.7)$$

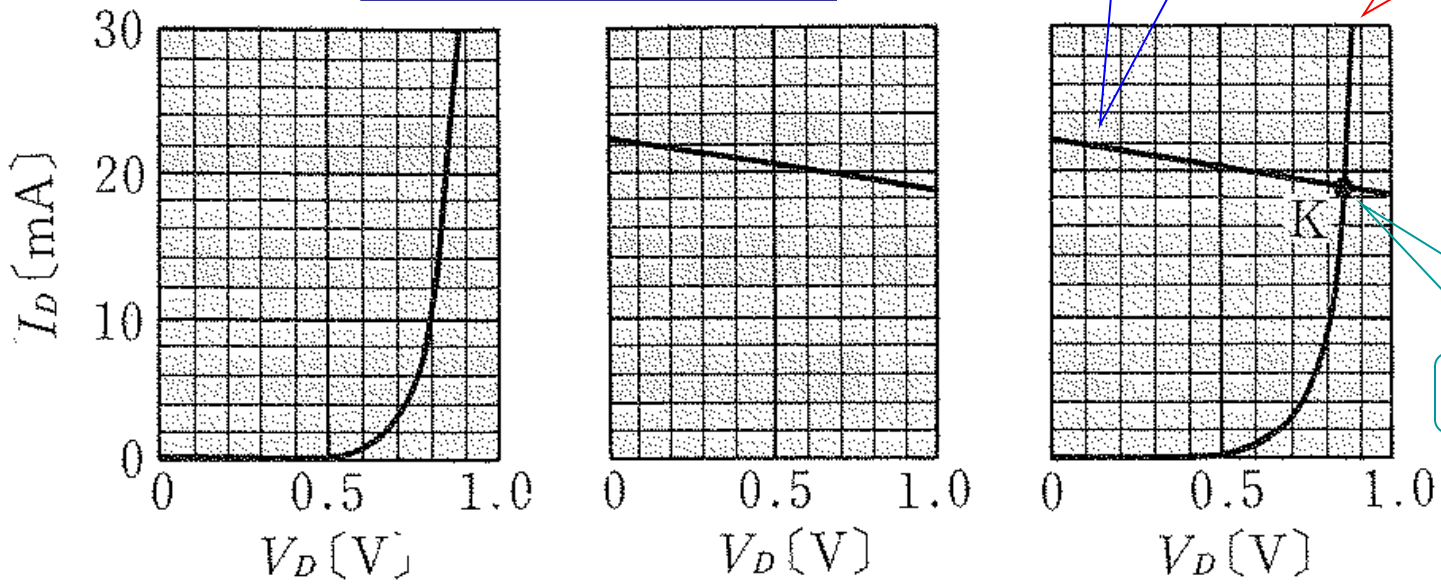


現実ダイオード特性による ダイオード回路解析

$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{1}{R}V_D$$

回路の特性

ダイオードの特性



連立方程式

(a) ダイオードの特性

(b) $I_D = -3.7V_D + 22.2$ の直線

(c) ダイオードの特性と直線の交点K

で、特に指定の無い限り、近似ダイオードと考えておけば十分

回路の特性

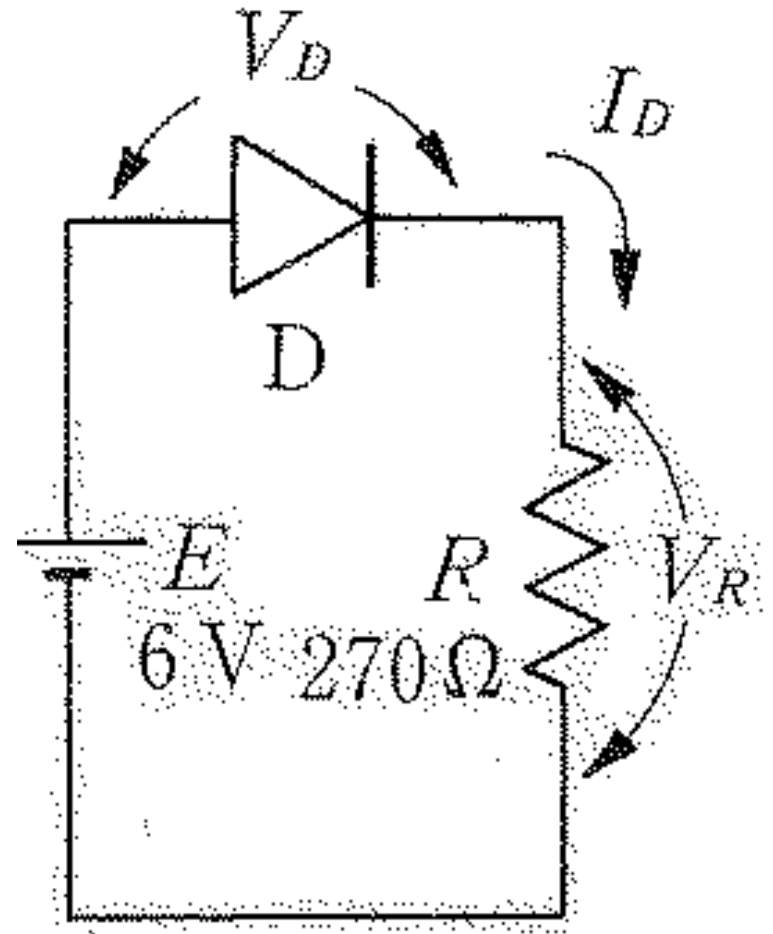
$$I_D = \frac{E}{R} - \frac{1}{R} V_D$$

ダイオードの特性

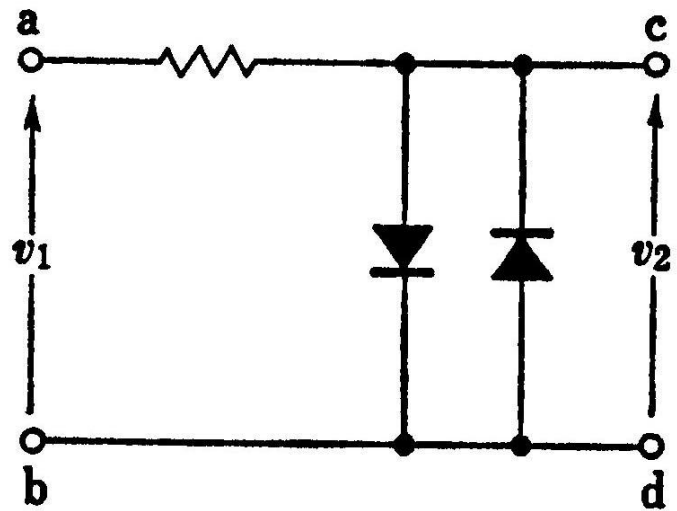
if $V_D \geq 0.7$, ON
($V_D = 0.7, I_D > 0$)
If $V_D < 0.7$, OFF
($V_D < 0, I_D = 0$)

$E-I_D$ 特性

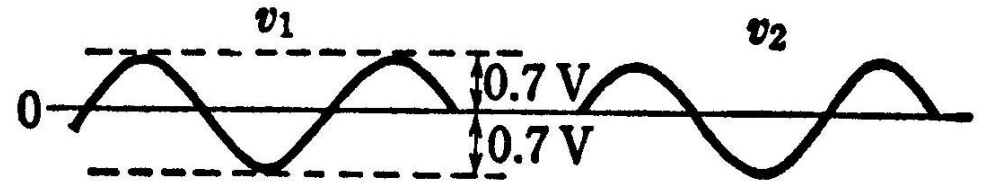
$$I_D = \frac{1}{R} (E - 0.7)$$



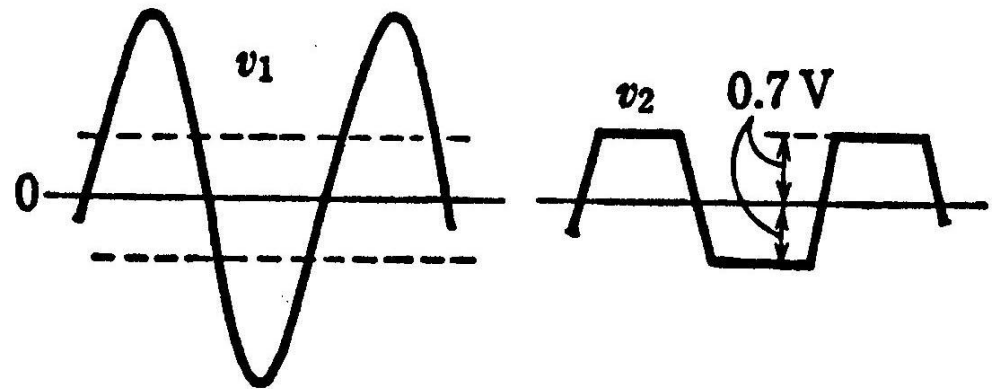
ダイオードを利用した回路例 リミッタ回路



(a) 回路



(b) v_1 が小さい場合

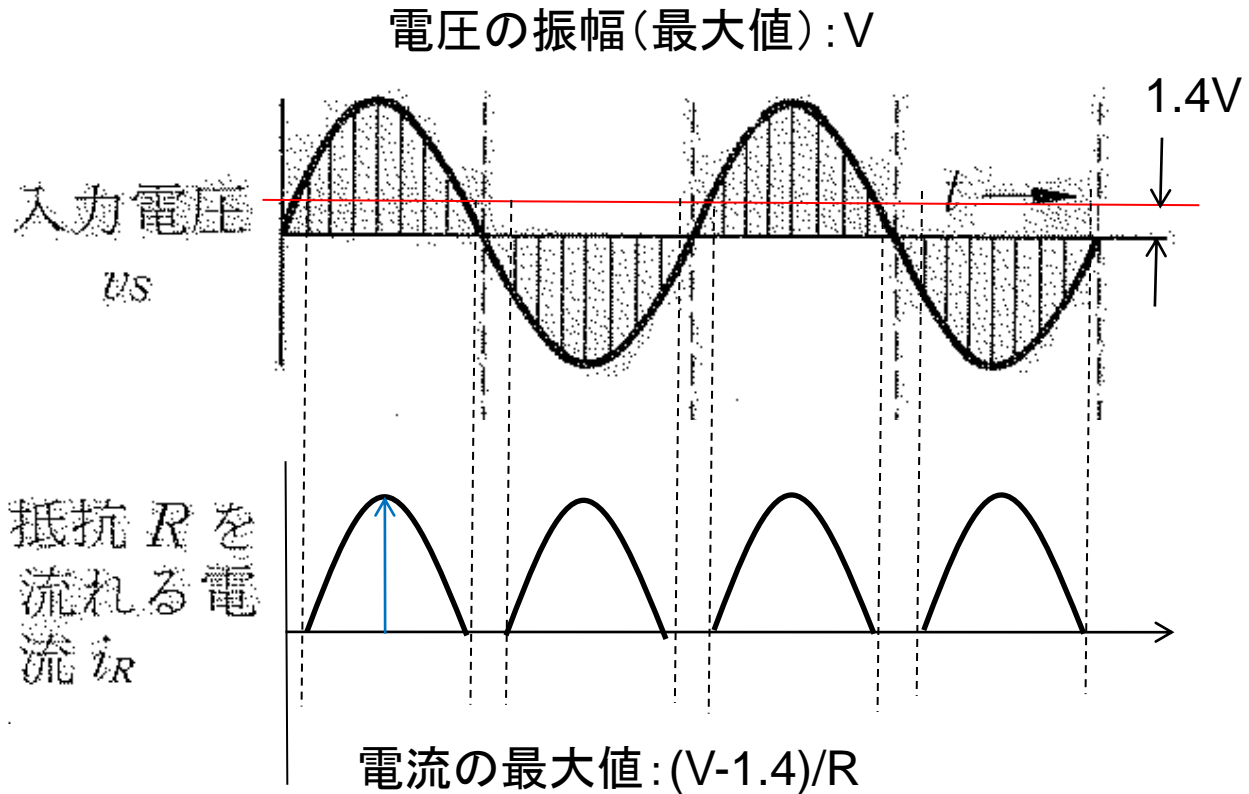
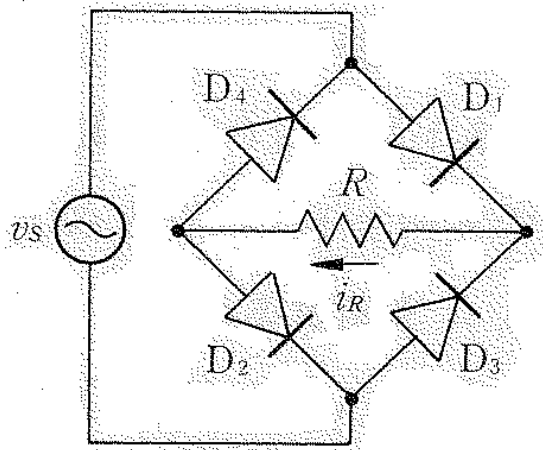


(c) v_1 が大きい場合

図 1・11 リミッタ (II)

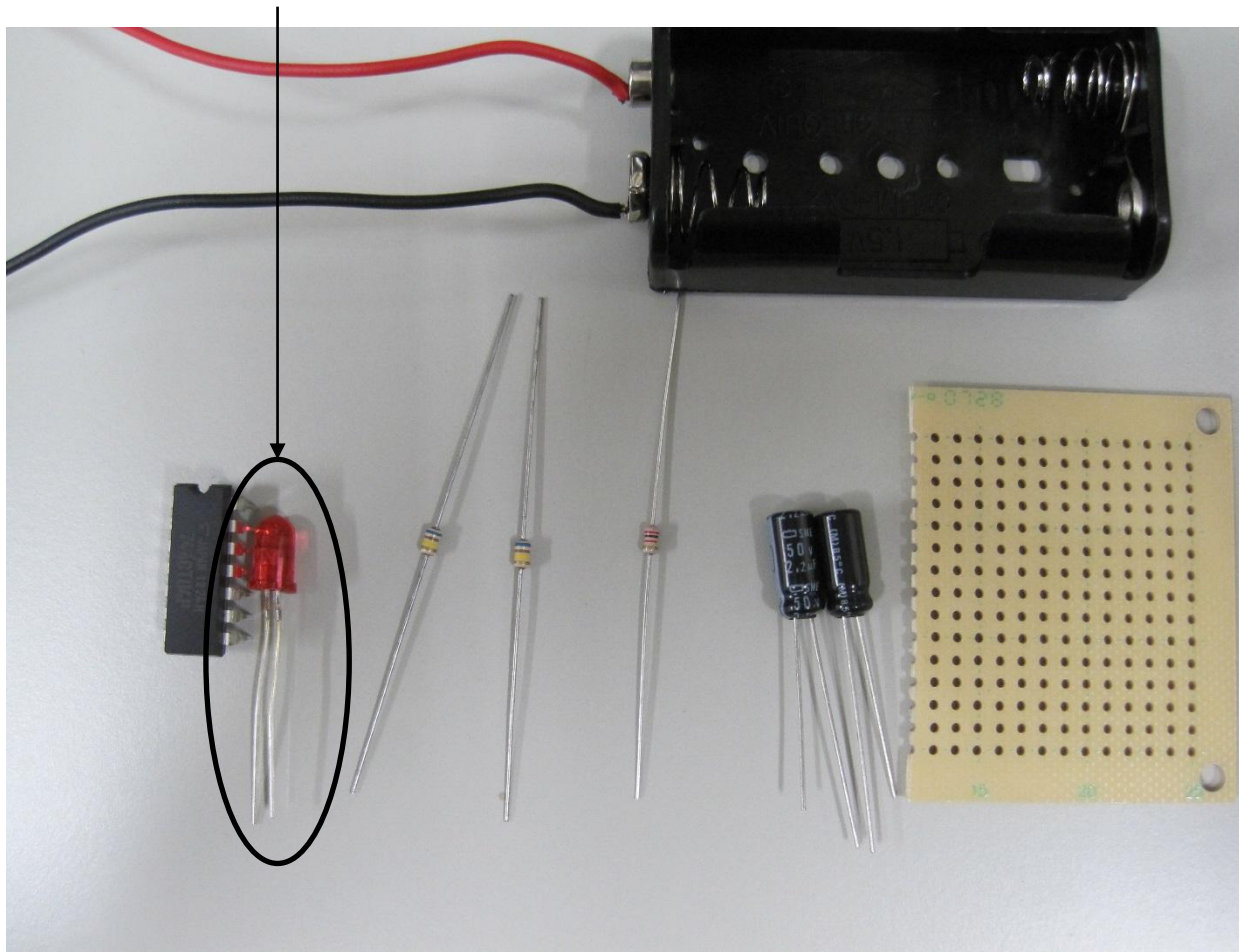
ダイオードを利用した回路例

整流回路



身の回りのダイオード

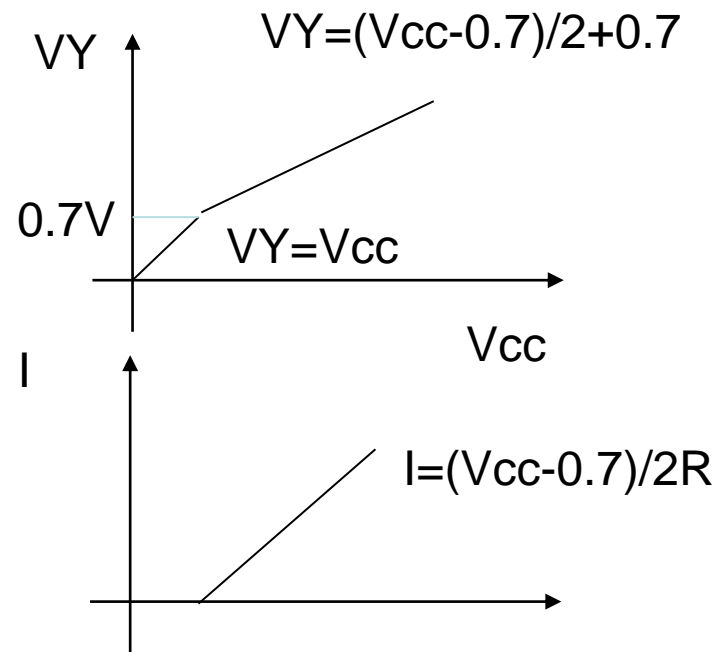
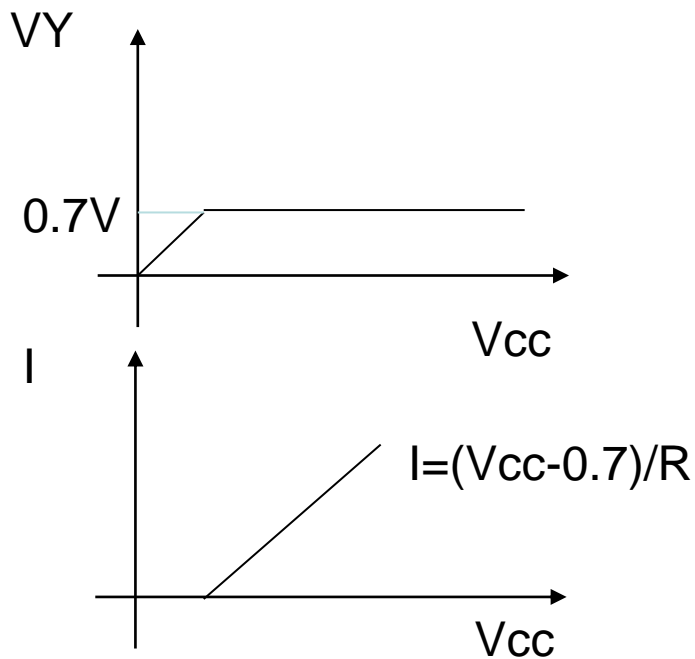
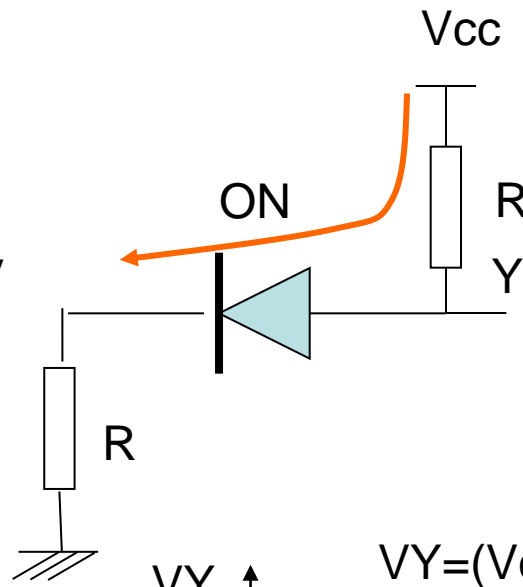
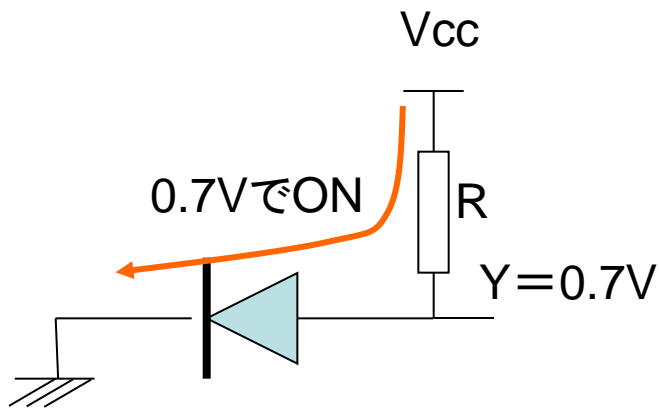
- LED(Light Emitting Diode:発光ダイオード)



発光ダイオード

- 順方向電流を流すことで発光
- 通常のダイオードよりON電圧が高い
2.1V–3.5V
- 赤が一番簡単で安い、黄、緑、青の順に難しくなり、高くなる
- 中村修二さんによる高輝度青色発光ダイオードの発明の話は有名だよ！知っておこう
- 発光ダイオードを明るく光らせるためにはどうすればよいか？
- 発光ダイオードを直接電源につないだらどうなるか？

電流が流れれば0.7V低下する



問題:

R , ダイオードに流れる電流 I と、直流電源電圧 E の関係をグラフにきなさい。図ではダイオードが2つだが、ダイオードが1つの場合と2つの場合について答えなさい。ただし、閾値電圧 $0.7V$ の近似ダイオードとする。

R

