

電気電子回路

第4回：ダイオード

今週の目標

- ダイオードの仕組みと動作原理を少し詳しく理解する
- ダイオードの電圧-電流特性 $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ を理解する(教科書の式(5.25))
 - 教科書の4章から5.2節までの内容に対応しますが、細かい数式よりは定性的な理解を優先します

ダイオードを学ぶ目的

- 実用的に重要な素子
 - 整流回路: 交流電源から直流を取り出す
 - 検波回路: AMラジオの高周波から音声信号を取り出す
 - 発光ダイオード(LED)、太陽電池、等
- 最も単純な半導体素子
 - より複雑な素子(バイポーラトランジスタ、電界効果トランジスタ等)を学ぶ基礎となる

ダイオード(diode)の概要

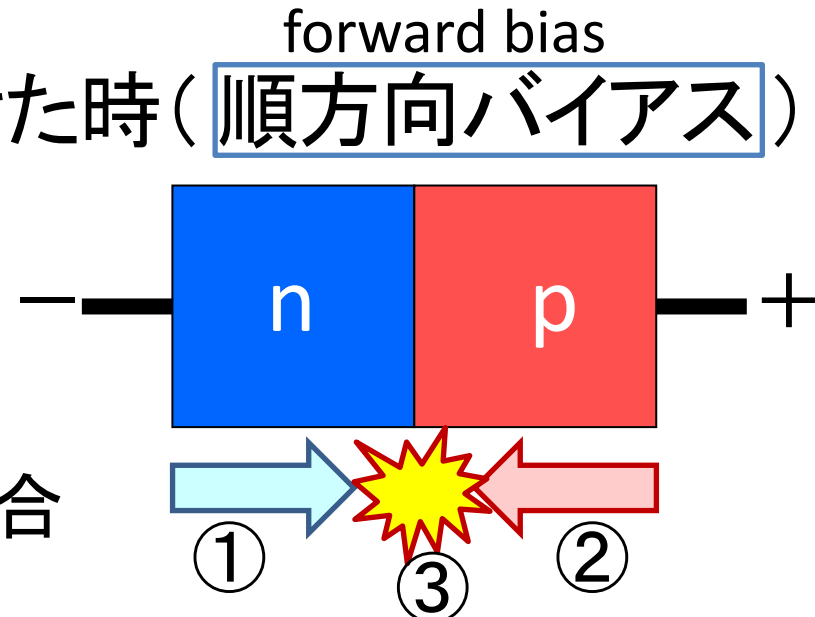
- n型領域とp型領域が隣接した半導体の結晶(ダイオード)があった場合
 - p→n方向(順方向)には電流が流れる
 - n→p方向(逆方向)には電流は流れない
 - これをダイオードの整流作用という
 - n型領域に高電圧、p型領域に低電圧をかけると、n型領域の電子(電荷はマイナス)は高電圧に、p型領域のホール(電荷はプラス)は低電圧に引き寄せられるので、領域の境界付近にキャリアが存在しなくなるためです

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**)

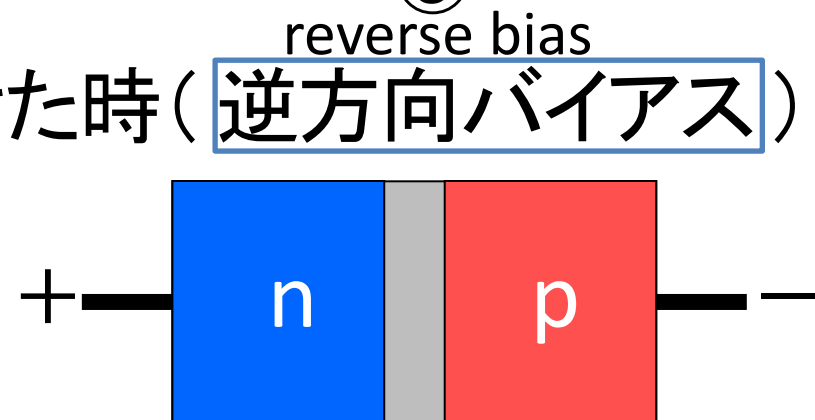
⇒ 電流が流れる

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



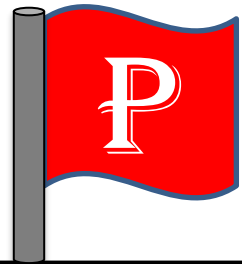
n型に＋、p型に－の電圧をかけた時(**逆方向バイアス**)

⇒ 電流が流れない



空乏層

p型半導体とn型半導体

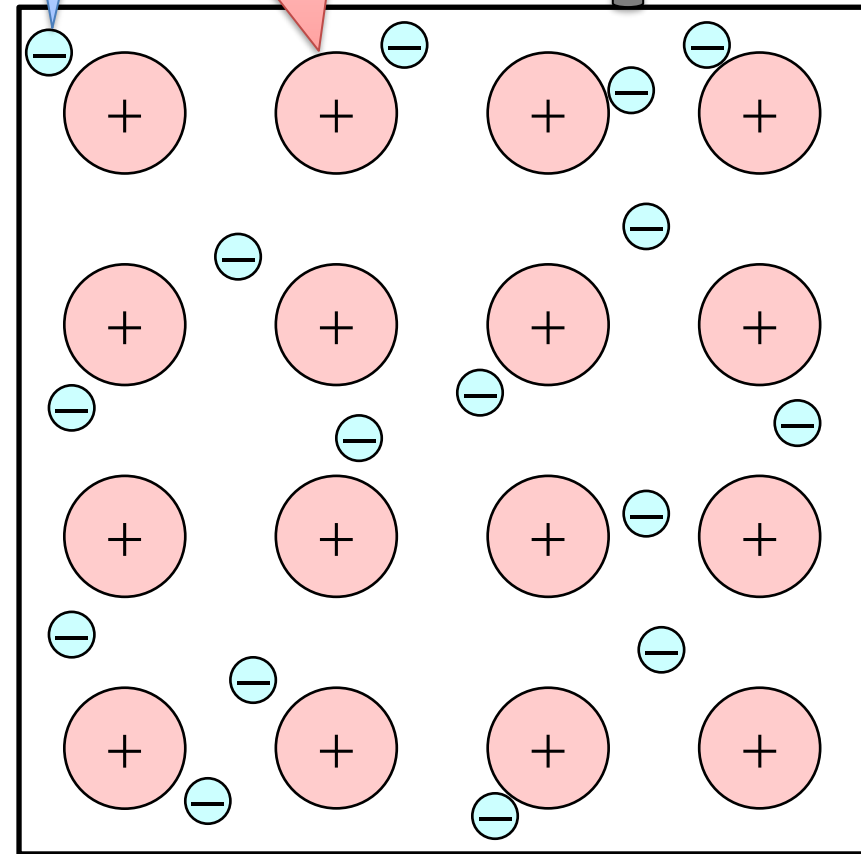
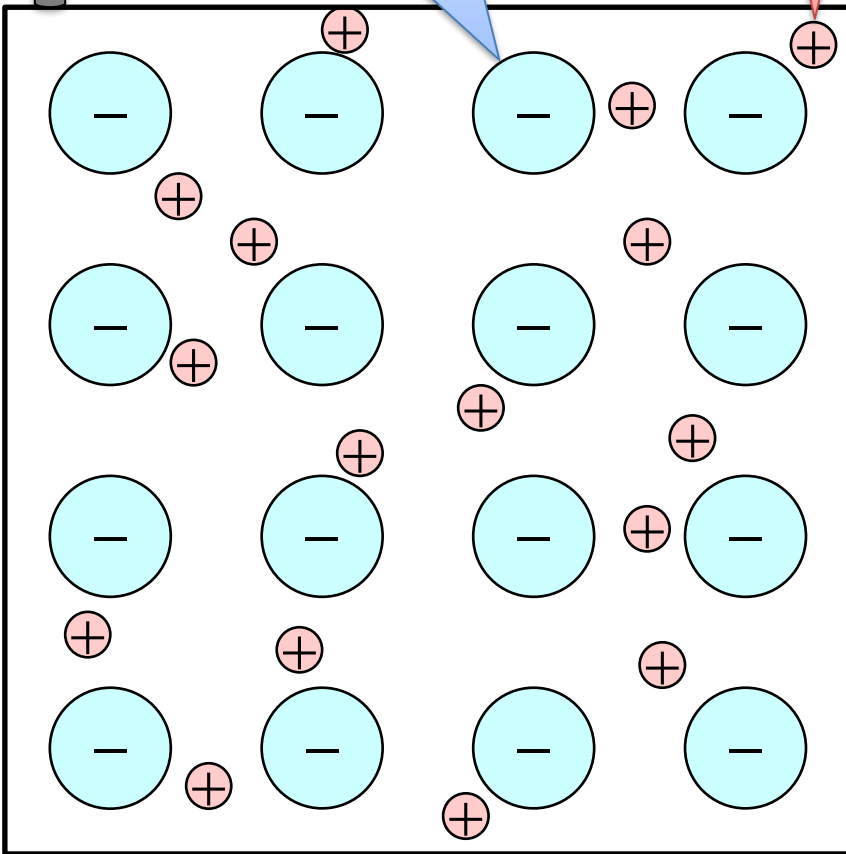
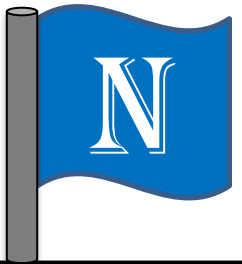


アクセプタ
のイオン

正
孔

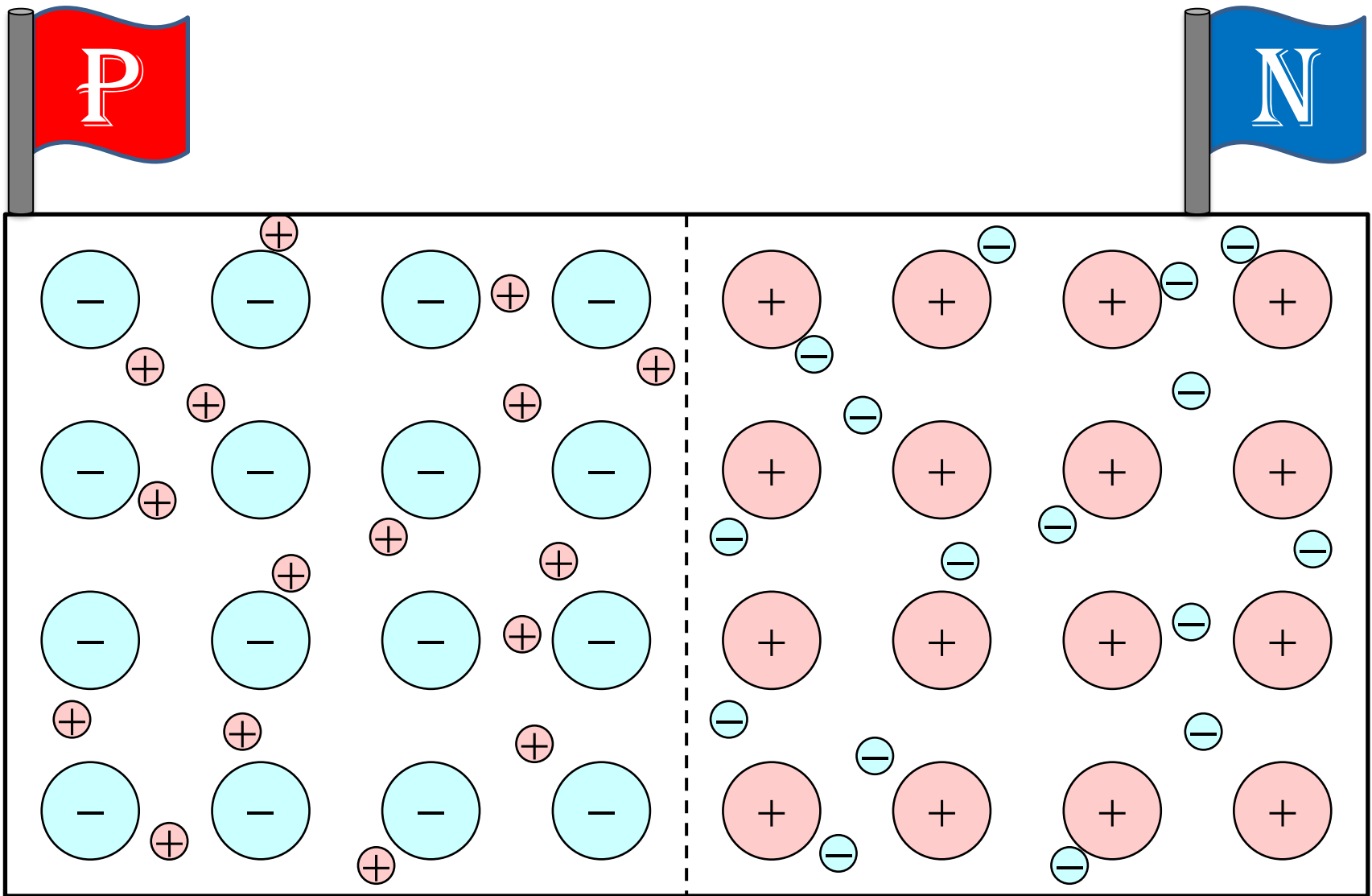
電
子

ドナー
のイオン

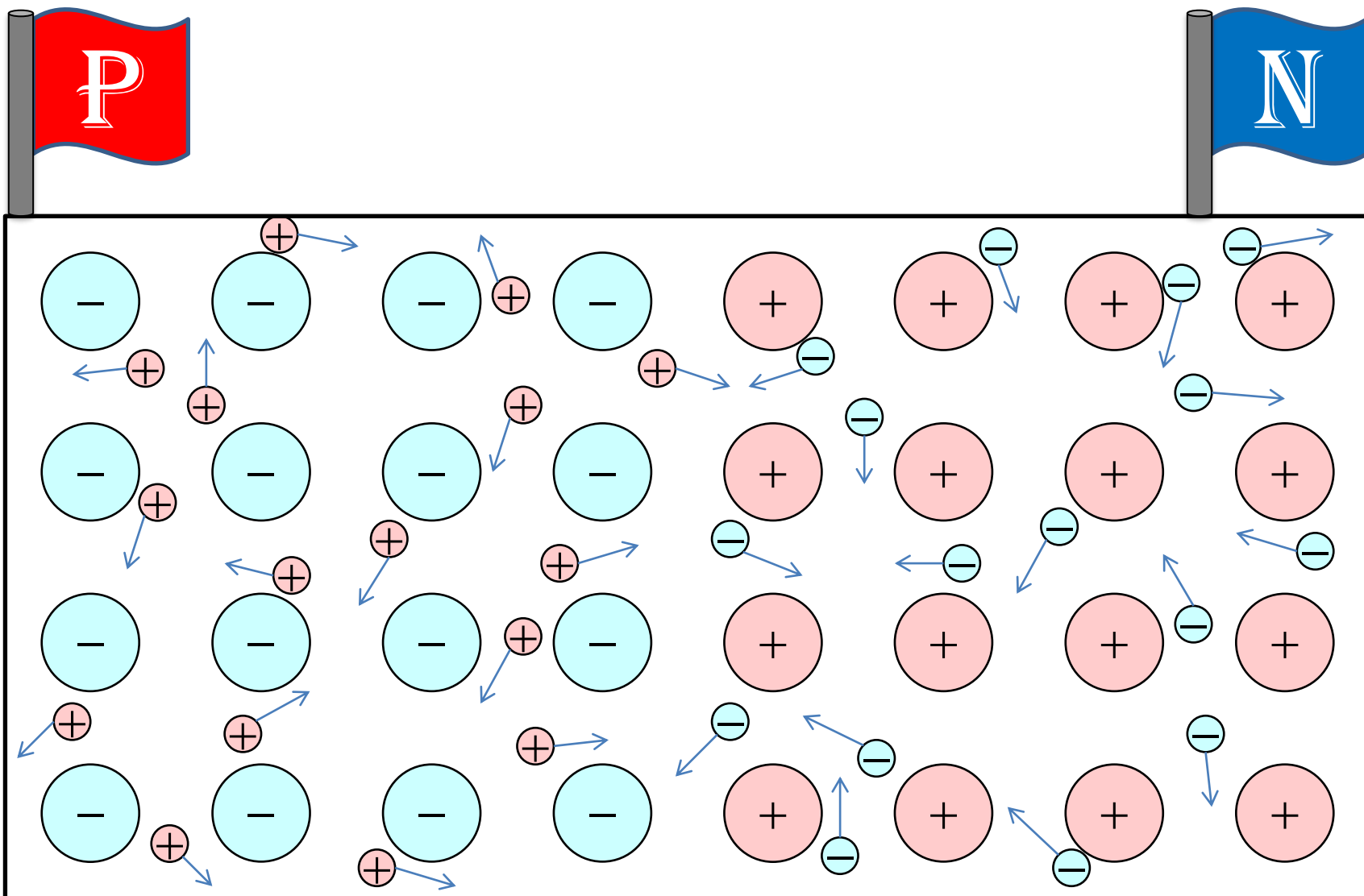


(図を簡潔にするため、シリコン原子は省略している)

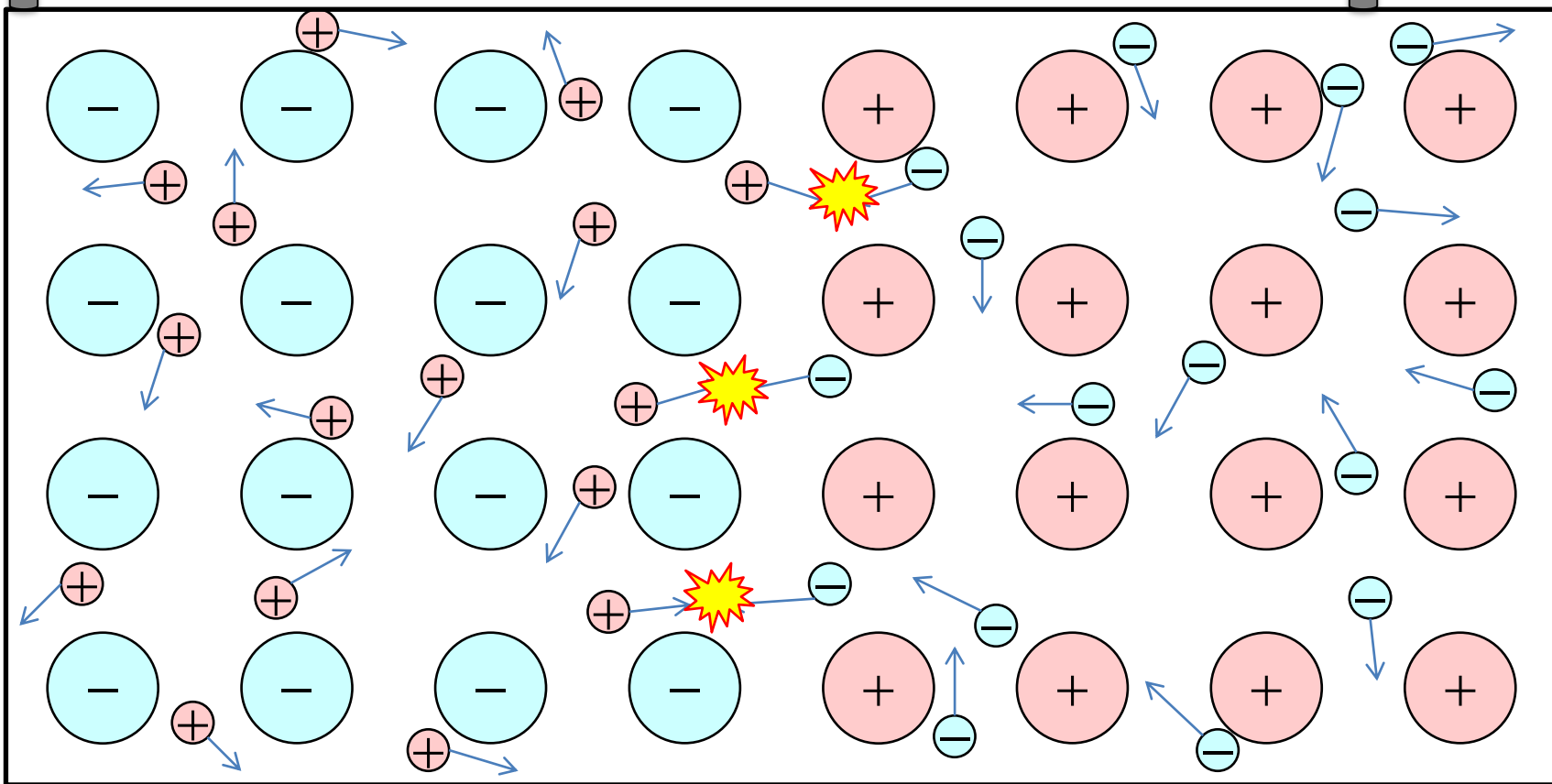
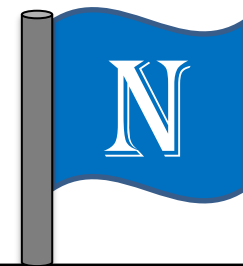
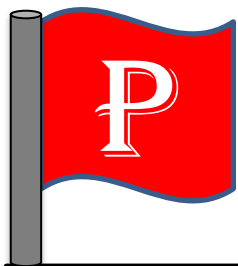
p型半導体とn型半導体を接合させる



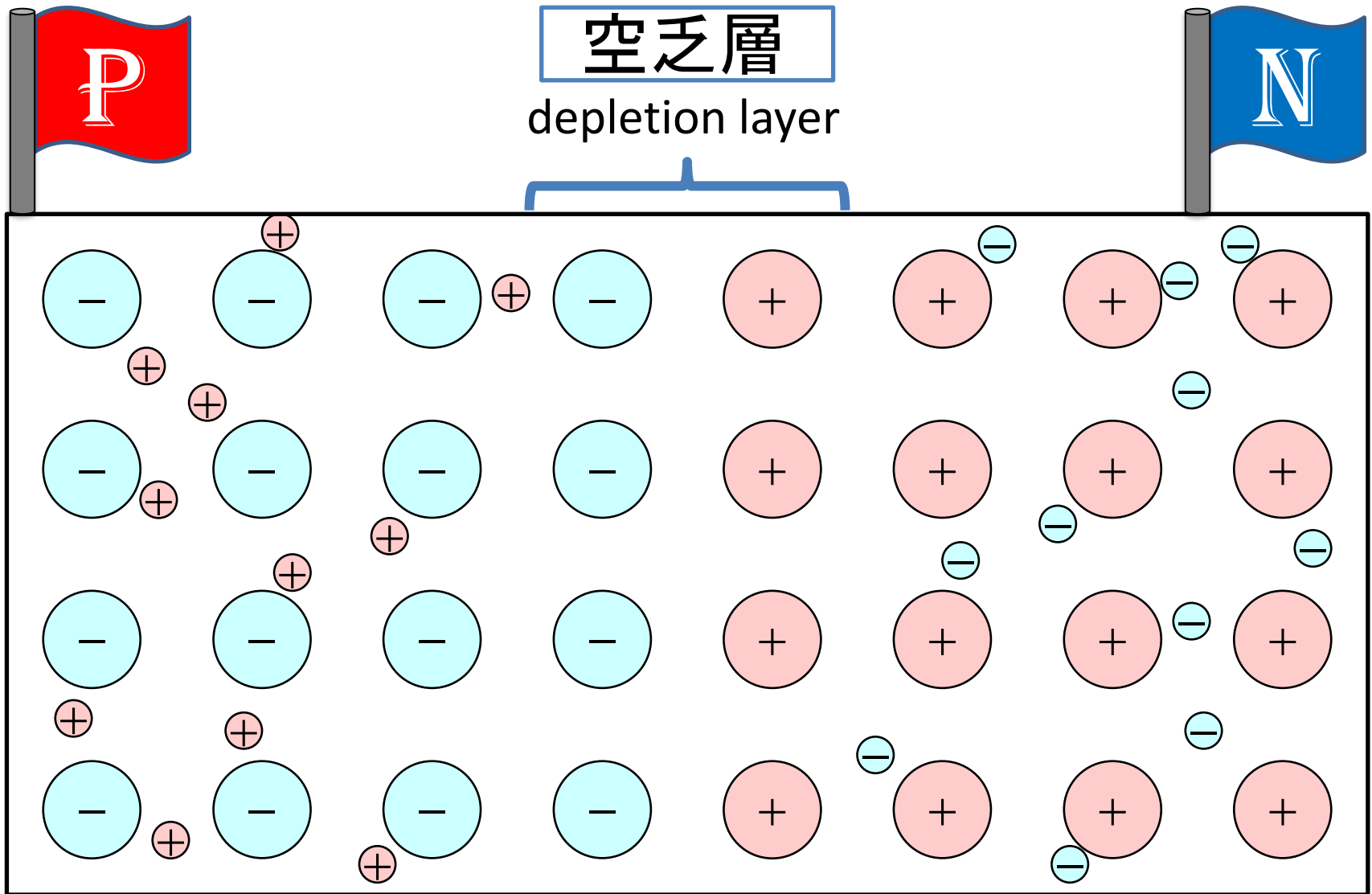
電子と正孔は **拡散** している



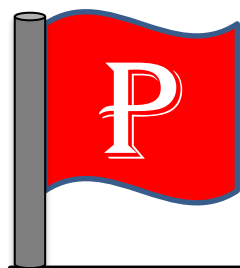
ある確率で **再結合** (recombine)



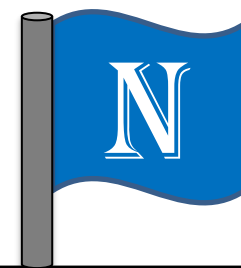
接合面付近は電子も正孔も少なくなる



p型は **負** に、n型は **正** に帯電



正孔と電子の再結合がある程度進むと、電界が発生する



正孔がp型領域から出にくくなる

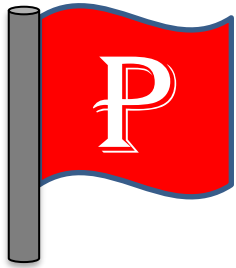
電子がn型領域から出にくくなる

拡散のエネルギーと電界がつりあった定常状態になる

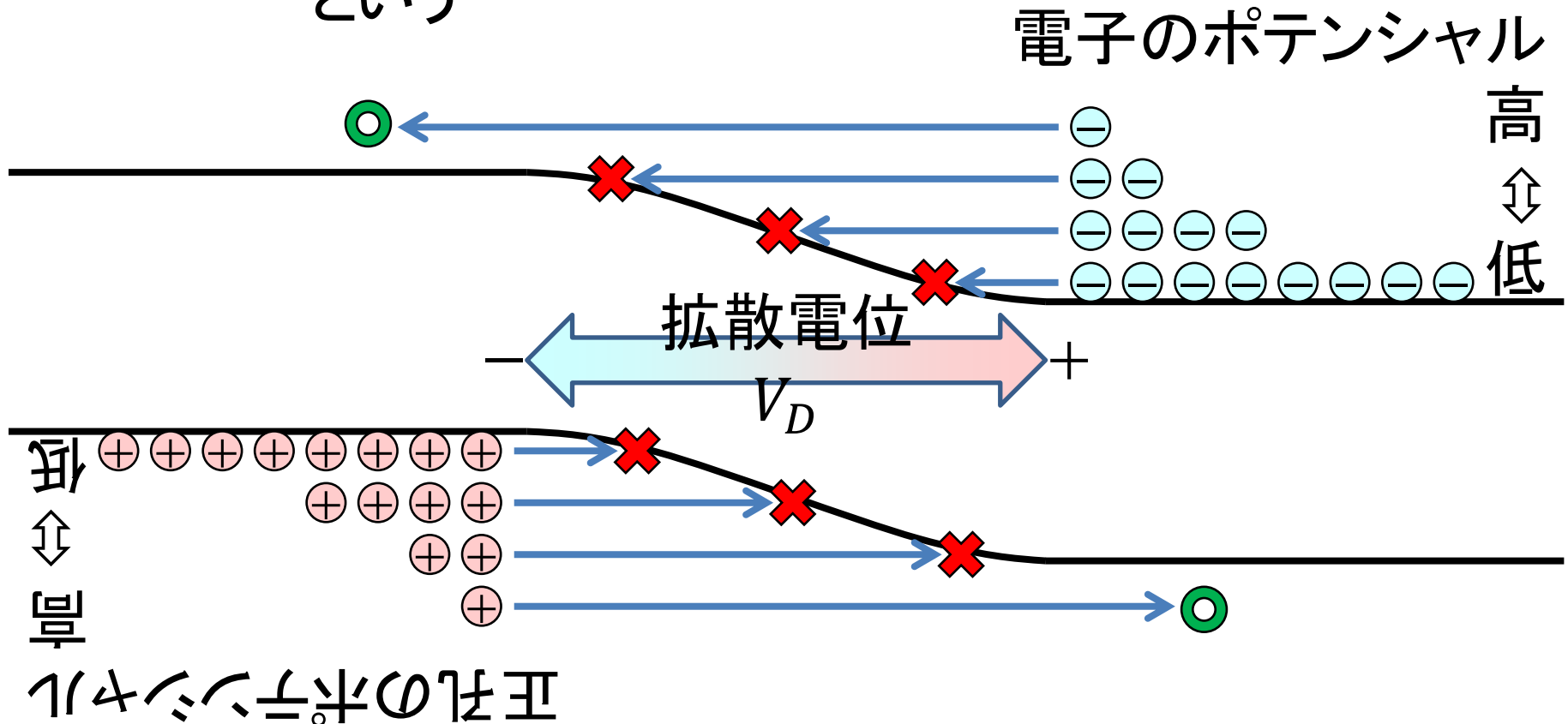
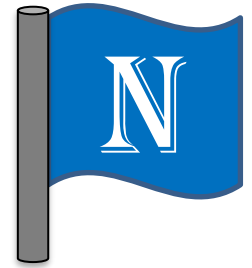
負イオン数 > 正孔数

正イオン数 > 電子数

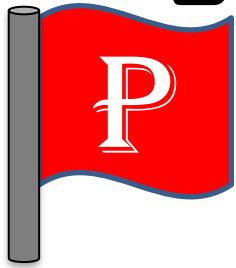
pn接合のエネルギー準位



- エネルギーが高いごく一部の電子や正孔を除き、pn接合面を越えられない
- 接合面に生じた電位差 V_D を**拡散電位**という



外部から $n \rightarrow p$ 方向の電界を加えると 電子や電界の拡散が抑制される

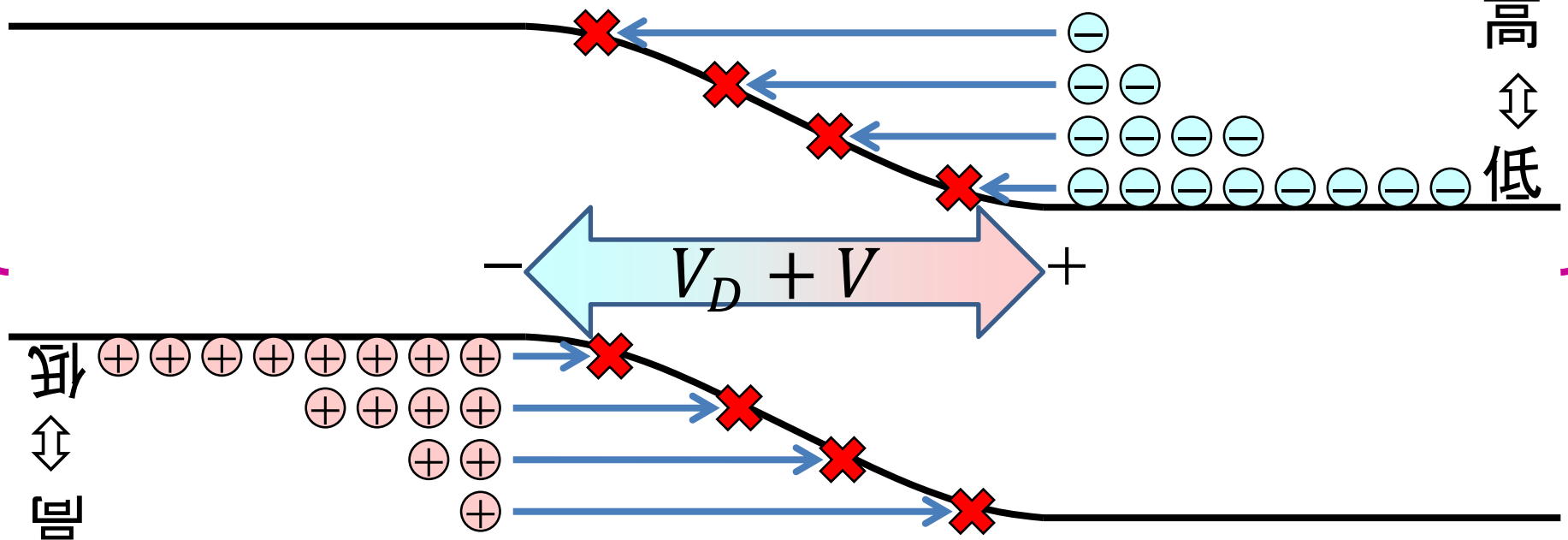


逆バイアス V

- +

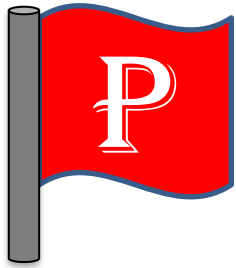
電子のポテンシャル

高
⇕
低

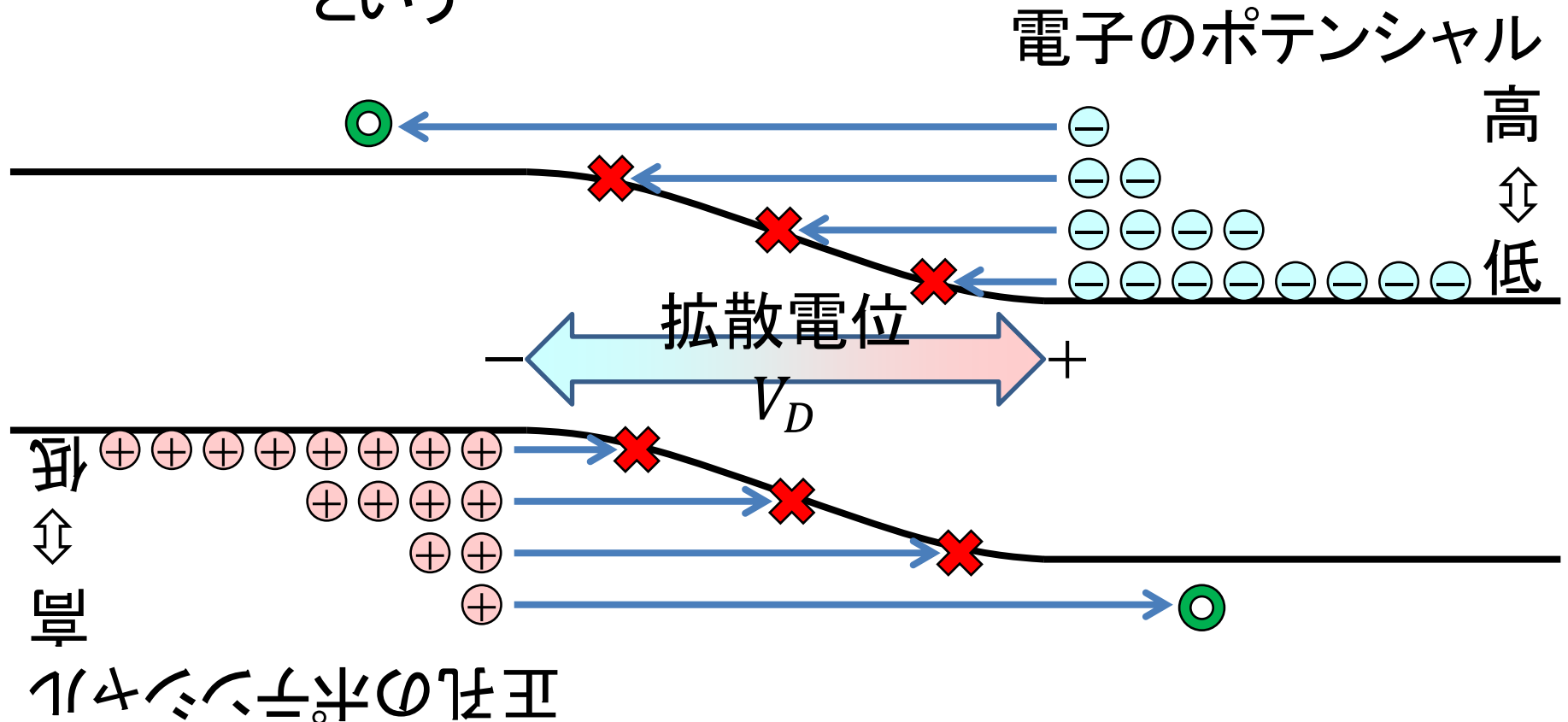
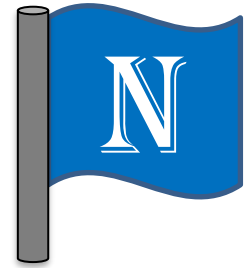


正孔のポテンシャル

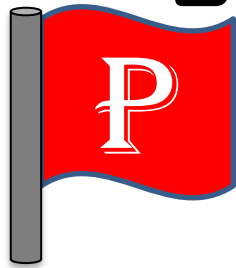
pn接合のエネルギー準位



- エネルギーが高いごく一部の電子や正孔を除き、pn接合面を越えられない
- 接合面に生じた電位差 V_D を **拡散電位** という



外部からp→n方向の電界を加えると 電子や電界の拡散が促進される



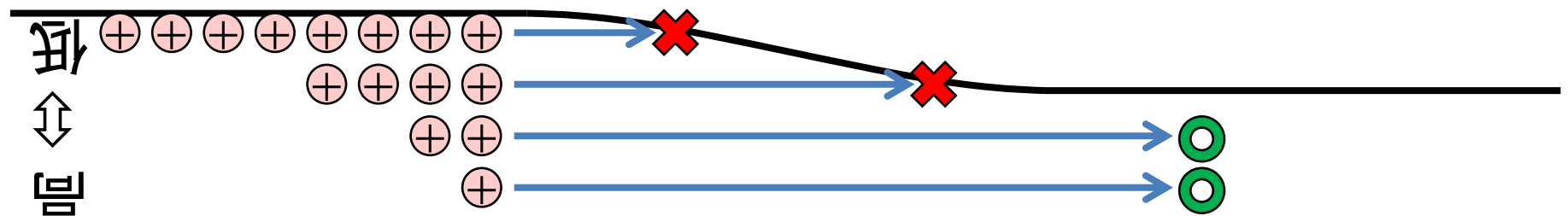
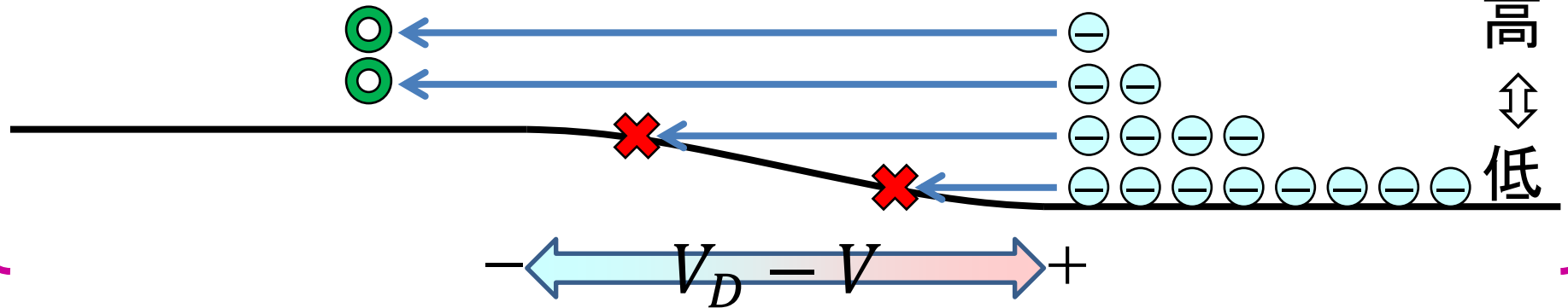
pn接合面を越えられる電子や正孔の
数が多くなる⇒電流が流れやすくなる



順バイアス $V > 0$ + | -

電子のポテンシャル

高
⇕
低

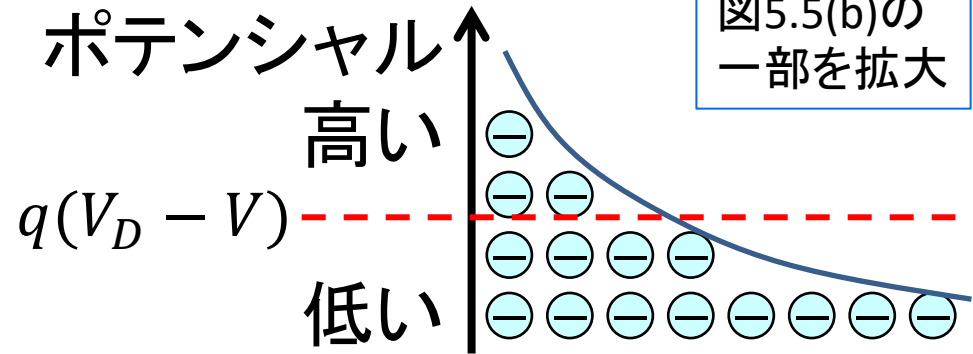


正孔のポテンシャル

電子や正孔のポテンシャルの分布

教科書の
図5.5(b)の
一部を拡大

- ポテンシャルが高く、pn接合面を越えやすい電子や電荷の数は少ない
- ヒストグラムは指数関数になる
- ポテンシャルが $q(V_D - V)$ より高い電子の数は $e^{\frac{q}{kt}V}$ に比例する (教科書の式(5.15))
 - q は 電子の電荷 ($1.60 \times 10^{-19}[\text{C}]$)
 - k は ボルツマン定数 ($1.38 \times 10^{-23}[\text{J/K}]$)
 - t は 絶対温度



ダイオードの電圧-電流特性(静特性)

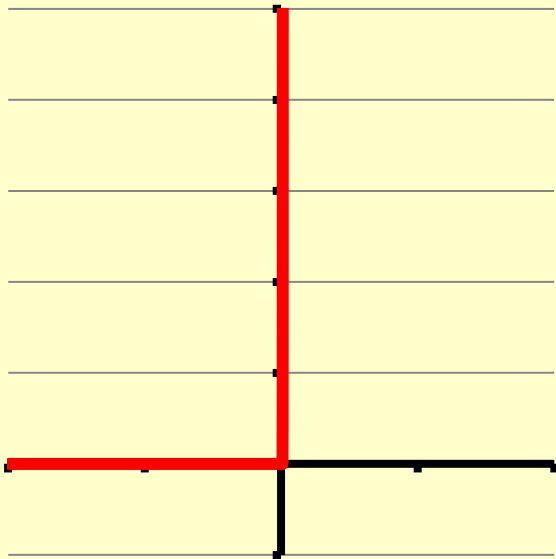
(current-voltage characteristic (DC characteristic))

- ダイオードの電圧-電流特性は $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ (教科書の式(5.25))
 - おおむね $e^{\frac{q}{kT}V}$ に比例する(前のスライドを参照)
 - -1 が付いているので、 $V = 0$ の時に $I = 0$ になる
 - 全体の比例係数 I_s は **飽和電流** と言われる($V = -\infty$ の時に流れる電流の大きさ)
 - 熱温度 $V_T = \frac{kT}{q}$ を使うと、上の式は $I = I_s(e^{\frac{V}{V_T}} - 1)$ と書ける
 - 絶対温度が 290[K] (つまり 17°C) のとき、 $V_T \approx 25[\text{mV}]$

クイズ(5)

- $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ を表す正しいグラフはどれか？

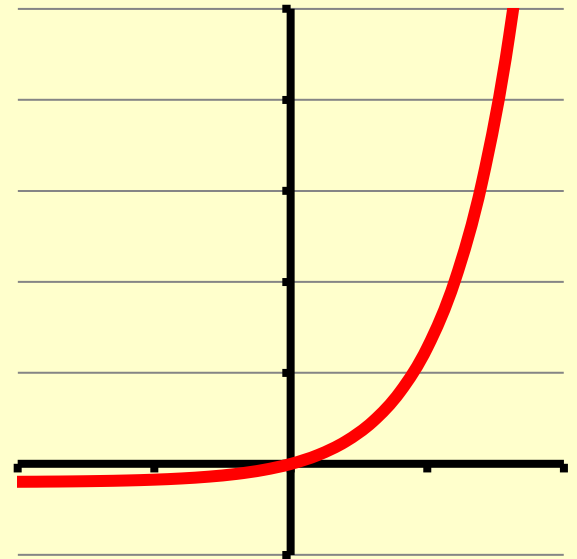
(1)



(2)

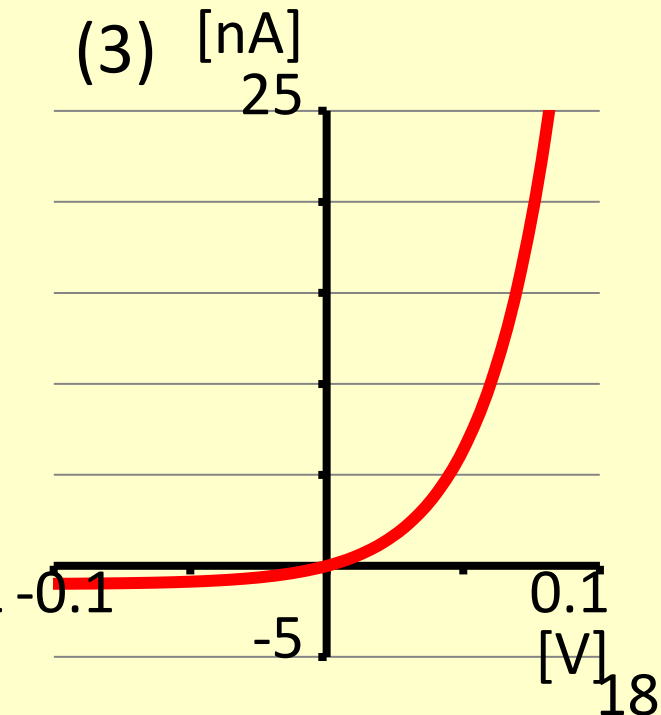
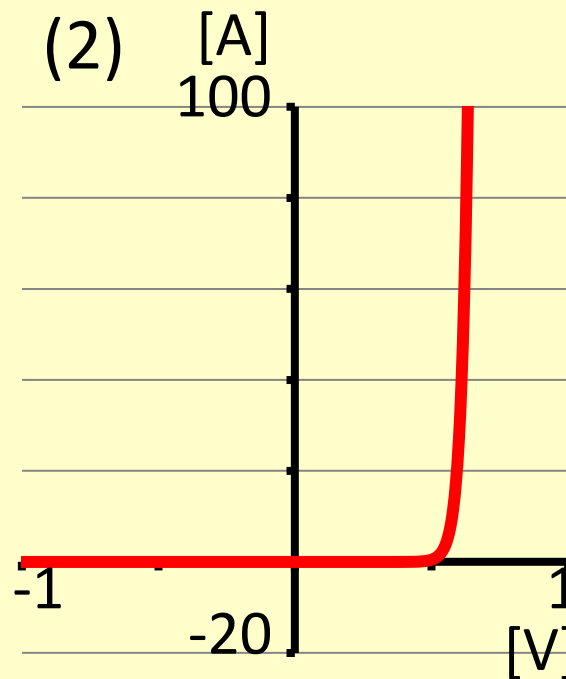
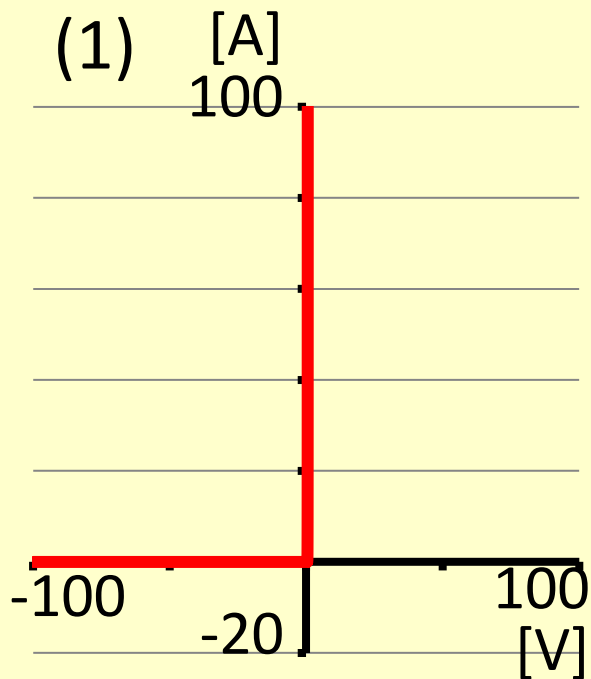


(3)



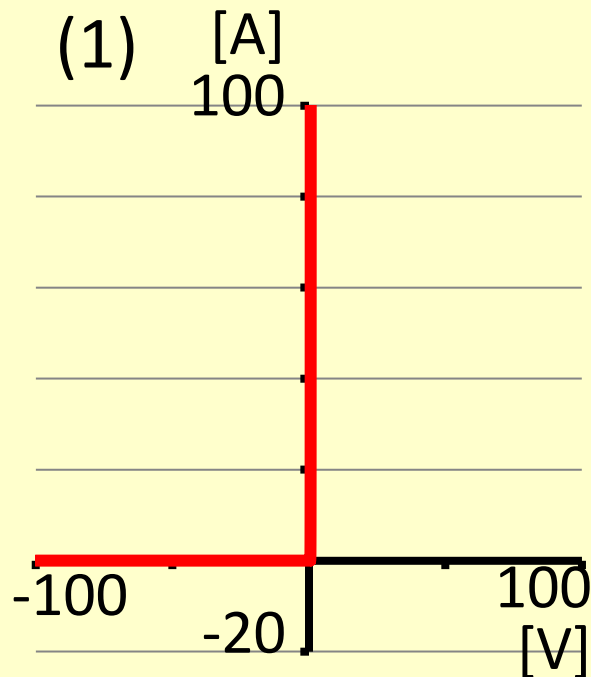
クイズ(5)の答え

- $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ を表す正しいグラフはどれか？
⇒どれも正解



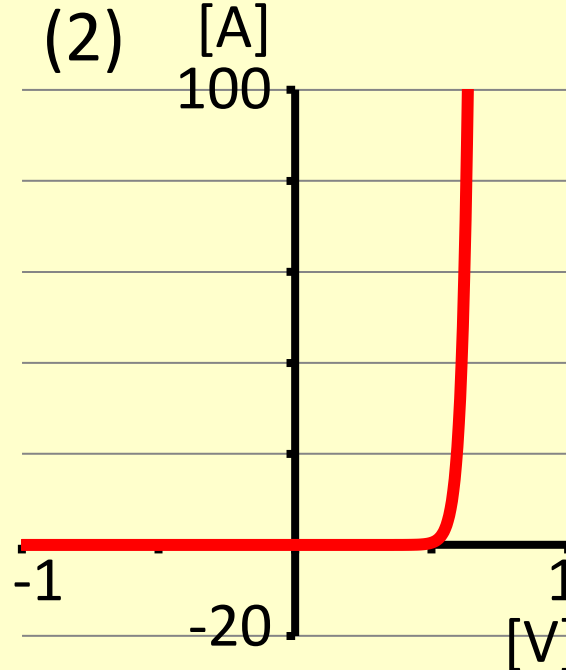
大雑把なダイオードの特性

- 10V以上の電圧を扱う回路では、この程度でOK
 - 順方向にはものすごくよく電流を流す
 - 逆方向にはほとんど電流を流さない



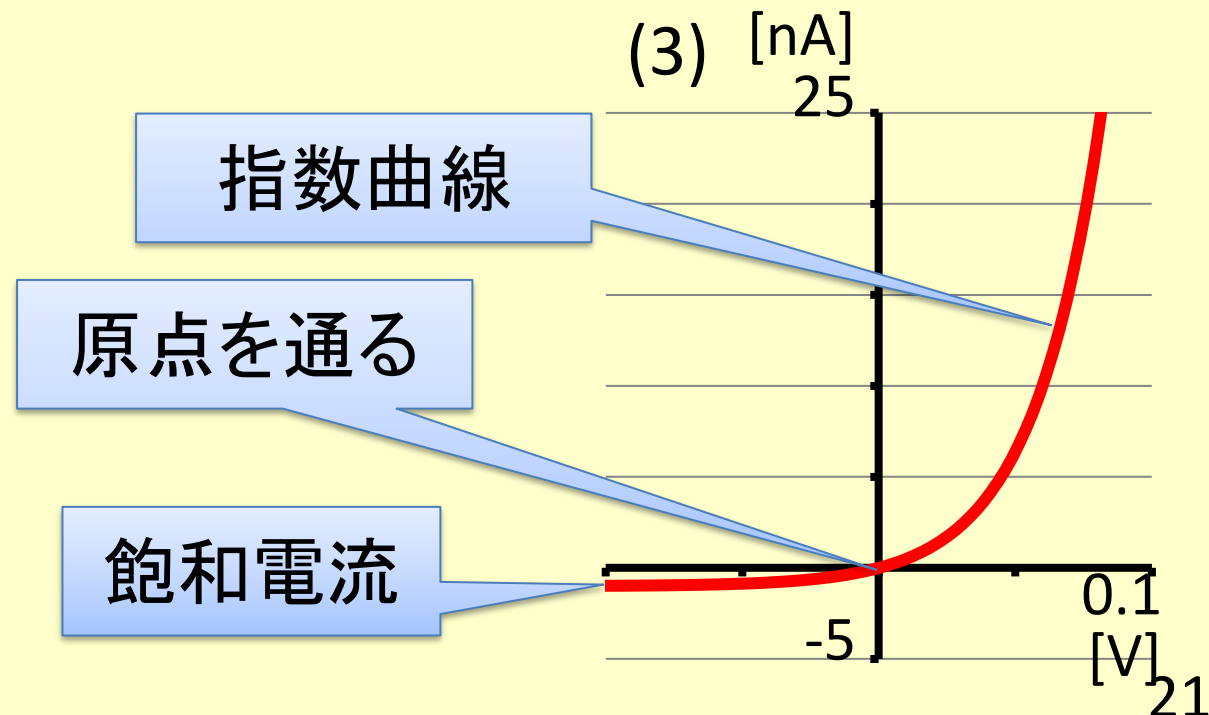
少し詳しいダイオードの特性

- 普通の回路設計ではこのモデルが役立つ
 - 順方向電圧が $0.6 \sim 0.7\text{V}$ 以上の時は、ものすごくよく電流を流す
 - 順方向電圧がそれ以下の時や、逆方向電圧の時は、ほとんど電流を流さない



かなり詳しいダイオードの特性

- 精度が要求される設計では、このモデルで考える
 - 電圧-電流特性は $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ である
 - 原点を通るよう、指数関数を下に平行移動したもの
 - 飽和電流 I_s は 1pA~1nA 程度(極めて小さい)

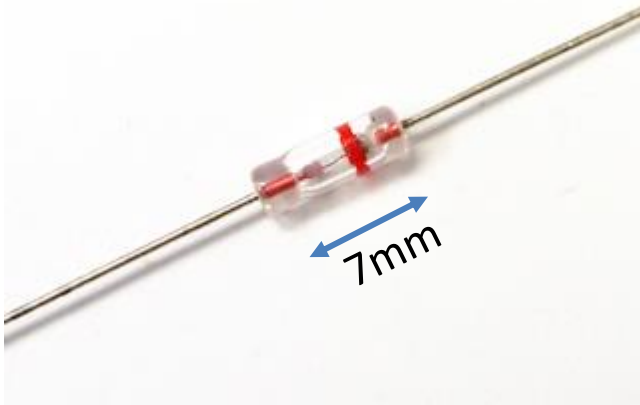


ダイオードの温度特性

- ダイオードの電圧-電流特性は $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$
- 温度 T が高くなると、電流は **増加** する
 - 半導体単体は、温度が高いほど電子や正孔の数が増えて電流が **流れやすくなる** (1°C につき15%増)
 - しかし、ダイオードは温度が高くなって電子や正孔の拡散が活発になると再結合する電子や正孔の数が増え、結果として拡散電位 V_D が大きくなってしまふから、電流が **流れにくくなる?**
- 前者の効果は、 0°C と 80°C で $15\% \times 80^\circ\text{C} = 12\text{倍}$
- 後者の効果は、 0°C (273K)と 80°C (353K)で 約3.6倍
- よって温度が高いほど電流は **増加** する
 - この違いは次週以降に扱うバイポーラトランジスタで考慮が必要

ダイオードの実物

(1) ゲルマニウム ダイオード

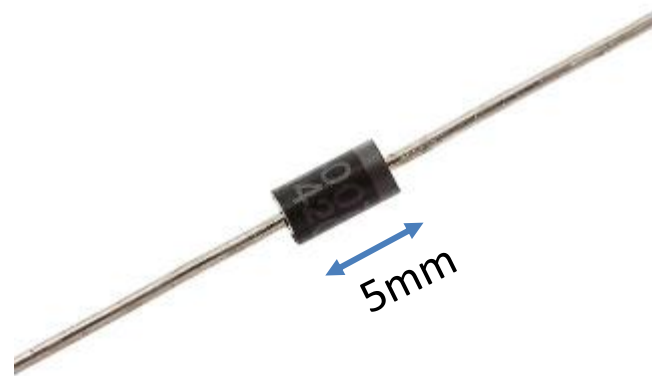


- 半導体としてシリコンではなくゲルマニウムを使っている
- シリコンダイオードよりは拡散電位が小さい(0.4 V程度)ので、微弱な電気信号の扱いに向いている
- AMラジオの高周波信号を音声信号に変換する検波回路で使われる
- 熱に弱い(75°Cでダメになる)

ダイオードの実物

(2) シリコン ダイオード

- シリコンを使ったダイオード
- ゲルマニウムダイオードよりは熱に強いので、大電流を流す用途に適する
- 交流電源を直流に変換する整流回路で使われる
- 拡散電位が大き目 ($0.6 \sim 0.7$ V) なので、小電圧を扱う場合はロスが大きい



ダイオードの実物

(3) その他

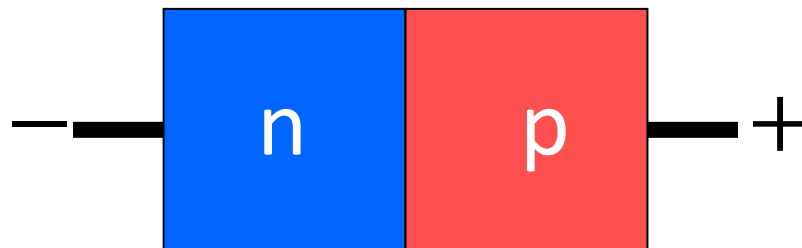
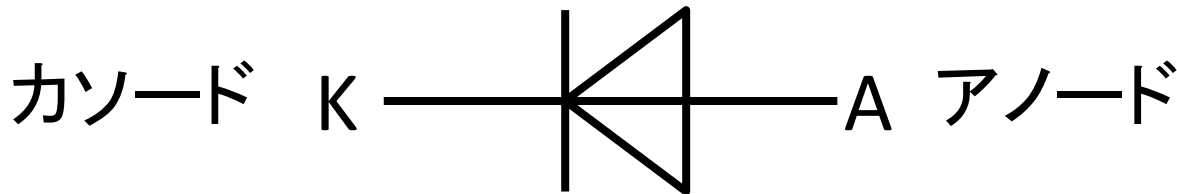


- 発光ダイオード(LED)
 - 電子と正孔が再結合するエネルギーを光で放出する
 - ガリウム系の素材のものが多い
 - 拡散電位が大きい(2V~)
- 太陽電池(solar cell)
 - 光エネルギーで電子が軌道を飛び出すことで生じた電子と正孔を電極から取り出す
 - Pが+極、Nが一極になる
 - 素材はシリコン等
- この他、フォトダイオード、可変容量ダイオード、ツェナーダイオード等がある

ダイオードの端子名と回路図記号

- P型半導体側の端子は **アノード** (anode, A)
- N型半導体側の端子は **カソード** (cathode, K)
- 回路図記号は下の通り

流れやすい ←
ほとんど流れない →

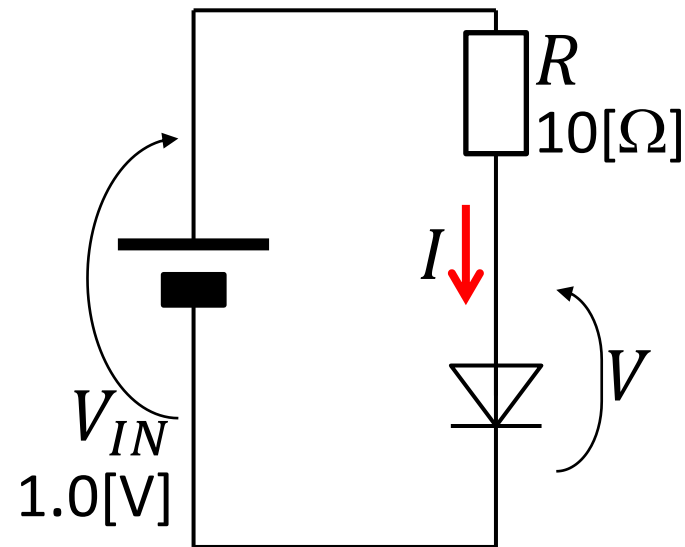


RD直列回路(教科書5.4節)

- 右の図の回路の電圧 V を求めるにはどうすればよいだろう
- 方程式を解く？

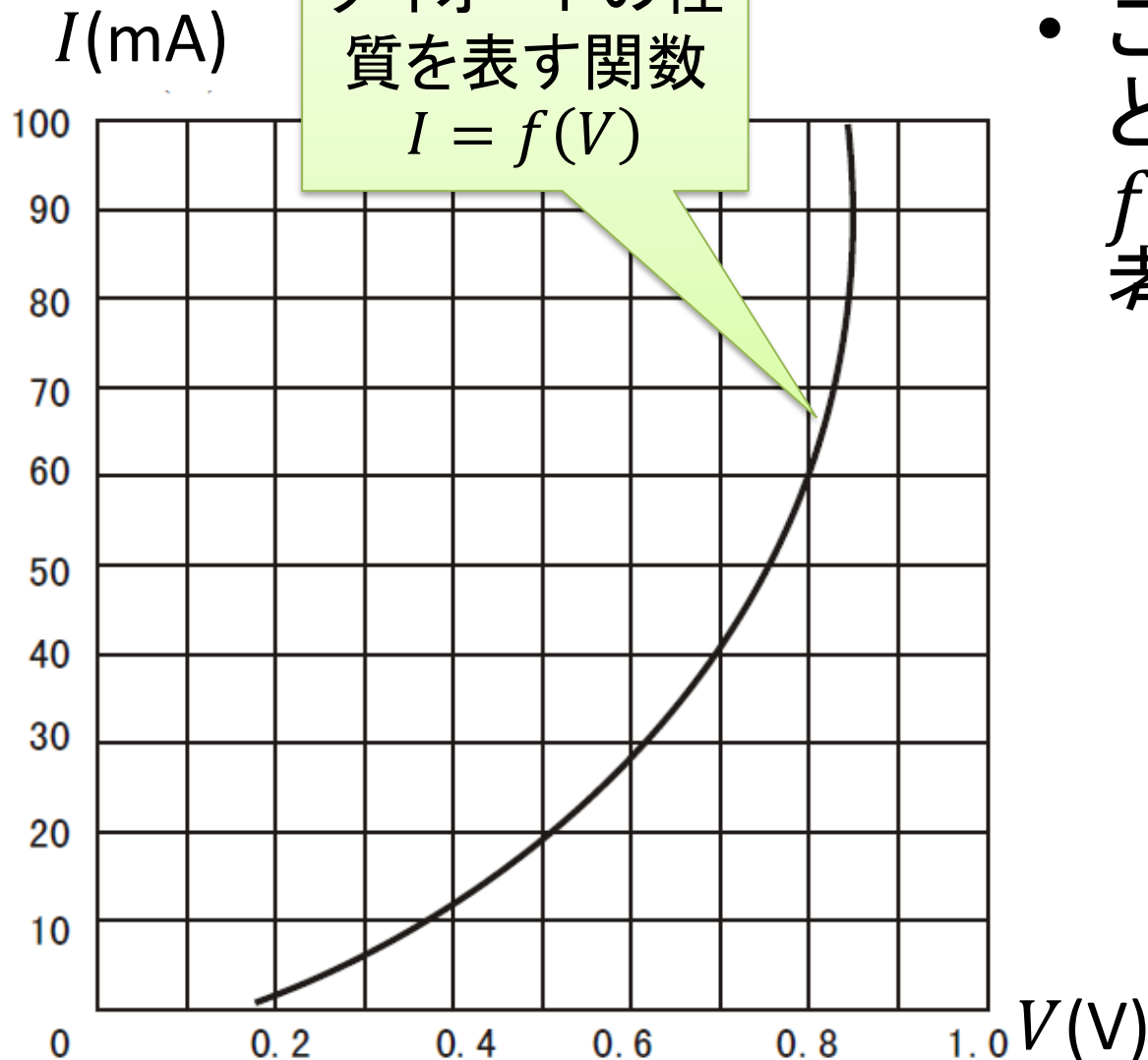
$$\begin{cases} V_{IN} &= IR + V \\ I &= I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1) \end{cases}$$

- 実際のダイオードの特性は理論式 $I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$ の通りにはならないので、実測した静特性のグラフで回路設計することが多い

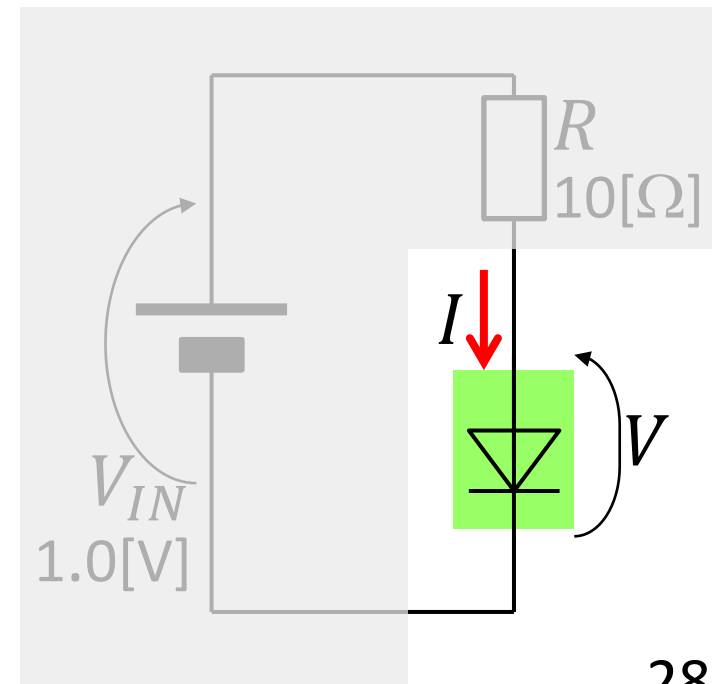


ゲルマニウムダイオード 1N60 の静特性

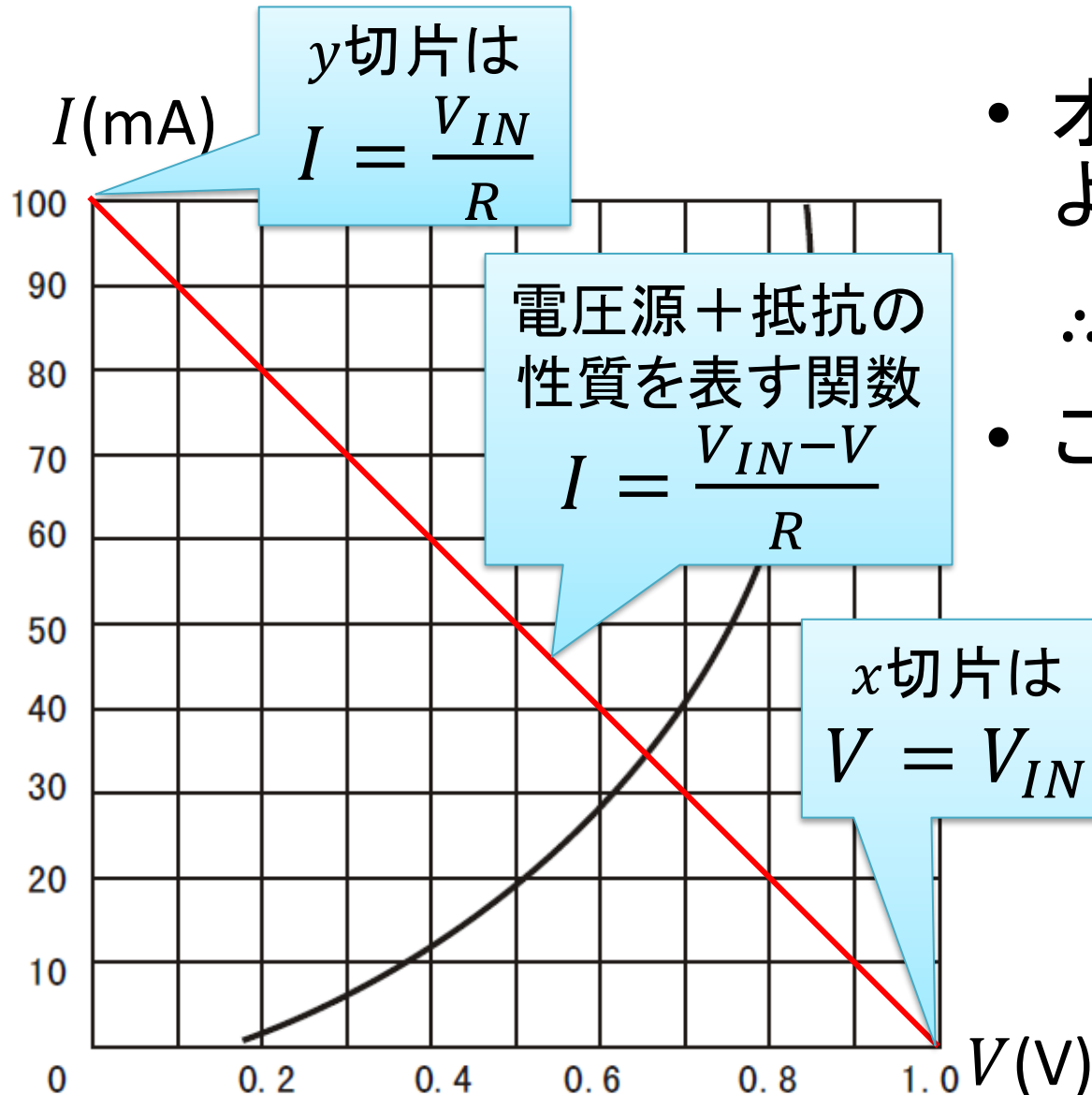
ダイオードの性質を表す関数
 $I = f(V)$



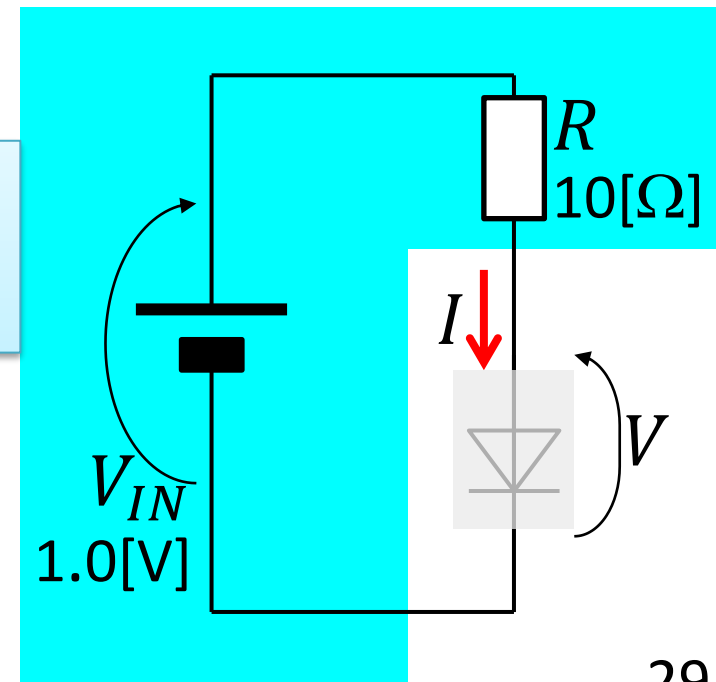
- このグラフが表す V と I の関係を $I = f(V)$ という関数だと考えることにする



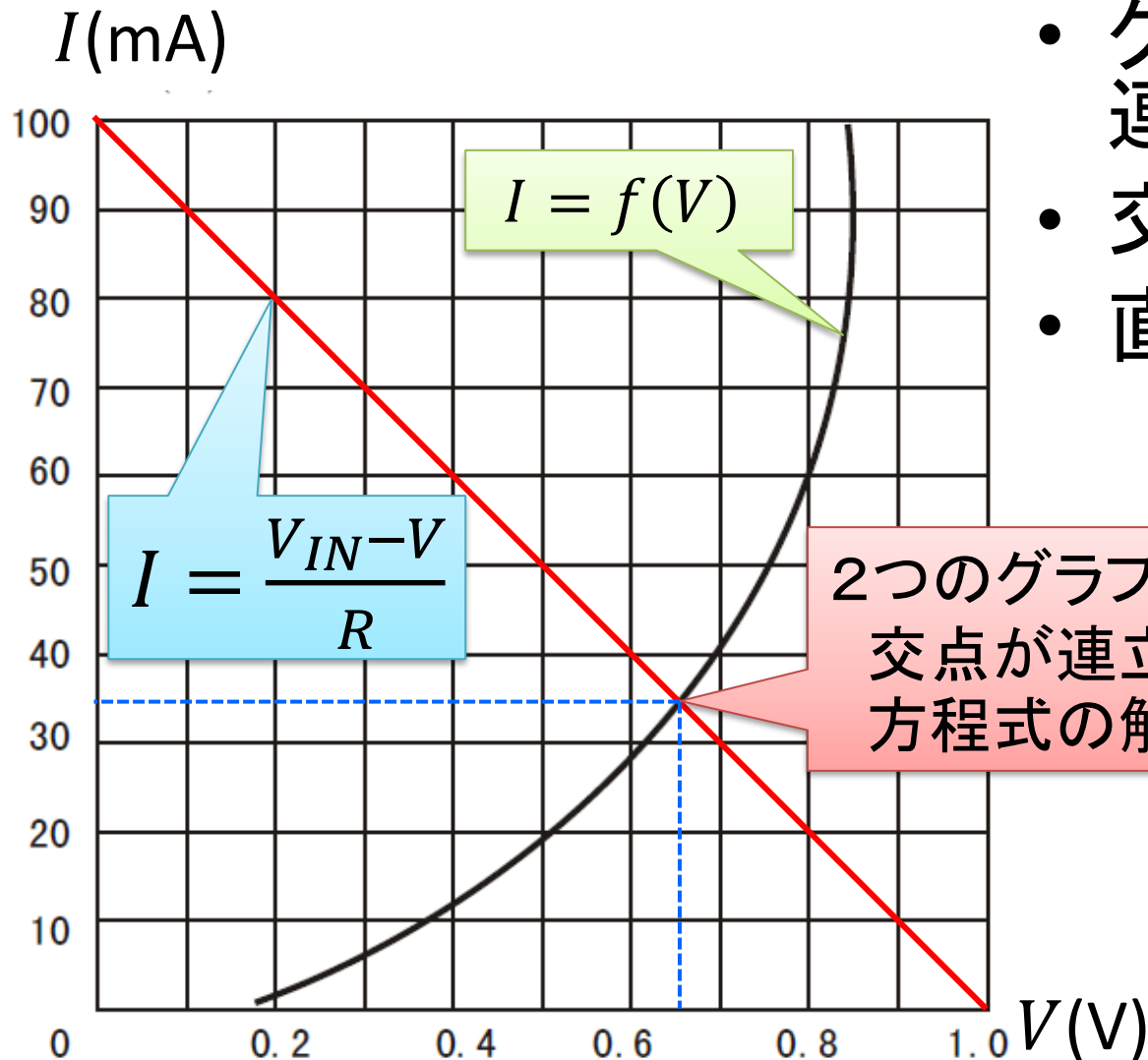
電圧源＋抵抗の性質



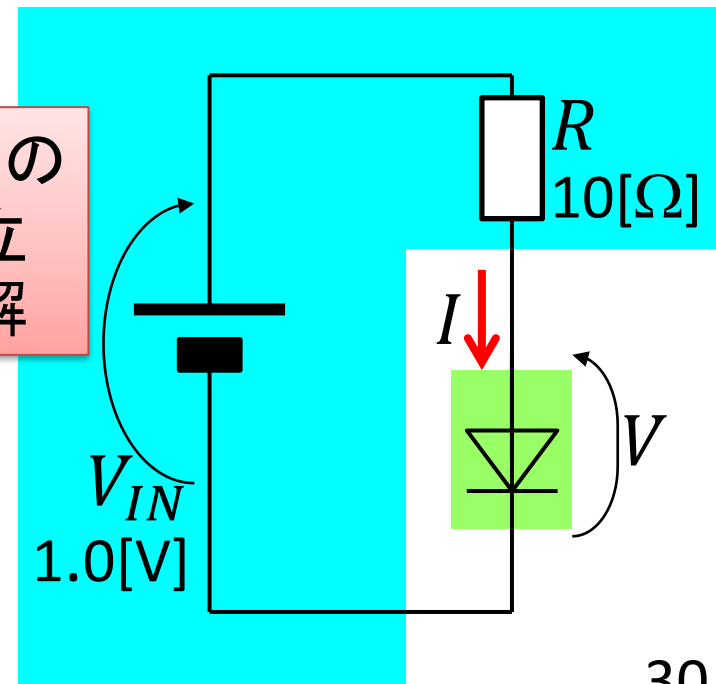
- オームの法則とKVLより $V_{IN} = IR + V$
 $\therefore I = \frac{V_{IN} - V}{R}$
- このグラフは直線



グラフの交点で V と I がわかる

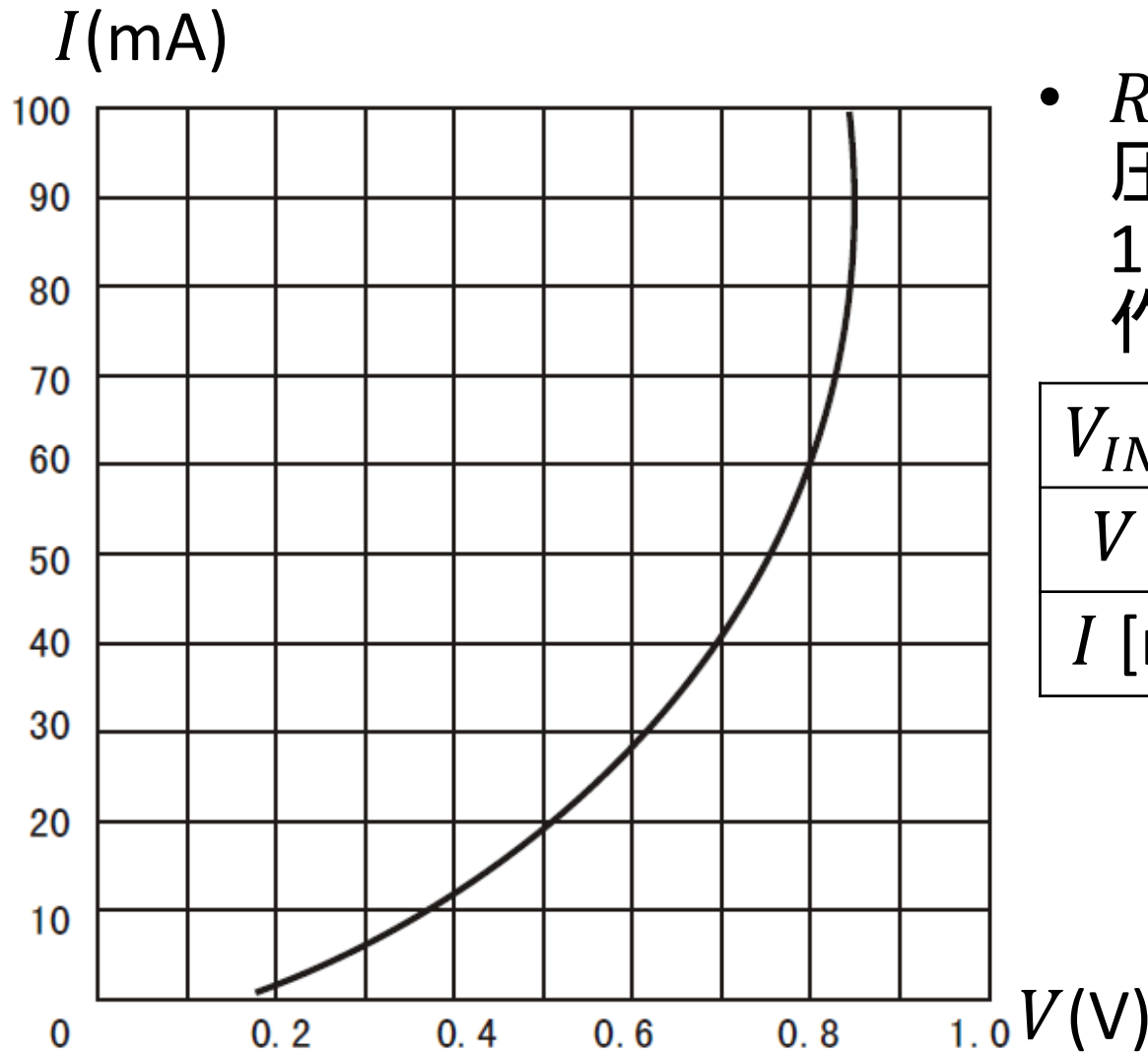


- グラフの交点が連立方程式の解
- 交点を **動作点** という
- 直線を **負荷線** という



負荷線の作図(1)

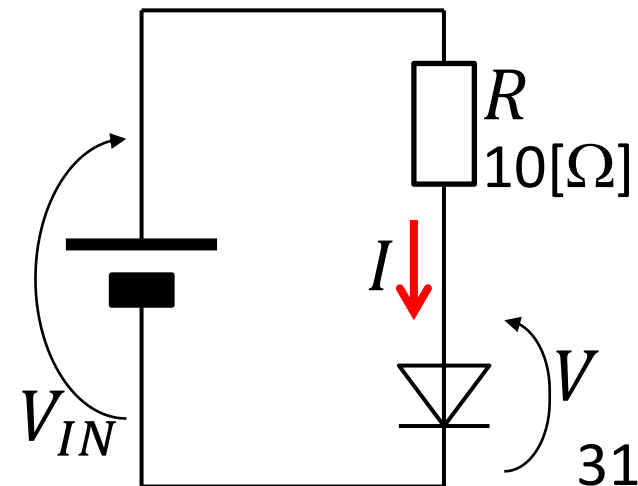
自分でやってみよう!



R が一定なら傾きは一定

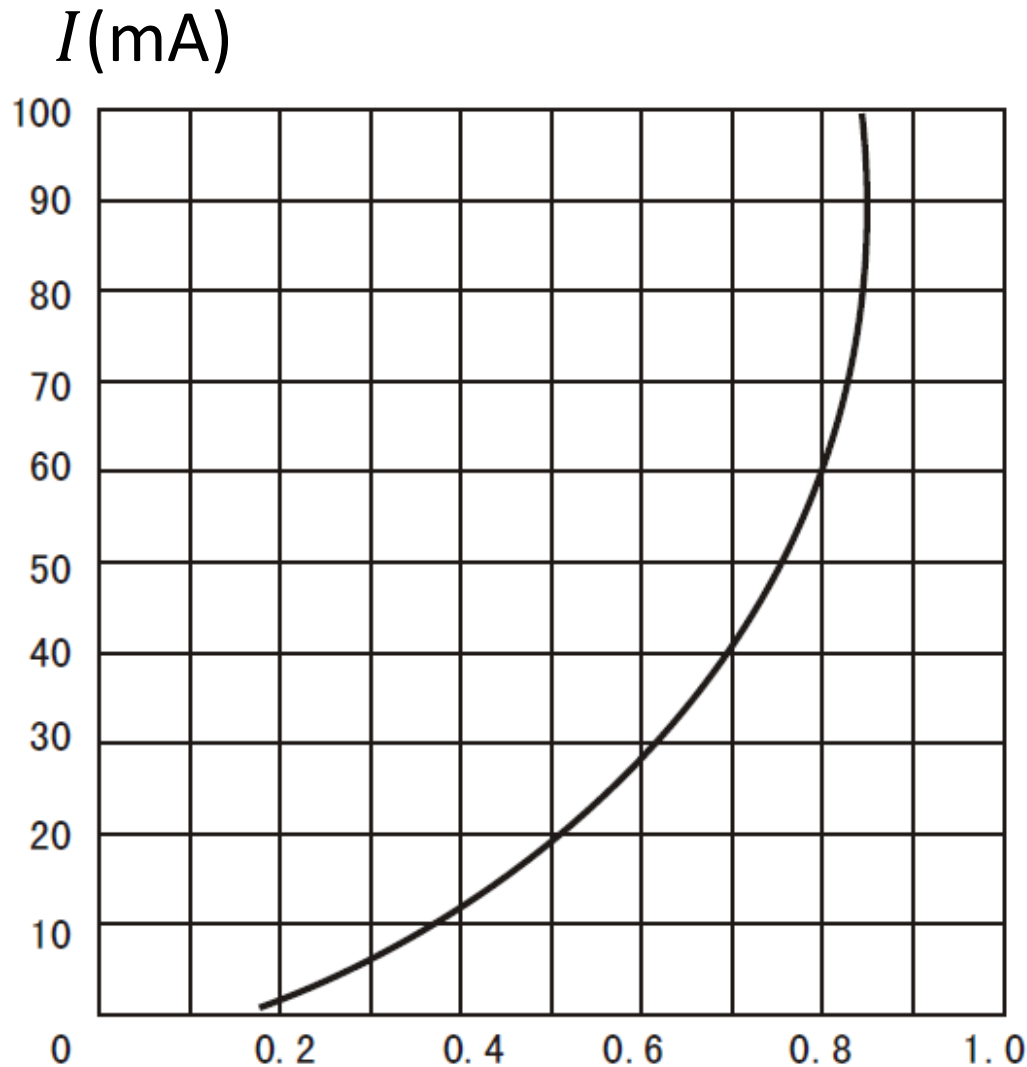
- $R = 10[\Omega]$ とし、電源電圧 V_{IN} が $0.6[\text{V}]$, $0.8[\text{V}]$, $1.0[\text{V}]$ のときの負荷線を作図し、下の表を埋めよ

$V_{IN} [\text{V}]$	0.6	0.8	1.0
$V [\text{V}]$	0.45	0.56	0.66
$I [\text{mA}]$	16	24	34



負荷線の作図(2)

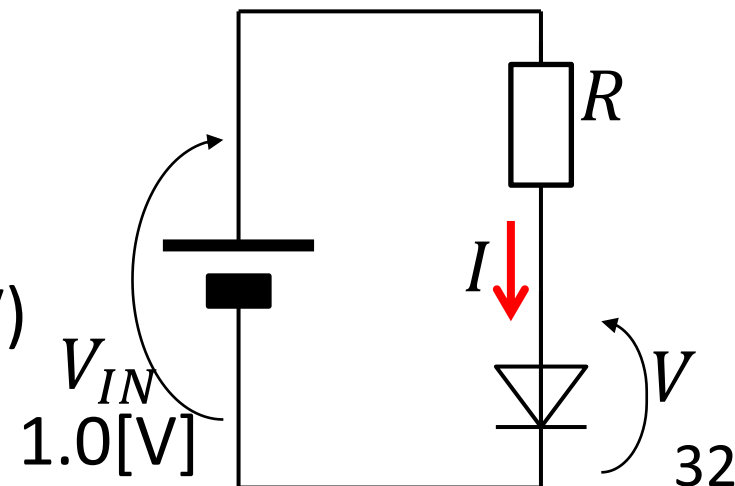
自分でやってみよう!



V_{IN} が一定なら x 切片は一定

- $V_{IN} = 1.0[\text{V}]$ とし、負荷抵抗 R が $10[\Omega]$, $20[\Omega]$, $50[\Omega]$ のときの負荷線を作図し、下の表を埋めよ

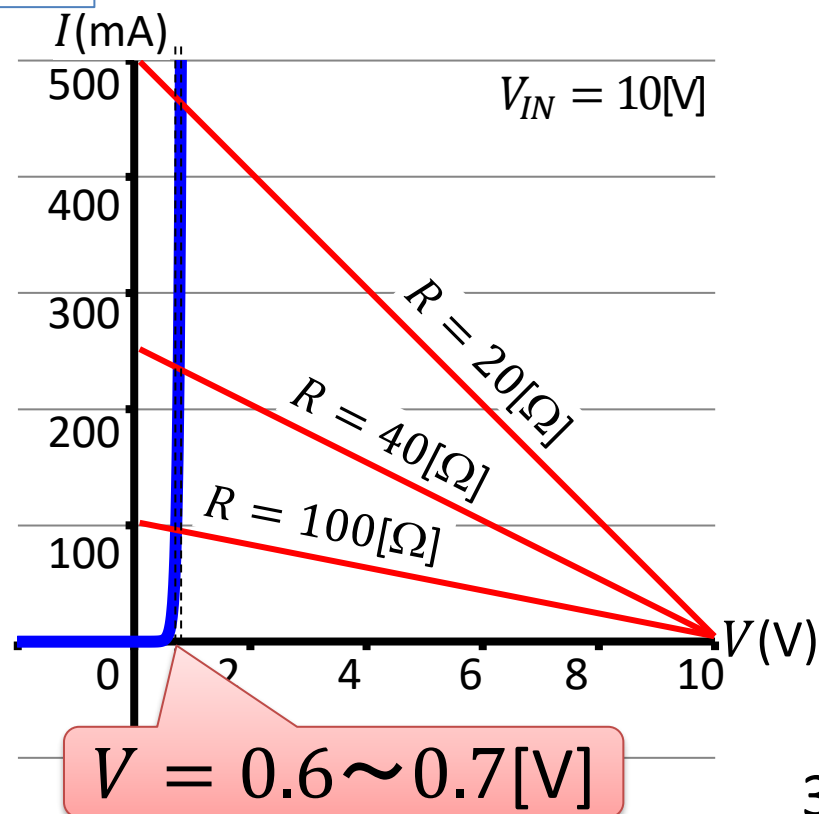
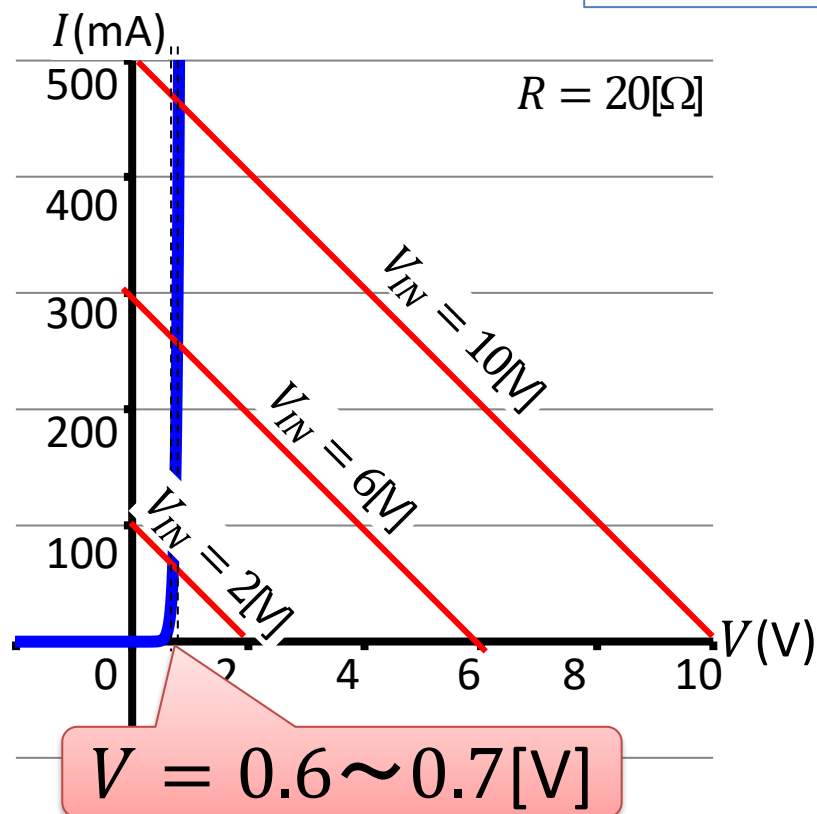
$R [\Omega]$	10	20	50
$V [\text{V}]$	0.66	0.54	0.40
$I [\text{mA}]$	34	23	12



電源電圧が十分高い時、 V はほぼ一定

- シリコンダイオードの場合、 V_{IN} を多少変化させても V は $0.6 \sim 0.7[V]$ になる
- シリコンダイオードの場合、 R を多少変化させても V は $0.6 \sim 0.7[V]$ になる

順方向電圧降下



先週～今週のまとめ

- 半導体(シリコン、ゲルマニウム等)の単結晶に微量の不純物(アクセプタ、ドナー)を混入させたものが p型と n型の半導体である
- p型半導体の中では主に正孔が移動し、n型半導体の中では主に電子が移動する
- これらを接合させたダイオードは p→n の向きに電流を流しやすい(整流作用)
- ダイオードの電圧-電流特性(静特性)は
$$I = I_s(e^{\frac{q}{kT}V} - 1)$$
- シリコンダイオードに順方向に電流を流すとおよそ 0.6～0.7V の電位差が生じる(順方向電圧降下)
- ダイオードの端子名はアノード(A)とカソード(K)
- 抵抗負荷回路と負荷線

来週以降の予定

- 来週は、教科書6章に書かれている「バイポーラトランジスタ」の仕組みや動作について、定性的に見ていきます
- 再来週は、「電界効果トランジスタ」特に「MOSFET」について、同様に見ていきます

電気電子回路(第4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。