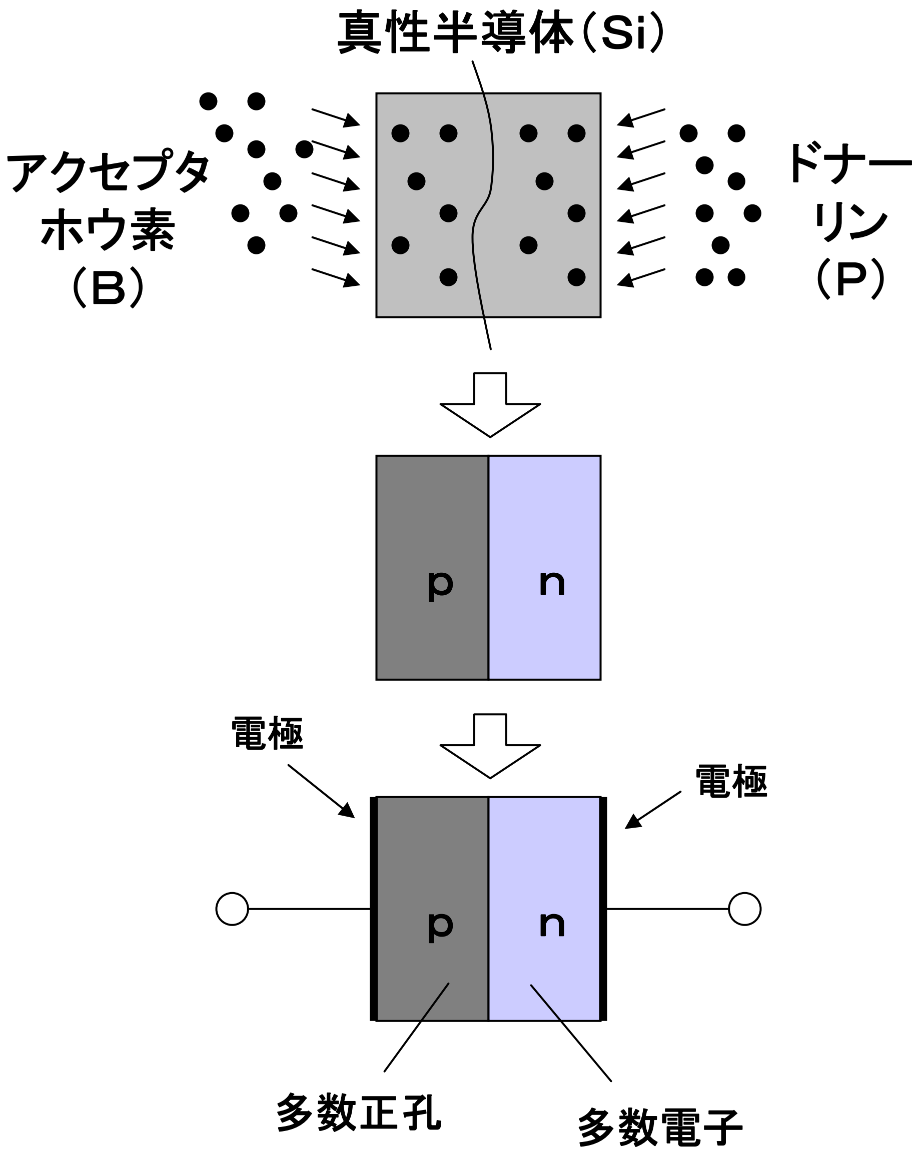
電子回路

第2回　ダイオードの性質および基本回路

電子知能システム学科

柴田幸司

半導体の pn接合

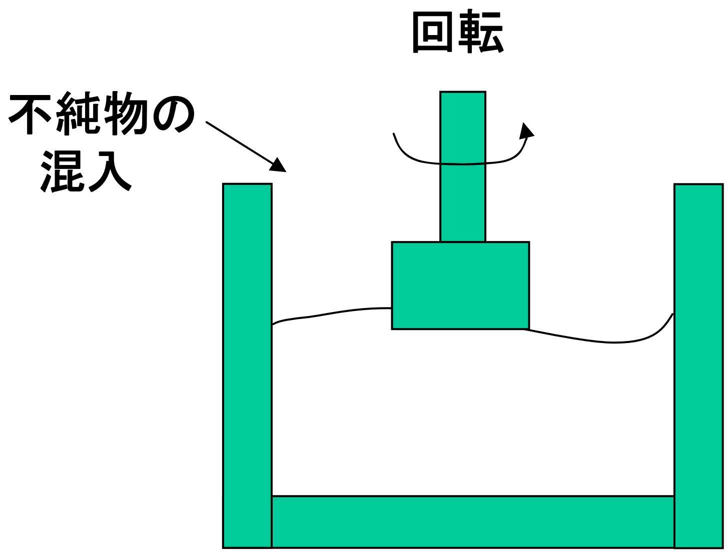


高温炉の中に真性半導体を置き、片側からアクセプタ不純物(Bなど)、他方からドナー不純物(Pなど)を含む蒸気を吹き込む。

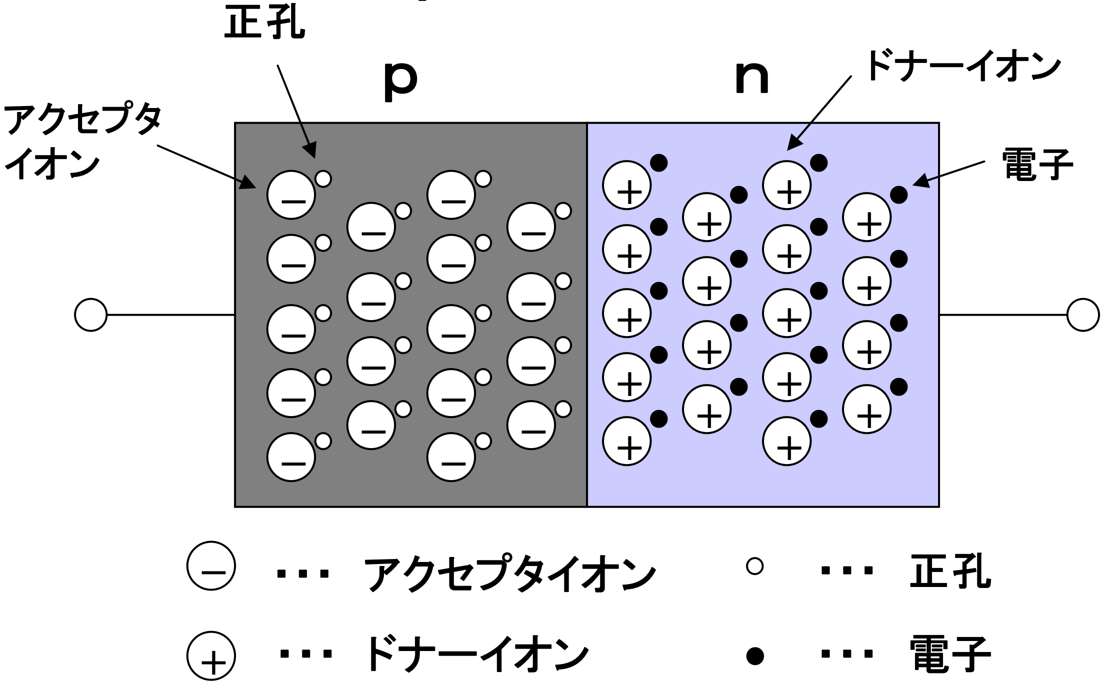
1つの半導体結晶中にp形半導体の領域とn形半導体の領域とが形成される。
→ pn結合

出来た結晶の両端に電極を取り付けることにより整流特性(一方向のみに電流が流れる)を示す。
→ pn接合ダイオード

Pn接合の作成のための単結晶の引き上げ



pn接合された半導体の電気伝導

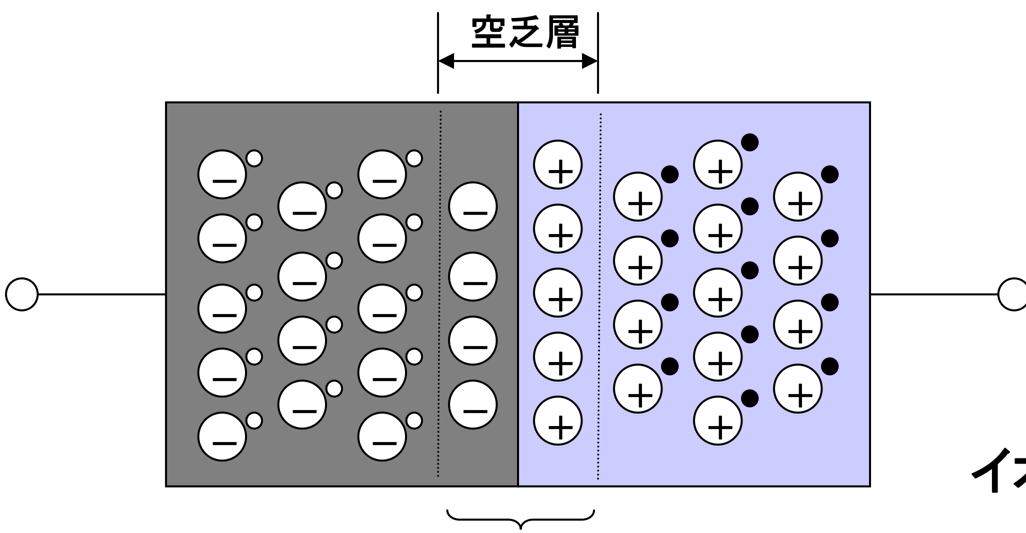


p部にはアクセプタイオンと正孔、n部にはドナーイオンと電子が一様に存在する。

p形半導体とn形半導体が接合されるとp形の正孔とn形の電子は移動できる為、互いに拡散し合い接合面を乗り越えることが出来る。

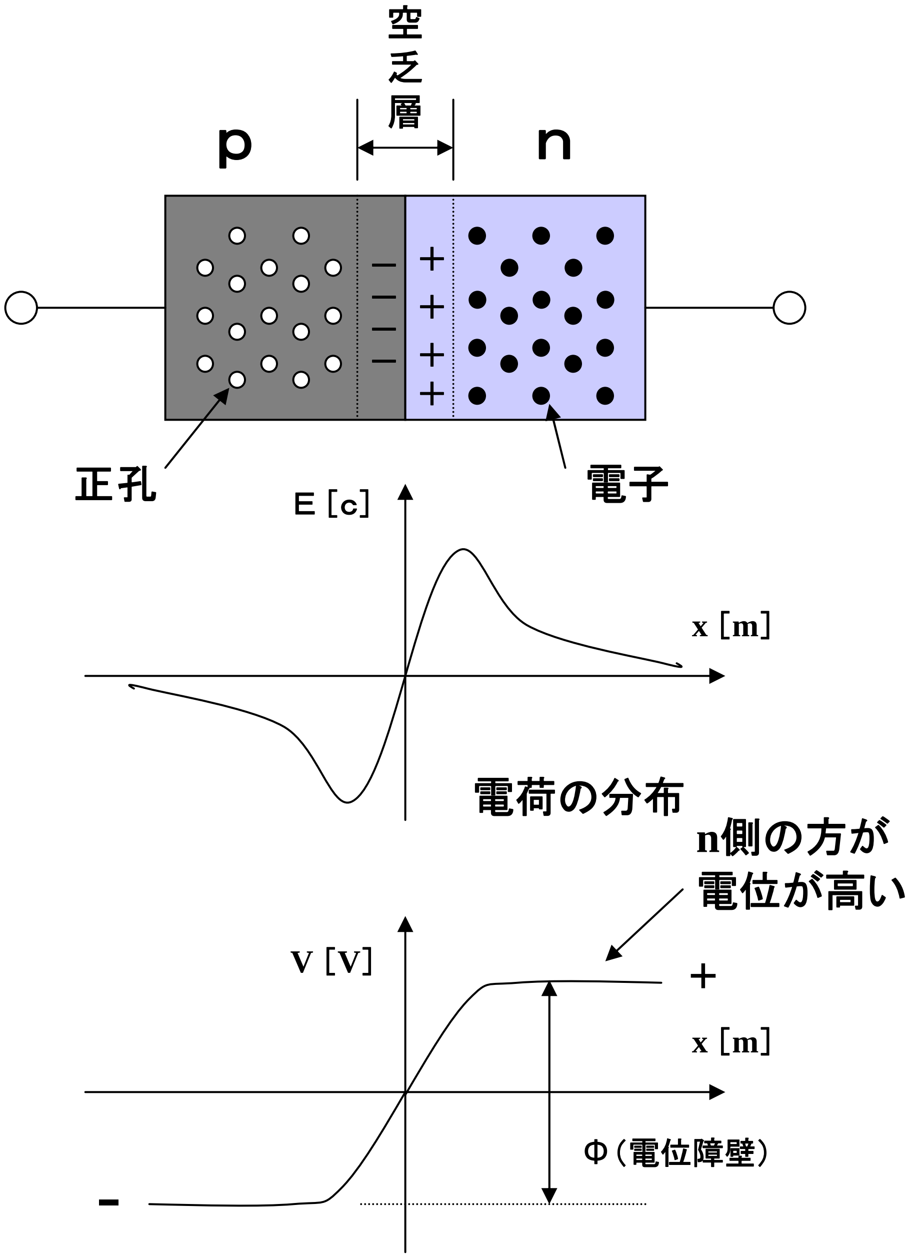
①

この半導体に電圧を加えない状態では、境界面近傍の両イオンの電子と正孔は吸引し合うことによりキャリアが消滅する。この部分を空乏層という。



アクセプタ･ドナーイオンは残っている

イオン･･･原子から電子がとれたり余分についたもの



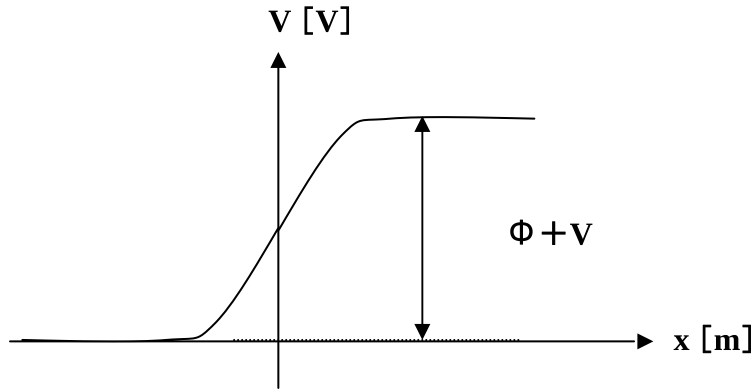
簡単のため図中の両イオンを省略し、半導体内部の様子を電子および正孔だけで表現する。

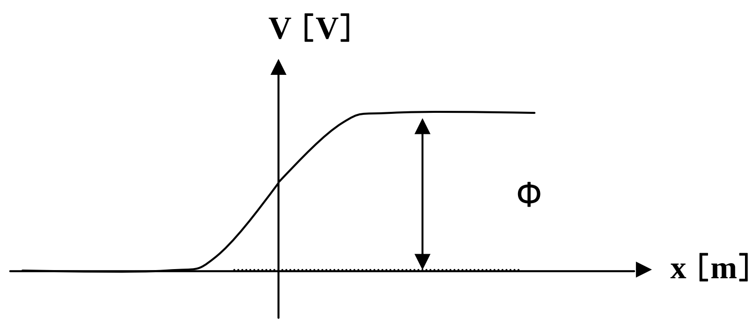
⇩

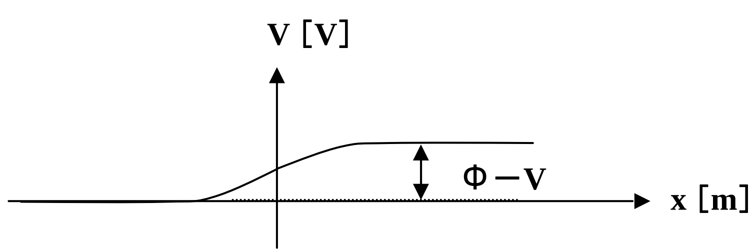
この空乏層に残ったアクセプタイオンとドナーイオンが内部電界*E*を発生させ、電位障壁ϕを形成することにより拡散は収まり、空乏層の厚みは一定に落ち着く。

⇩

拡散が収まった後はp部の境界面には－の電位障壁が出来るため、n部の電子がp部へ移動できない。また、n部の境界面には＋の電位障壁が出来るため、p部の正孔はn部へ移動できない。よって電流は流れない。


V [V]
Φ+V
x [m]

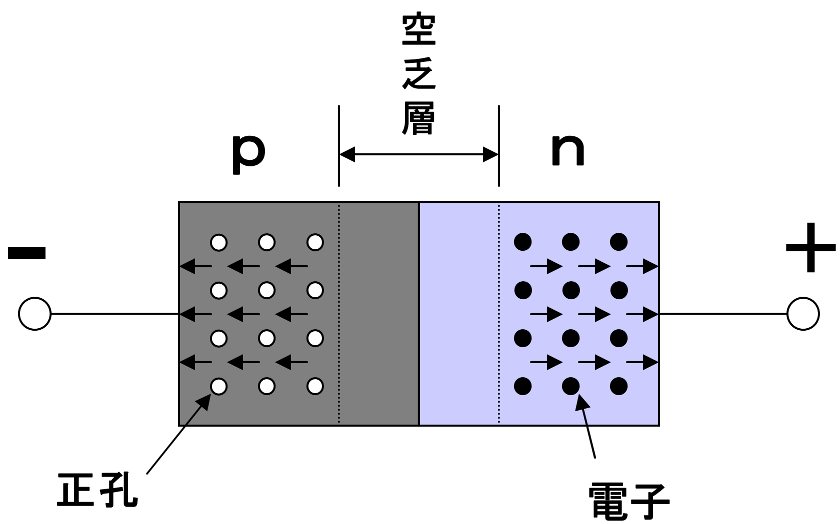

V [V]
Φ
x [m]


V [V]
Φ−V
x [m]

正孔・・・　＋　→　−
電子・・・　−　→　＋

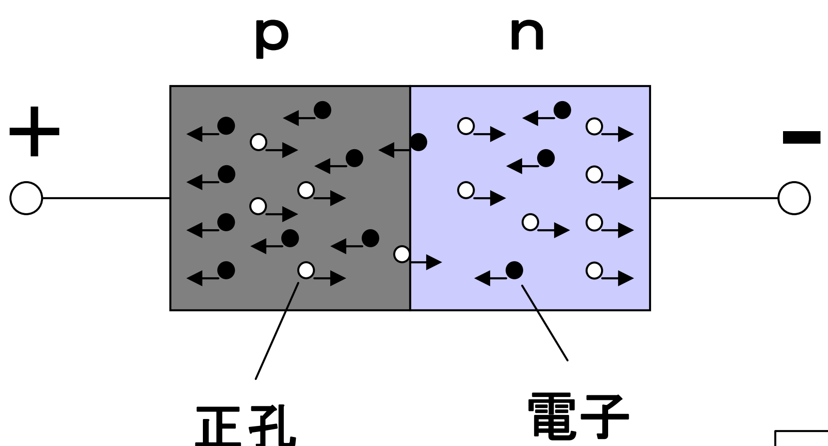
②

　p側の端子に−、n側に＋の電圧を加えた場合、p部の正孔は−電極、n部の電子は＋電極に引き寄せられ、結合部のキャリアが不足することにより空乏層が広がる。よって、境界での電子の移動も起こらず、電流は流れない。



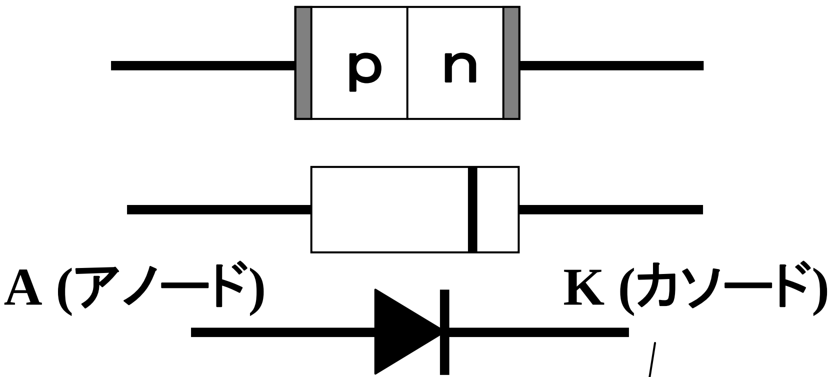
　p側の端子に＋、n側に−の電圧を加えた場合、n部の電子は＋電極、p部の正孔は−電極に引き寄せられ、境界部に移動する。

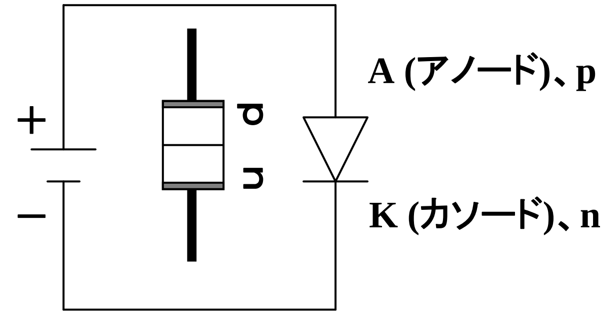
この時には空乏層は出来ず、電位障壁ϕも小さい。よって、電子および正孔は境界を越えて移動する。また、各電極では電子と正孔が交換される（キャリアが供給される）ために、電流が流れ続ける。



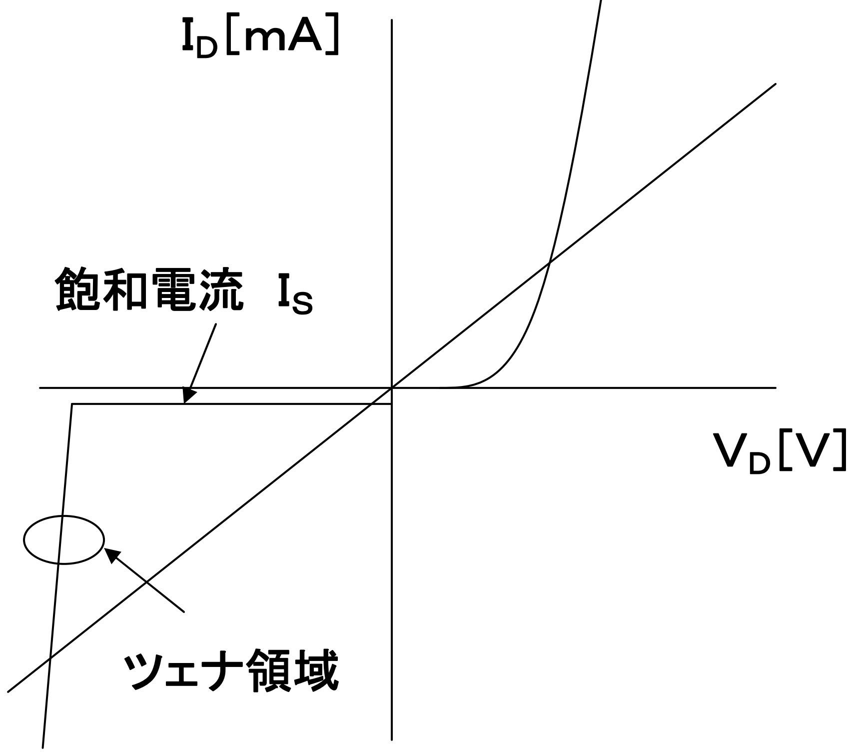
　pn接合ダイオードへのかける電圧の向きにより電流が流れたり流れなかったりする現象を整流作用という。

pn接合ダイオードの電圧ー電流特性の特徴1





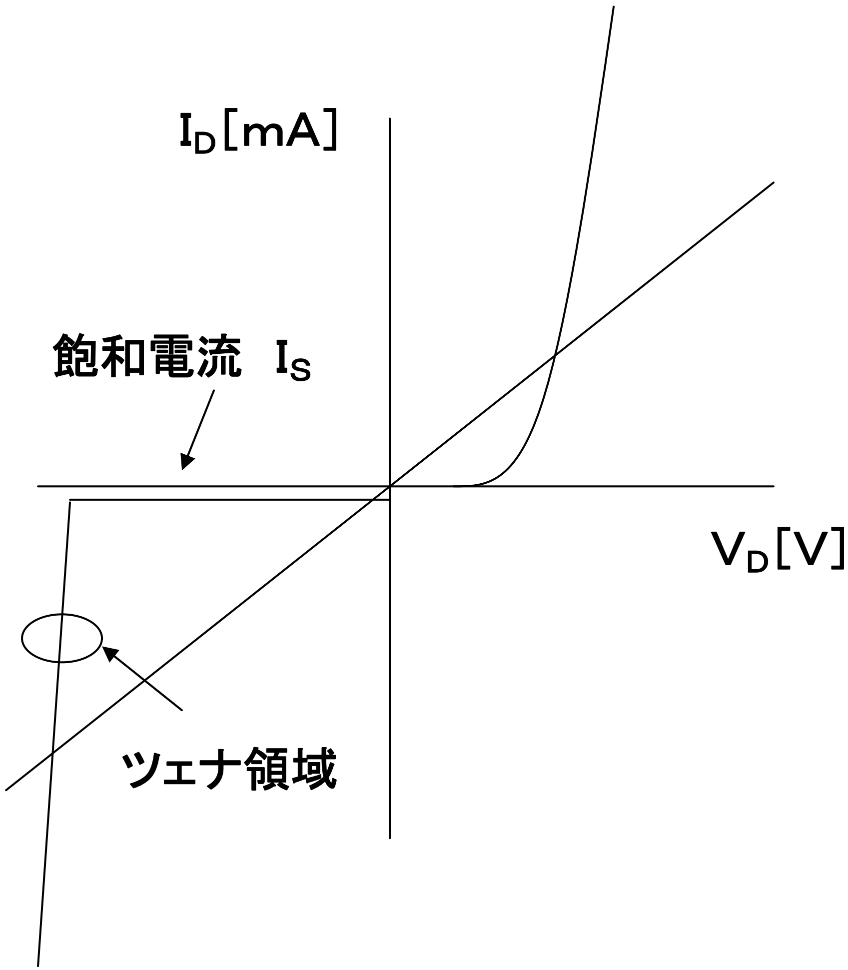
p（アノード）側に＋、n（カソード）側にーの電圧を加えると、多数キャリアにより 少ない電圧で多くの電流が流れる。



pn接合ダイオードの電圧ー電流特性

キャリア・・・電流を流すための
電子や正孔（ホール）

電流が流れ始める電圧
- Si ・・・ 0．5～0．7V
- Ge ・・・ 0．2～0．4V



負の電圧を加えると、少数キャリアによる微小な電流 I_S が流れる

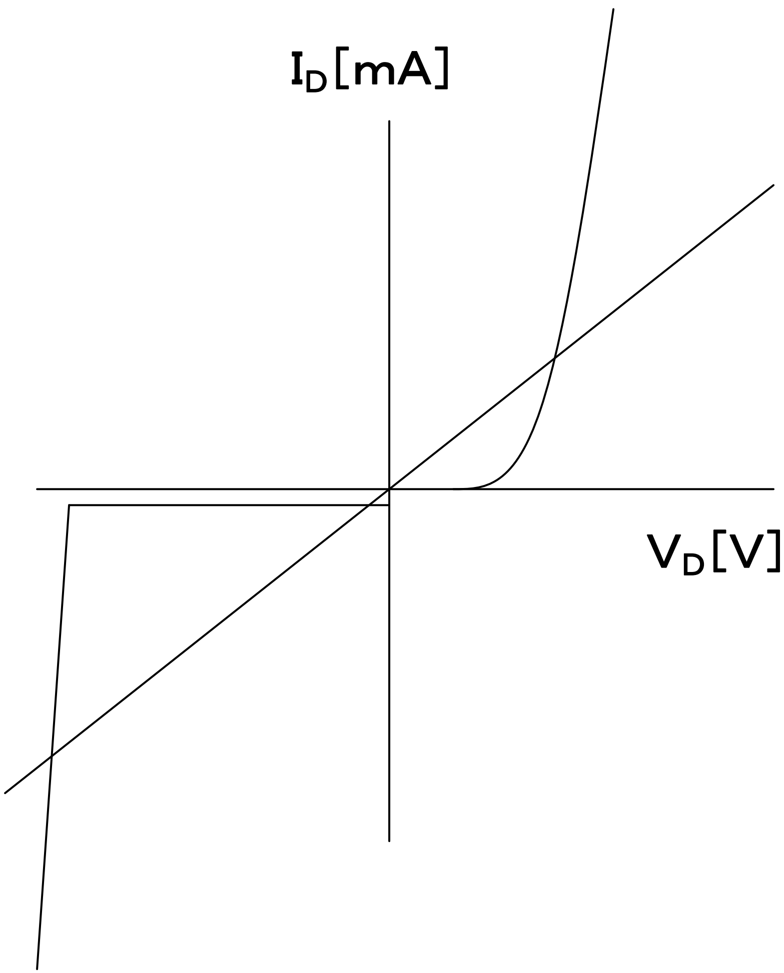
逆方向電流の値
- Si ・・・ nAオーダ
- Ge ・・・ μAオーダ

さらに負の電圧を加えると、ツェナおよび雪崩現象により急激に電流が増加する。

→ この様な現象の起こる領域をツェナ領域という。

→ 一定の電流以上で熱破壊を起こす。（この電圧が逆耐電圧）

pn接合ダイオードの電圧ー電流特性の特徴2



抵抗（導体）の電圧－電流特性

電流と電圧の関係が1次方程式となる
（任意の電流、電圧において、R＝E／Iの
関係が成り立つ）。

⇩

線形性

ダイオードの電圧－電流特性

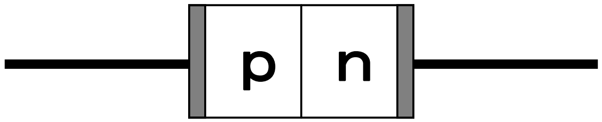
電流と電圧の関係が1次方程式になら
ない（直線にならない）。

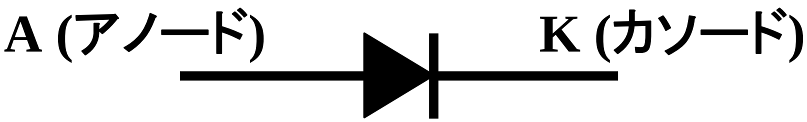
（抵抗値R＝E／Iと定義しても抵抗値が電流
または電圧の値によって変わる）

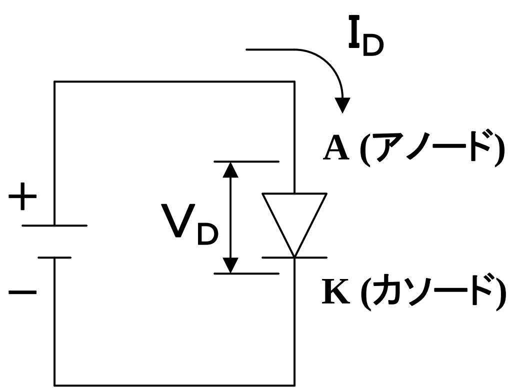
⇩

非線形性

pn接合理想ダイオードの電圧ー電流特性







式の導出法 ･･･ pn接合の電流･電圧関係式（半導体内に流れる電流と両電極にかける電圧をエネルギーバンドの関係式より導出）

$$I_D = I_s\left(e^{\frac{q\cdot V_D}{k\cdot T}} - 1\right)$$

q＝1．6×10^{-19}[C]　　･･･電子の電荷

k＝1．38×10^{-23}[J／K]･･･ボルツマン係数

（ボルツ･･･　分子の運動エネルギーと絶対温度との関係）

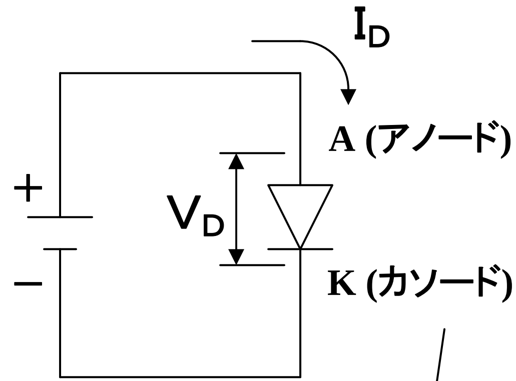
T＝　　　　　　　　［K］　　･･･絶対温度

I_S＝　　　　　　　　［A］　　･･･飽和電流

順方向では、印加電圧V_D により多数キャリアである電子の移動はexp（qV／kT）に比例し、飽和電流も考慮した式となる。

式の導出法･･･古川他、“電子デバイス工学,” 森北出版,pp.44-47.

pn接合ダイオードの順方向抵抗（動抵抗）



電子回路では、一般に小さな信号を取り扱うために、非線形な素子の特性曲線上のある1点（動作点）を中心とし、その近傍の電圧または、電流の微小変動を問題とする。

⇩

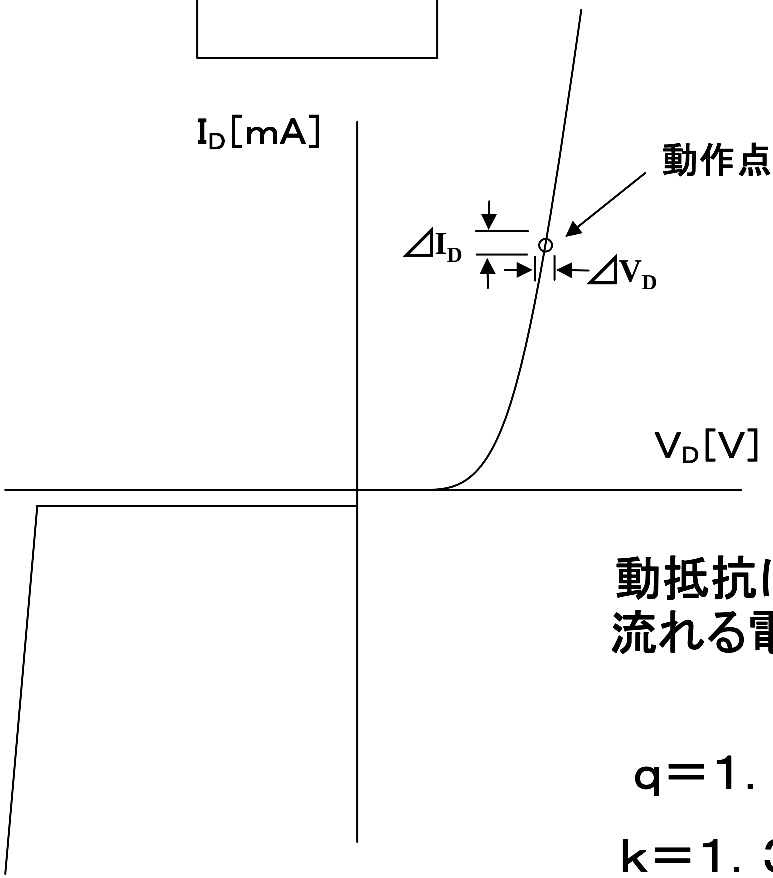
電圧－電流特性の勾配を動抵抗（交流抵抗・順方向抵抗）と定義する。すなわち、

$$r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$$

が動抵抗であり、式（1）において

$$I_D \cong I_s \cdot e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}}$$

なる近似を行うと



動抵抗はダイオードに流れる電流 I_Dに対して

$$r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \cong \frac{k \cdot T}{q I_D}$$

で表される（次ページにて証明）。

q＝1．6×10^{-19}[C]　　・・・電子の電荷

k＝1．38×10^{-23}[J／K]・・・ボルツマン定数

$r_d = \dfrac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \cong \dfrac{k \cdot T}{qI_D}$ の導出

ダイオード電流の整流方程式は

$$I_D = I_s(e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} - 1) \quad \cdots \text{（1）}$$

である。この式の両辺をV_Dで微分すると、微分公式の

$$\frac{d}{dx}e^{A \cdot x} = A \cdot e^{A \cdot x}$$

なる関係より

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{q}{k \cdot T} I_s \cdot e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} \quad \cdots \text{（2）}$$

となる。なお、（1）式の第2項のI_Sは定数であるから、微分すると零になる。

一方、（1）式について再度考えると、正の高い電圧（0．6～0．7以上）に対しては

$$e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} \gg 1$$

であるから、（1）式の第2項のI_Sはこれらの観点からも零と置けるので、（1）式は結局

$$I_D \cong I_s \cdot e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}}$$

と置くことが出来る。よって、これを（2）式の右辺に代入すると

$$\frac{dI_D}{dV_D} = \frac{q}{k \cdot T} I_D \quad \cdots \text{（3）}$$

となる。よって、ダイオードの順方向微分抵抗（動抵抗）r_d は結局 $r_d = \dfrac{\Delta V_D}{\Delta I_D}$ なる定義より（3）式の逆数をとれば

$$r_d = \frac{\Delta V_D}{\Delta I_D} \cong \frac{k \cdot T}{qI_D}$$

なる近似値を得る。

この式はpn接合理想ダイオードの動抵抗がボルツマン定数k、絶対温度T、電荷q、順方向の電流I_Dにより求まることを意味している。

例題1

常温（300K）の場合における、電流を1mA、2mAと変化させた場合のpn接合理想ダイオードの動抵抗

$$r_d \cong \frac{k \cdot T}{qI_D}$$ **を求めよ。**

q＝1．6×10^{-19}[C]　　・・・電子の電荷

k＝1．38×10^{-23}[J／K]・・・ボルツマン定数

であるから

$$r_d \cong \frac{k \cdot T}{qI_D} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot 3 \cdot 10^{2}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot I_D} = \frac{4.14 \cdot 10^{-19} \cdot 10^{-2}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot I_D}$$

$$= \frac{2.59 \cdot 10^{-2}}{I_D} = \frac{25.9 \cdot 10^{-3}}{I_D} \quad [\Omega]$$

となり、1mA（＝1・10^{-3}[A]）の電流が流れていれば、交流抵抗は25．9[Ω]であり、2mA（＝2・10^{-3}[A]）の電流が流れていれば、交流抵抗は12．95[Ω]である。

例題2:ダイオードの順方向動抵抗(r $_d$)の温度変化

電流 I_D＝2mA一定とし、温度 がT＝25℃および、75℃の場合における動抵抗を計算せよ

q＝1．6×10^{-19}[C]　　･･･電子の電荷

k＝1．38×10^{-23}[J／K]･･･ボルツマン定数

電流 I_Dの単位をmA、温度 Tの単位を℃とする

$$r_d \cong \frac{k \cdot T}{qI_D} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot (273+T)}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot I_D \cdot 10^{-3}} = \frac{1.38 \cdot 10^{-23} \cdot (273+T)}{1.6 \cdot 10^{-22} \cdot I_D}$$

$$= \frac{1.38 \cdot 10^{-1} \cdot (273+T)}{1.6 \cdot I_D} = \frac{0.138 \cdot (273+T)}{1.6 \cdot I_D} = \frac{0.08625 \cdot (273+T)}{I_D}$$

電流 I_D＝2mA、温度 T＝25℃とすると

$$r_d \cong \frac{k \cdot T}{qI_D} = \frac{0.08625 \cdot (273+T)}{I_D} = \frac{0.08625 \cdot 298}{2} = 0.08625 \cdot 149 = 12.85$$

電流 I_D＝2mA、温度 T＝75℃とすると

$$r_d \cong \frac{k \cdot T}{qI_D} = \frac{0.08625 \cdot (273+T)}{I_D} = \frac{0.08625 \cdot 348}{2} = 0.08625 \cdot 174 = 15.01$$

これより、温度変化に対して動抵抗（＝電圧－電流特性の傾き）はこの程度変化することが分かる。

⇨　**回路特性へ影響**

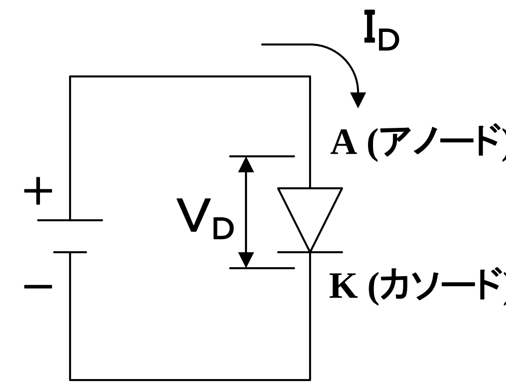
例題3

飽和電流が I_S＝10 μAとなるpn接合理想ゲルマニウムダイオードに室温（300K）で I_D＝2mAの電流が流れている。順方向電圧降下はいくらか。但し、理想ダイオードの整流方程式は以下で与えられるものとする。

$$I_d = I_s\left(e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} - 1\right)$$

q＝1．6×10^{-19}[C]　　・・・電子の電荷

k＝1．38×10^{-23}[J／K]・・・ボルツマン定数



方針：　与式よりV_D＝に変形

先の計算より、300Kの場合には　$\frac{k \cdot T}{q} = 2.59 \cdot 10^{-2}$　と求められたので、

ダイオード電流の整流方程式である　$I_d = I_s\left(e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} - 1\right)$　・・・（1）

は　$I_d = I_s\left(e^{\frac{V_D}{\left(\frac{k \cdot T}{q}\right)}} - 1\right)$　と変形させることができて、この式からV_Dを求める。

この式に I_d 、I_S および上記の値を代入すると

$$\underbrace{2 \cdot 10^{-3}}_{I_d} = \underbrace{10 \cdot 10^{-6}}_{I_S}\left(e^{\frac{V_D}{2.59 \cdot 10^{-2}}} - 1\right) = 10 \cdot 10^{-6} \cdot e^{\frac{V_D}{2.59 \cdot 10^{-2}}} \underbrace{- 10 \cdot 10^{-6}}$$

この値は次に左辺に移項する。

$$2\cdot 10^{-3}+10\cdot 10^{-6}=10\cdot 10^{-6}\cdot e^{\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}}$$

$$2\cdot 10^{-3}+10\cdot 10^{-6}=1\cdot 10^{-5}\cdot e^{\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}}$$

両辺を１０$^{-5}$で割れば

$$2\cdot 10^{2}+10\cdot 10^{-1}=e^{\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}}$$ となり $$201=e^{\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}}$$ を得る。

これより、両辺の自然対数を取って

$$\log_e 201=\log_e e^{\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}}$$ となる。この左辺は

$$log_e 201=log_e 2.7182^{5.303}=5.303$$ であり、右辺については

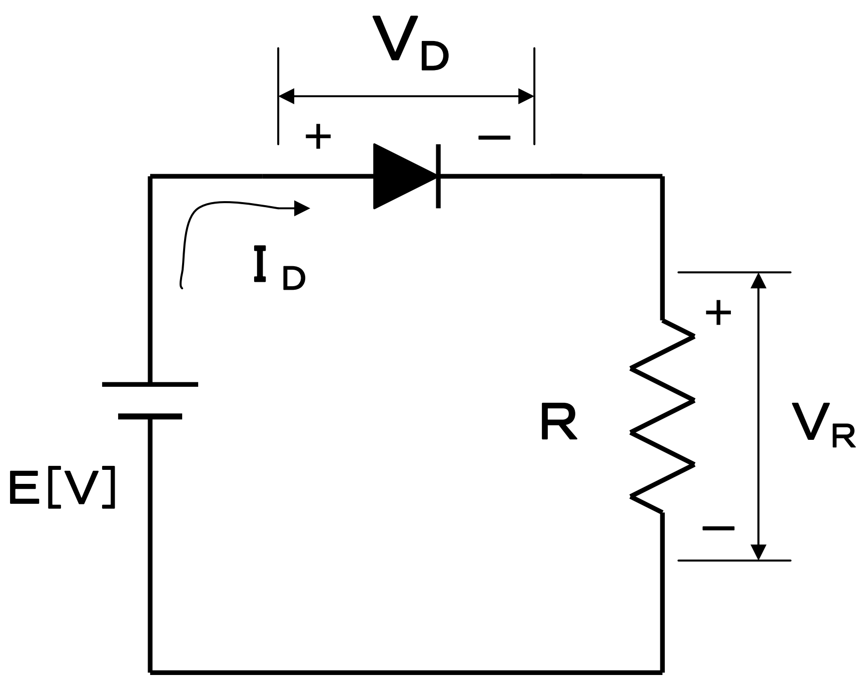
2.7282

$\log_e e=1$ より $$=\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}\cdot\underbrace{\log_e e}_{1}$$ となるから

前述の式は $$5.303=\frac{V_D}{2.59\cdot 10^{-2}}$$ となる。

よって $$V_D=5.303\cdot 2.59\cdot 10^{-2}=13.73\cdot 10^{-2}=0.137$$ [V] を得た。

簡単なダイオード回路



目的

図に示す様なダイオードと抵抗が直列に接続された回路に流れる電流 I_Dおよびダイオードと抵抗に印加される電圧（V_D、V_R）を求めることを考える（但し、抵抗値Rおよび電源電圧Eは定数）。

なお、ダイオードの電圧－電流は別途与えられるものとする。

ダイオードの電圧－電流特性は非線形であるからオームの法則は適用出来ない。

しかし、キルヒホッフの法則は適用できる。すなわち、電源電圧はダイオードおよび抵抗に印加される電圧であるV_DおよびV_Rに分圧できる。よって、次式が成り立つ。

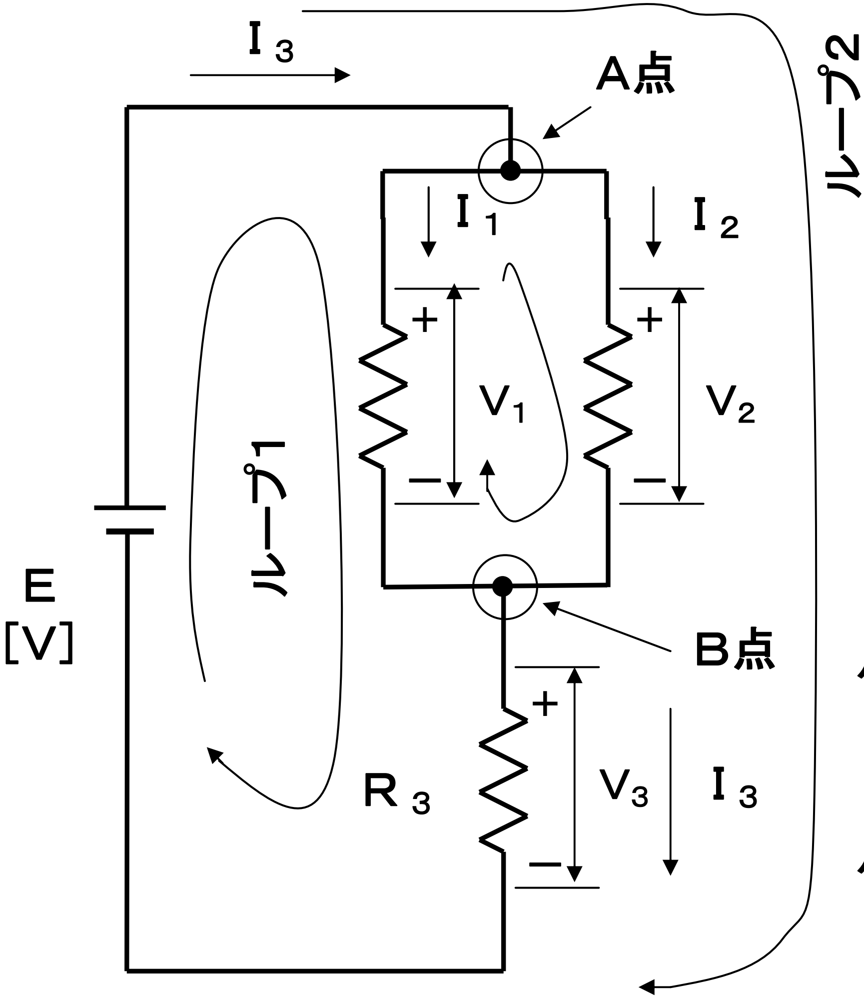
$$E = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D \quad \cdots \quad (1)$$

ここで、抵抗Rに対してはオームの法則（E＝I･R）が適用できる。

キルヒホッフの法則

第１法則　：　ある接続点に流れ込む電流の和は零である。

第２法則　：　回路内の任意ループの電圧の和は零である。



Ａ点において入り込む電流を＋とすれば

$$I_3 - I_1 - I_2 = 0$$

Ｂ点において

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0$$

第１法則

図のループの方向を＋とすれば

ループ1において

$$E = V_1 + V_3 = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3$$

ループ2において

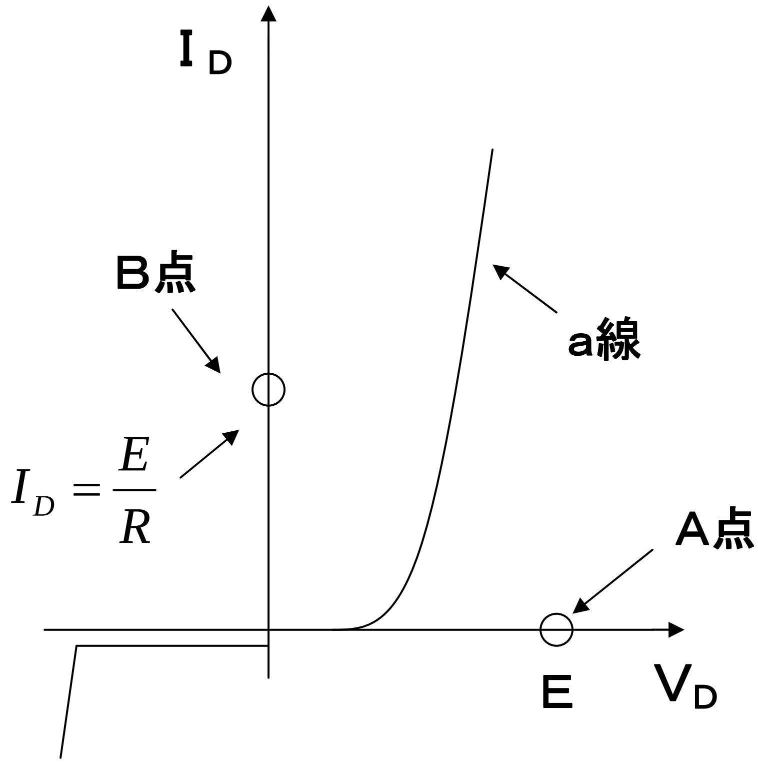
$$E = V_2 + V_3 = I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot R_3$$

ループ3において

$$0 = V_2 - V_1 = I_2 \cdot R_2 - I_1 \cdot R_1$$

第２法則

となる。



一方、ダイオード自身の電圧－電流特性は、降伏電圧以上において次式で表される。

$$I_d = I_s(e^{\frac{q \cdot V_D}{k \cdot T}} - 1) \quad \cdots \ (2)$$

回路に流れる電流 I_Dおよびダイオードと抵抗に印加される電圧V_DやV_Rは（1）、（2）式を連立させて求める。

この様な計算は電子計算機を用いなければ大変であるため、作図法によって求めてみる。

まず、（2）式は図2のa線の様に表される。

一方（1）式の　$E = V_D + R \cdot I_D$

は、EおよびRの初期値が与えられた場合にまず、I_D＝0においては（1）式は次式の様にV_Dのみが残り、V_D＝Eとなる

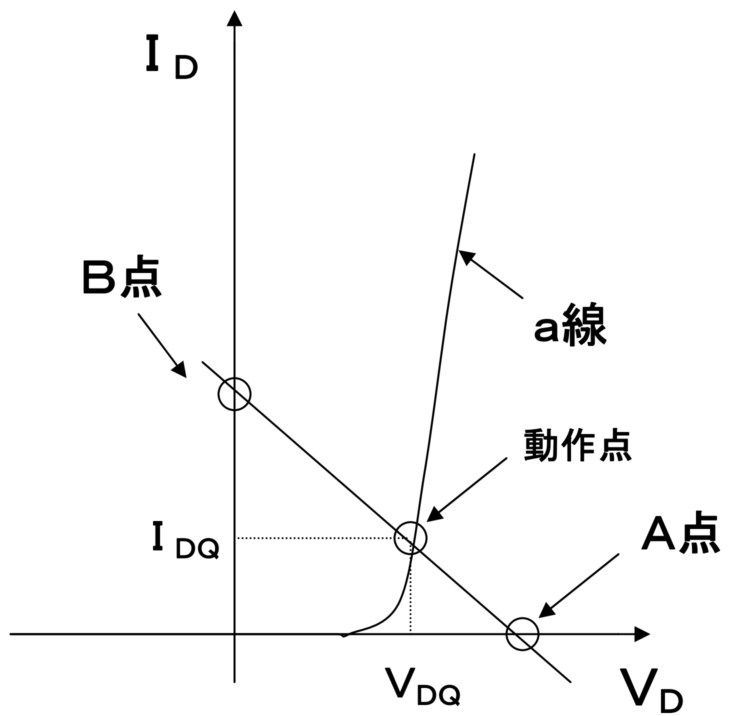
$$E = V_D + R \cdot 0$$

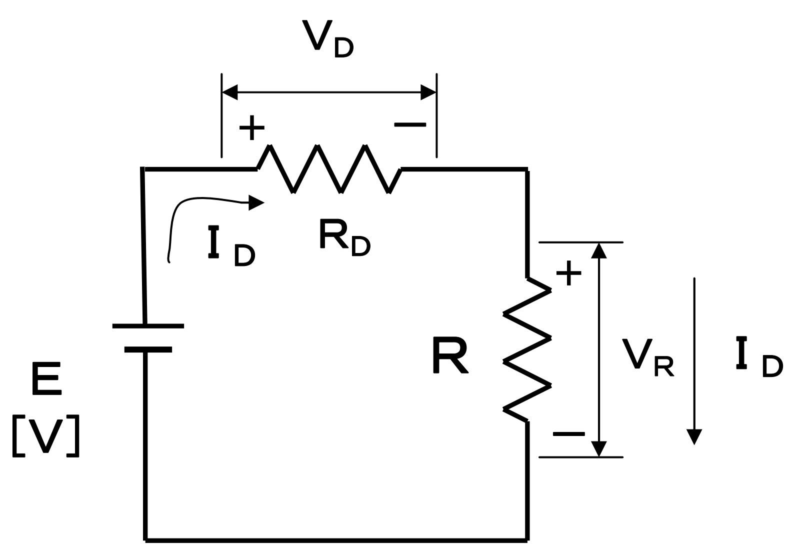
よってまず、（1）式を満たすA点（V_D＝E）が決定される。

次に、V_D＝0において（1）式は次式に示す通り、EとRのみの関係となる。

$$E = 0 + R \cdot I_D \ \rightarrow \ I_D = \frac{E}{R}$$

さらにEおよびRは定数であるから、（1）式を満たすB点（I_D＝E／R）も定まる。





これより、A点とB点を結んだ直線であるb線が（1）式を示していることになる。

また、（1）式と（2）式を共に満足する解はa線とb線の交点であり、その点でのI_DおよびV_Dが本回路が動作時におけるダイオード自身の電流および電圧である。この交点を動作点と呼び、動作点におけるダイオードの電流、電圧をI_{DQ}およびV_{DQ}と表すことがある。

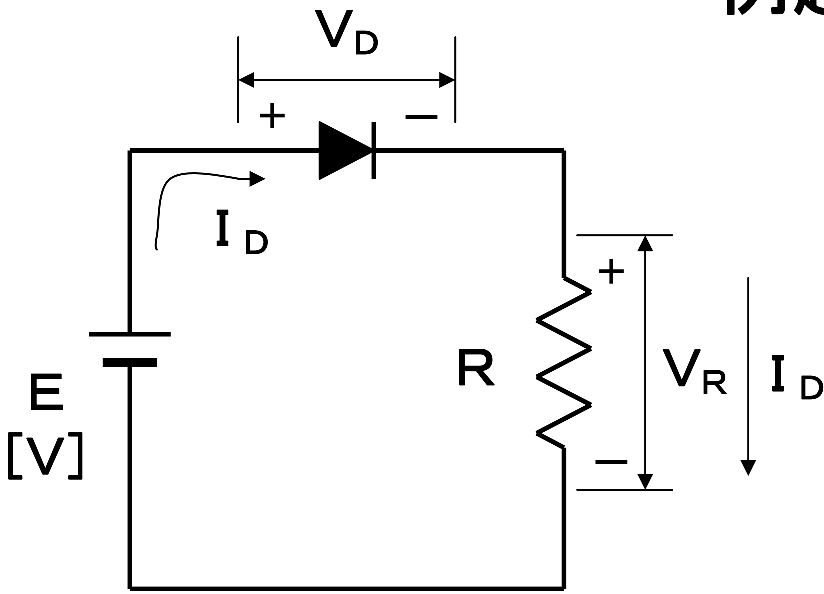
結局この回路は、動作点においては左図に示す通り直流電源Eに対してR_DおよびRの抵抗が接続されていると考えることができ、ダイオードにかかる電圧は$V_D = V_{DQ}$、ダイオードを流れる電流は$I_D = I_{DQ}$となる。なお、動作点においてR_Dについて、オームの法則を適用すると

$$R_D = \frac{V_D}{I_D}$$

となり、ダイオードの抵抗値R_Dが計算出来る。なお、ここで得られたR_Dは動作点のみにてキルヒホッフの第２法則である次式を満足している。

$$E = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D \cdots \quad (3)$$

例題5



図に示すダイオードと抵抗が直列に接続された回路において、E＝4V, R＝80Ωの場合におけるダイオードに流れる電流 I_Dおよび、ダイオードに印加される電圧V_Dを作図法により求める。

まず、先の(3)式にE＝4V, R＝80Ωを代入すれば

$$E = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D \quad \cdots \text{(1)}$$

$$4 = V_D + 80 \cdot I_D$$

となる。これより、I_D＝0の場合には

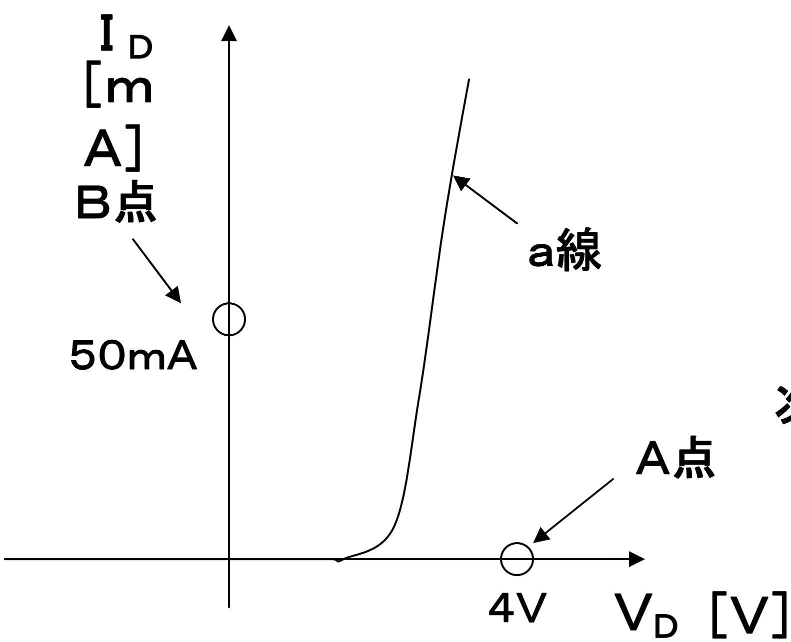
$$V_D = 4$$

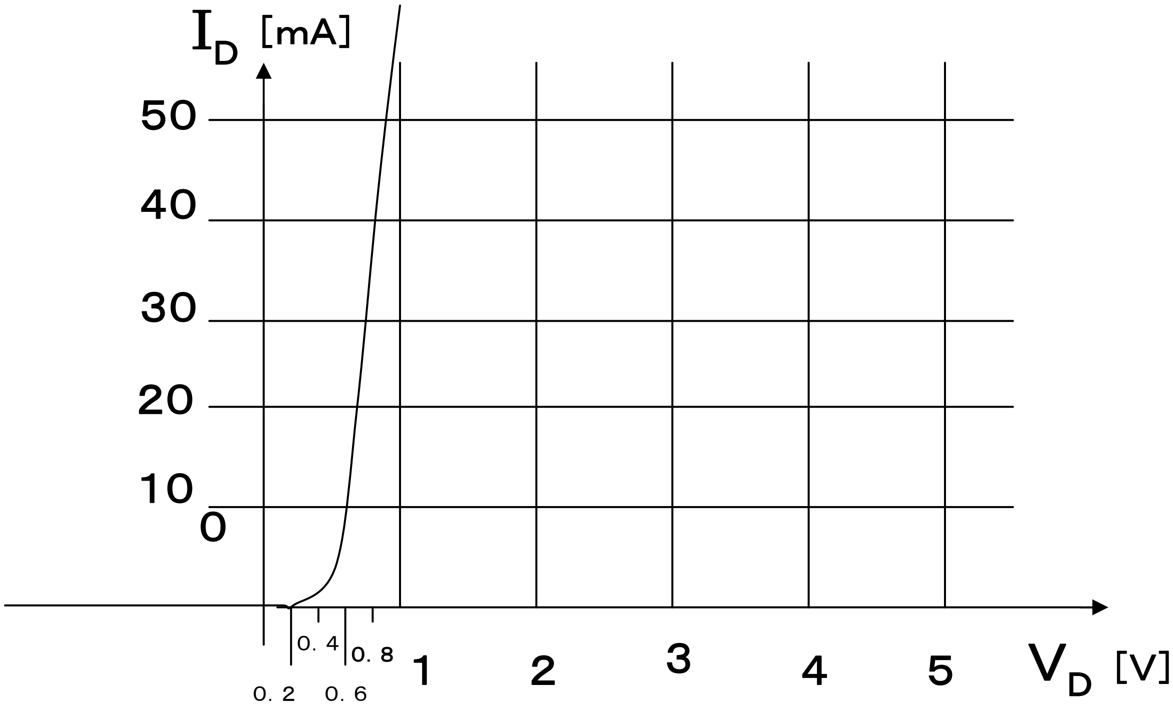
であり、この点をA点にプロットできる。

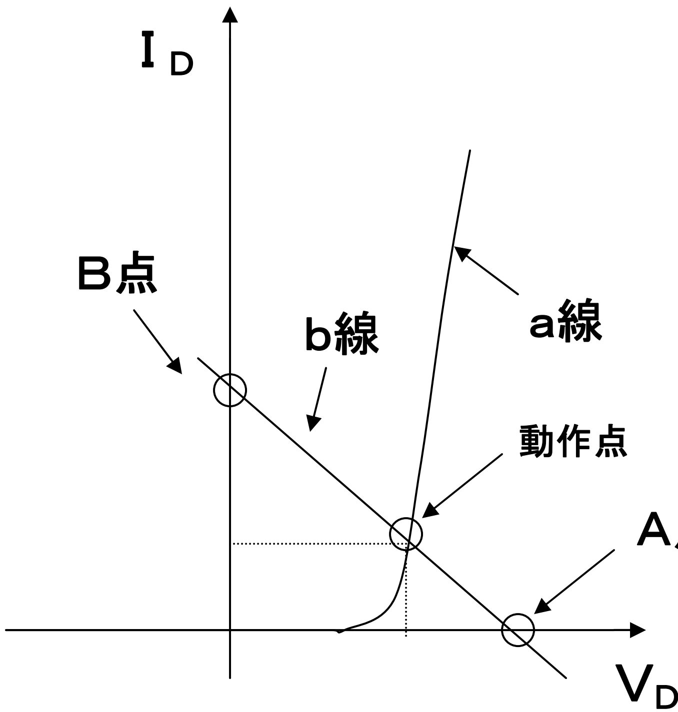
次に、V_D＝0の場合には $R_D = \dfrac{V_D}{I_D}$ なる関係から

$$I_D = \frac{4}{80} = 0.05 = 50 \cdot 10^{-3} \quad [\mathrm{A}]$$

であり、この点をB点にプロットできる。



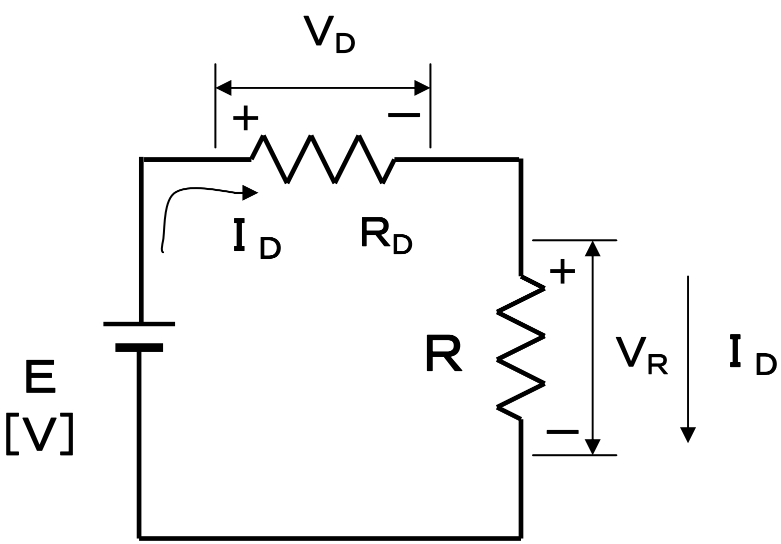

I_D [mA]
50
40
30
20
10
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1
2
3
4
5
V_D [V]



これより、A点（I_D＝0、V_D＝4）とB点（I_D＝50mA、V_D＝0）を結ぶ直線を引くとb線になる。

a線とb線の交点におけるI_DおよびV_Dが本回路が動作時におけるダイオード自身にかかる電圧および電流であり、I_{DQ}＝I_D＝40mA、V_{DQ}＝V_D＝0．8Vと読み取ることが出来る。

これより、先のキルヒホッフの第2法則を証明する。先の（1）式より

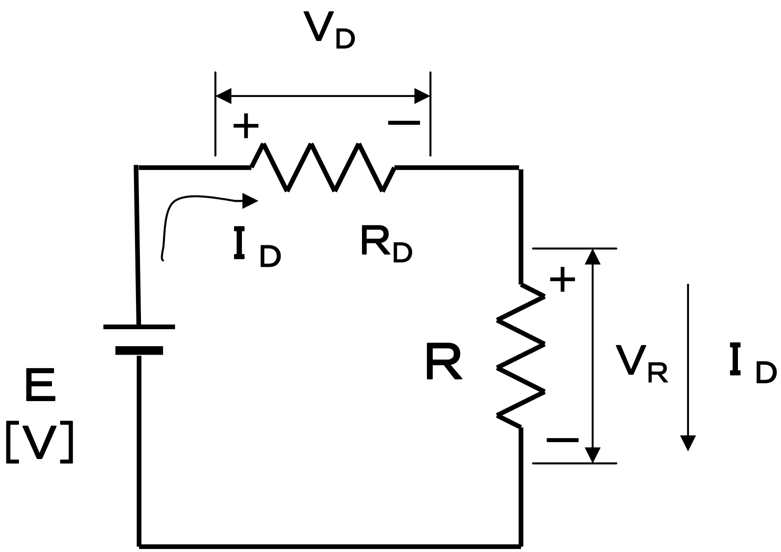


$$E = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D$$ であるから、

$$V_R = E - V_D = 4 - 0.8 = 3.2[V]$$

となり、抵抗に印加される電圧V_Rが分かる。さらに、ダイオードの抵抗値は

$$R_D = \frac{V_D}{I_D} = \frac{0.8}{4 \cdot 10^{-3}} = 200[\Omega]$$ となる。



このR_Dを等価抵抗と呼ぶことにすると、直流電源を接続時において、動作点における回路内の電流および電圧は、キルヒホッフの法則である

$$E = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D$$

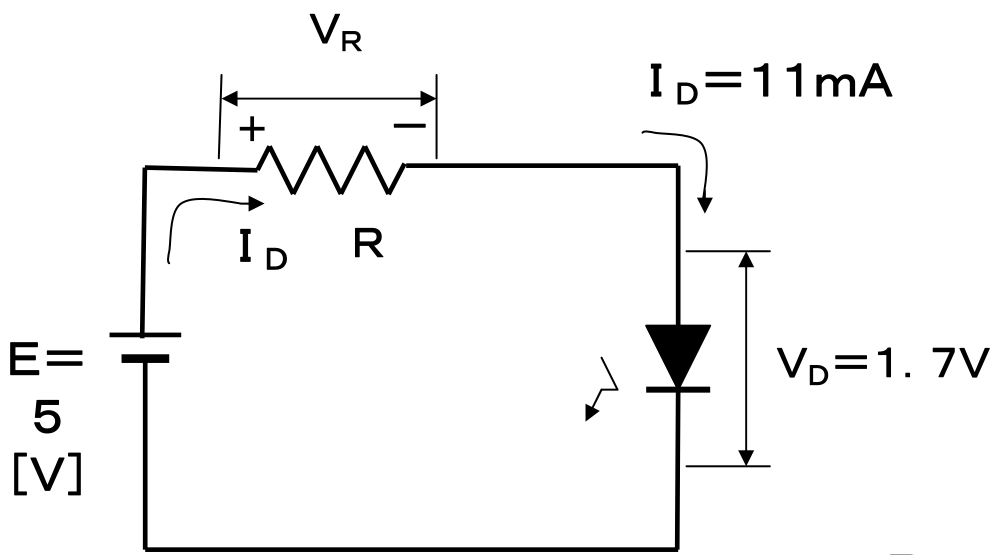
を満足している。すなわち、たとえば

$$4 = \underbrace{0.8}_{V_D} + \underbrace{3.2}_{V_R} = \underbrace{0.8}_{V_D} + \underbrace{80}_{R} \cdot \underbrace{40 \cdot 10^{-3}}_{I_D}$$

である。

例題6

図の回路でLEDの順方向電圧V_D=1．7V、順方向電流I_D＝11mA
であった。この時の制限抵抗Rの値を求めよ。



回路方程式より

$$E = V_D + V_R = V_D + R \cdot I_D$$

であるから、E＝5V、V_D=1．7V、
I_D＝11mAを代入すれば

$$R = \frac{E - V_D}{I_D} = \frac{5 - 1.7}{0.011} = 300[\Omega]$$

を得る。