



i-PERC

電気通信大学

基礎電子工学CH-12

曾我部 東馬

電気通信大学

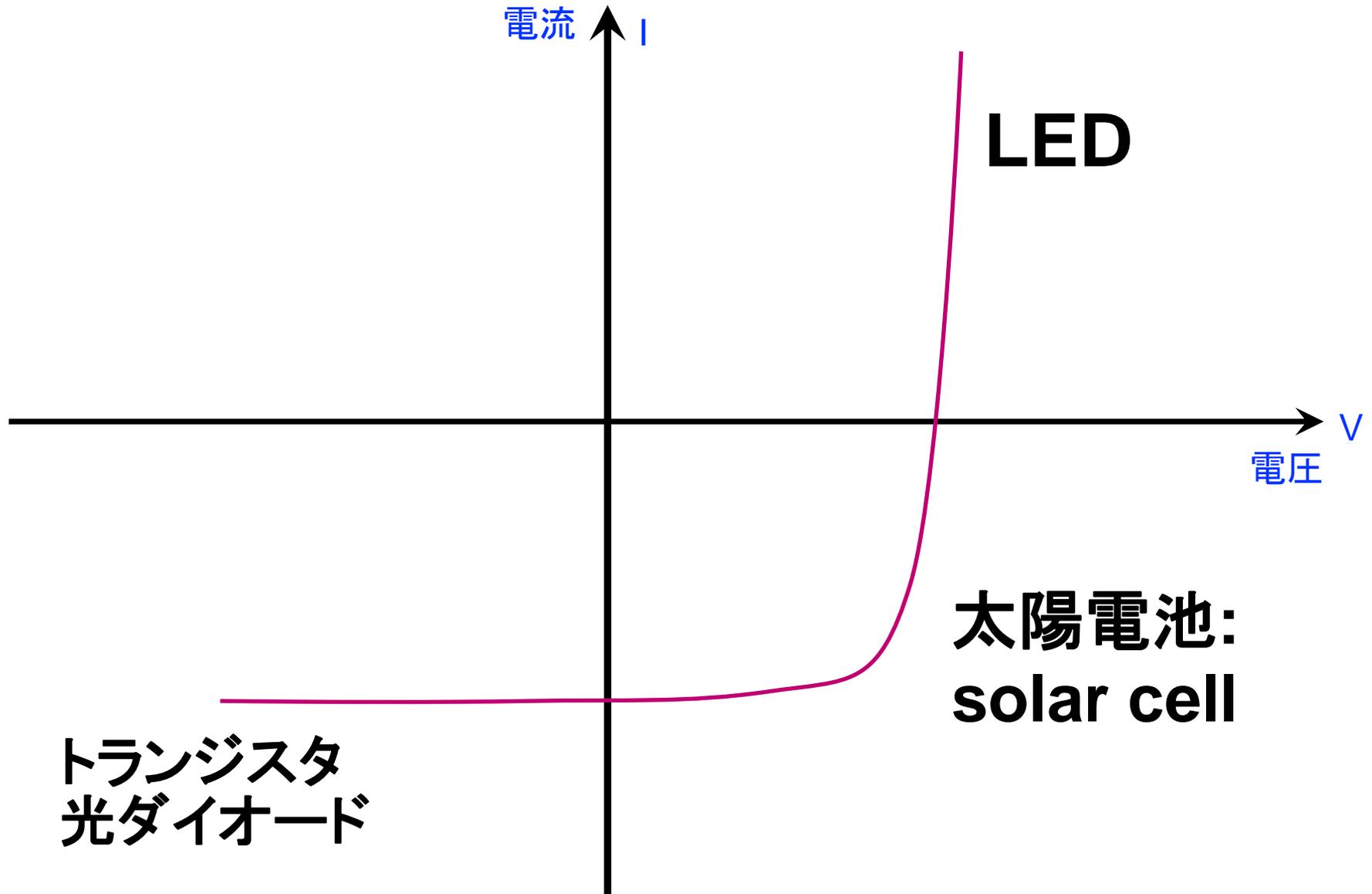
i-パワードエネルギーシステム研究センター(i-PERC)

概要:

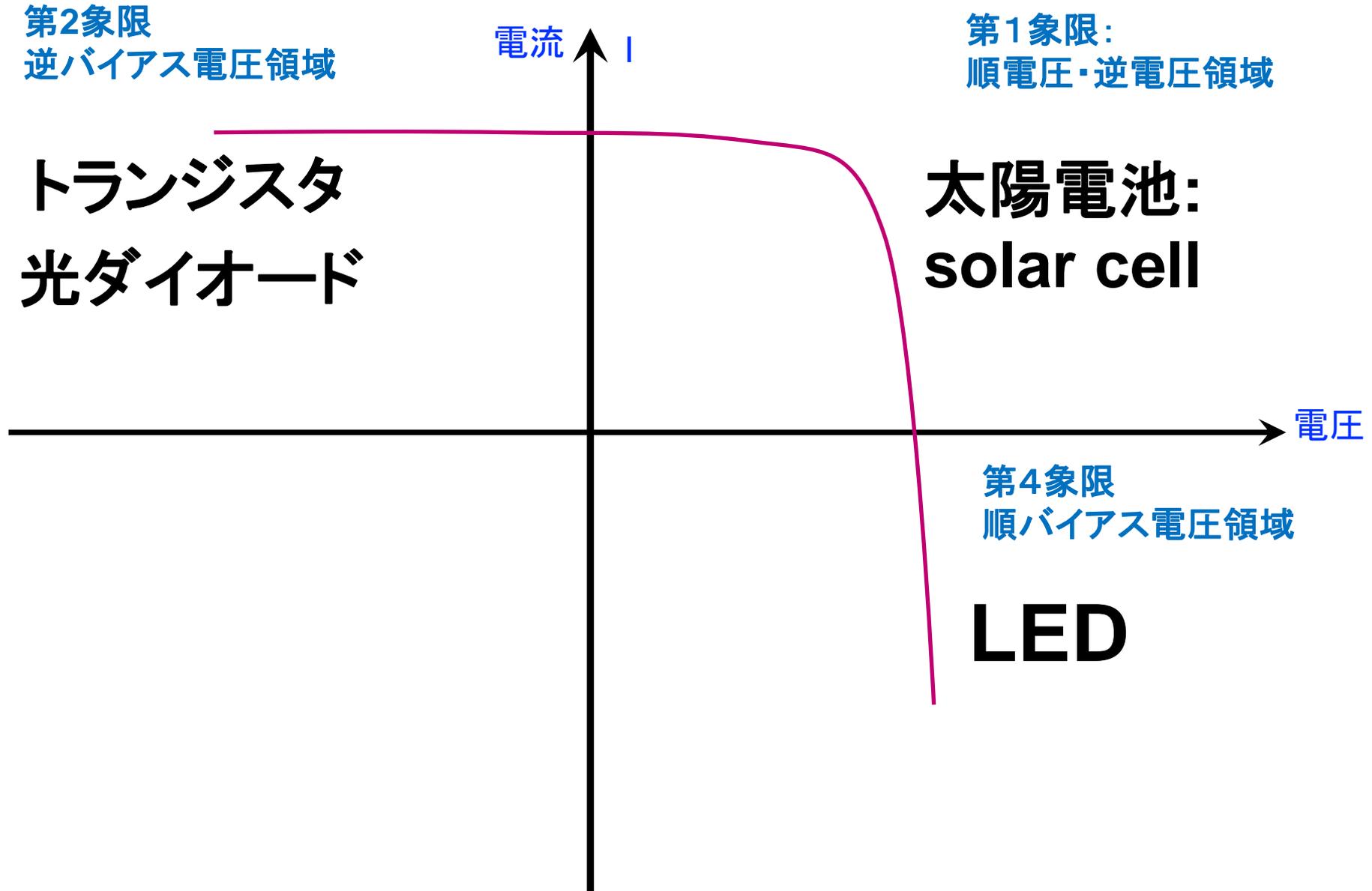
PN接合を元にした半導体デバイス

- 整流器
- LED, 光ダイオード、太陽電池
- バイポーラトランジスタ
- MOS-FETトランジスタ

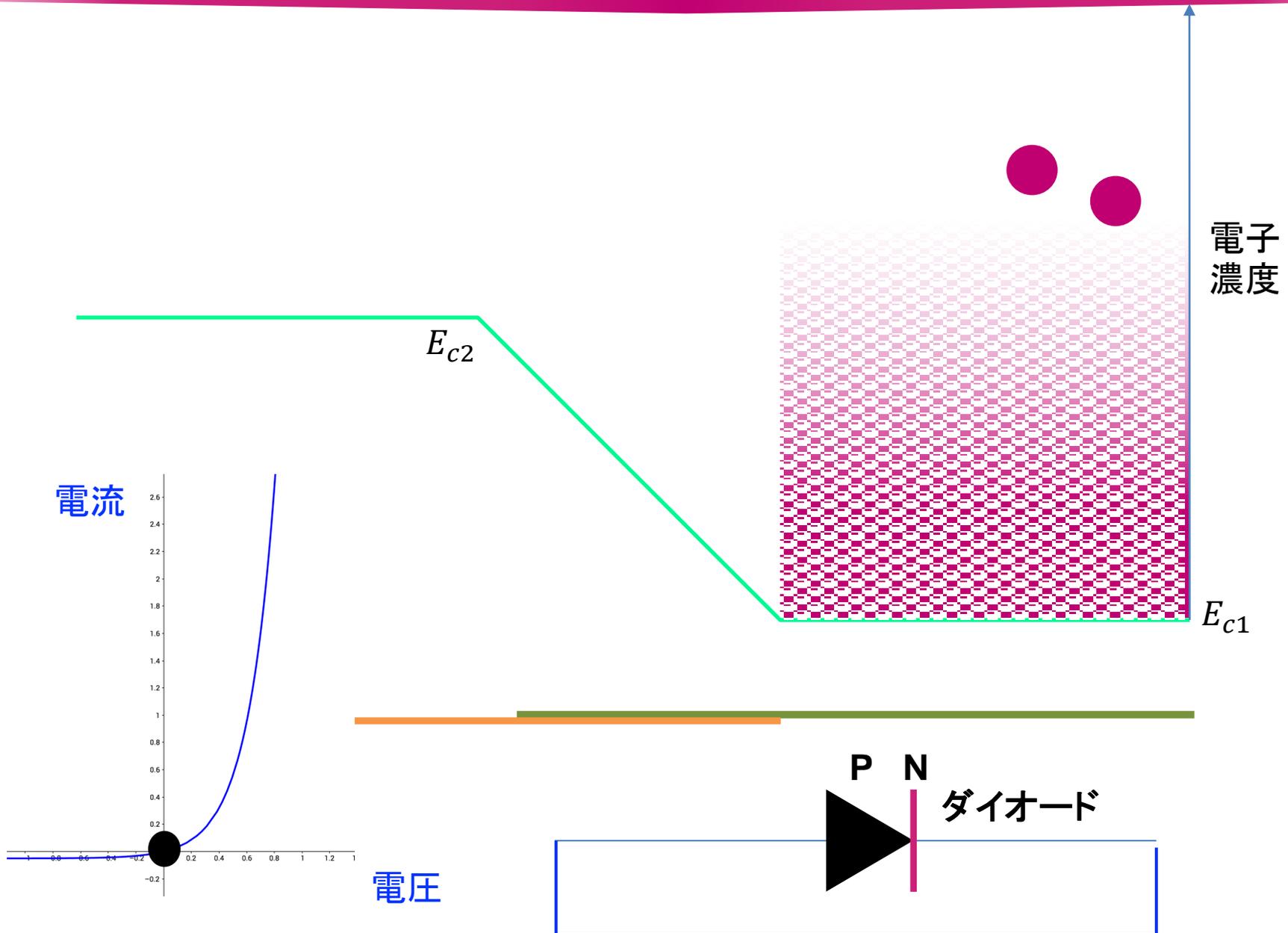
象限からみた半導体デバイスの分類



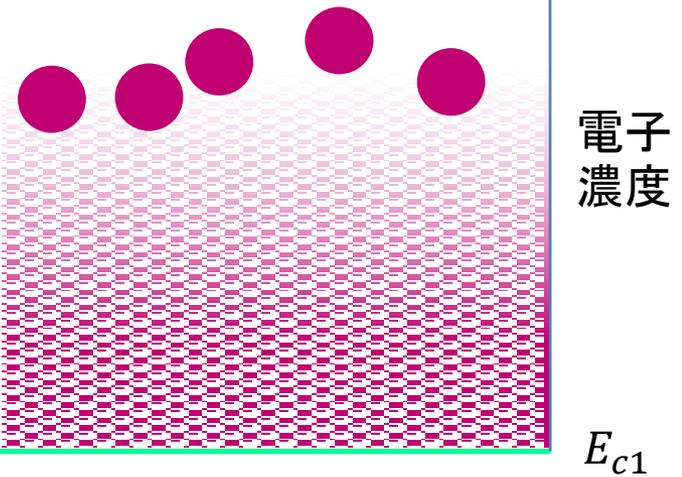
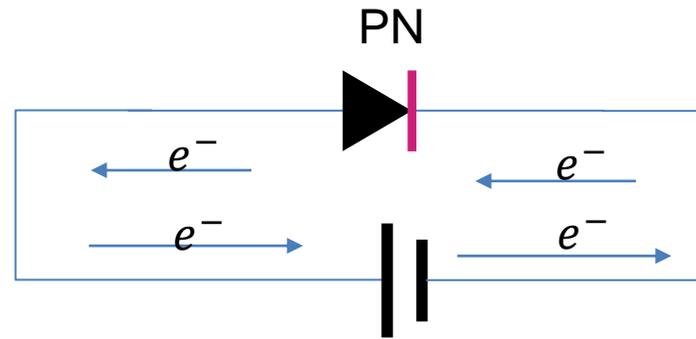
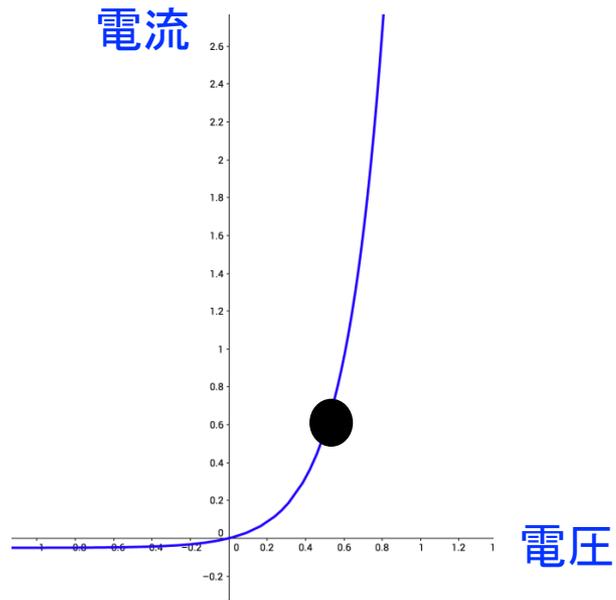
象限からみた半導体デバイスの分類



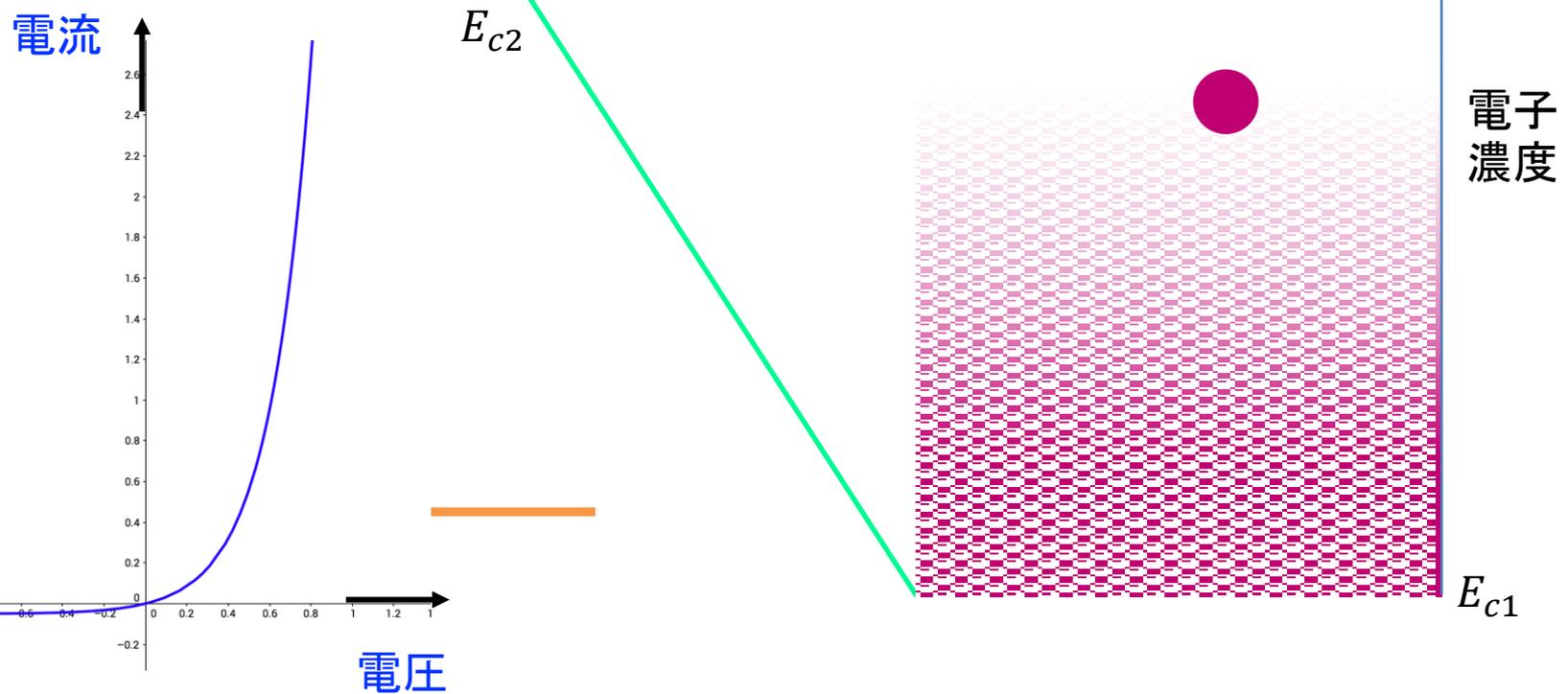
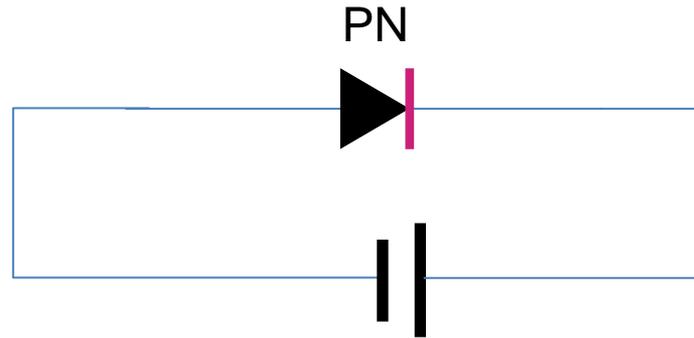
PN接合→PN ダイオード (diode)



PNダイオード: 順方向電圧 $V > 0$



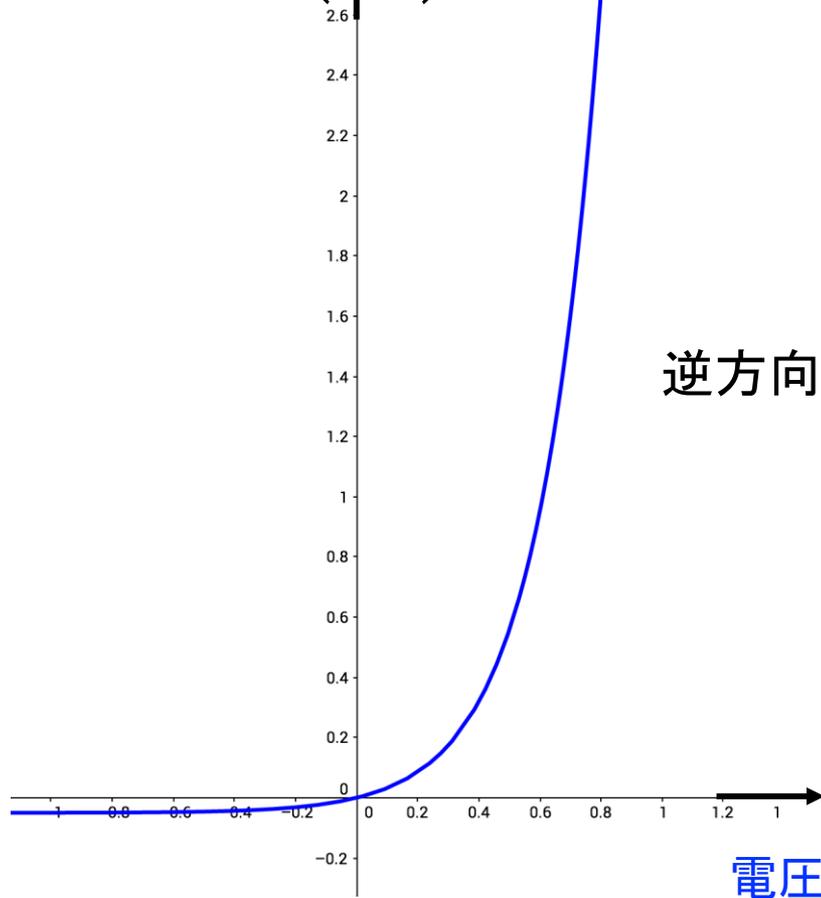
PNダイオード: 逆方向電圧 $V < 0$



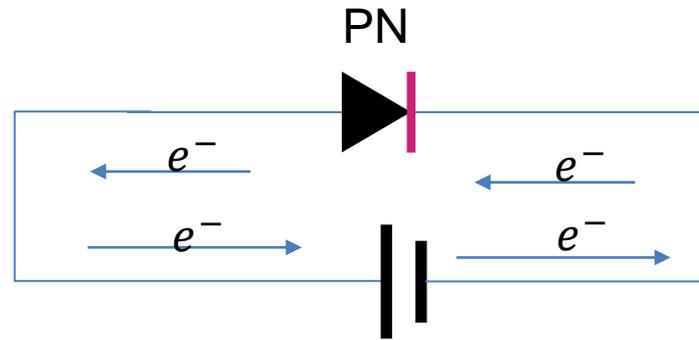
整流特性:

$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

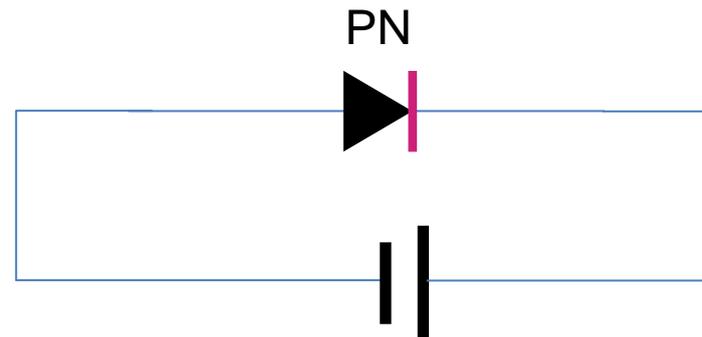
電流



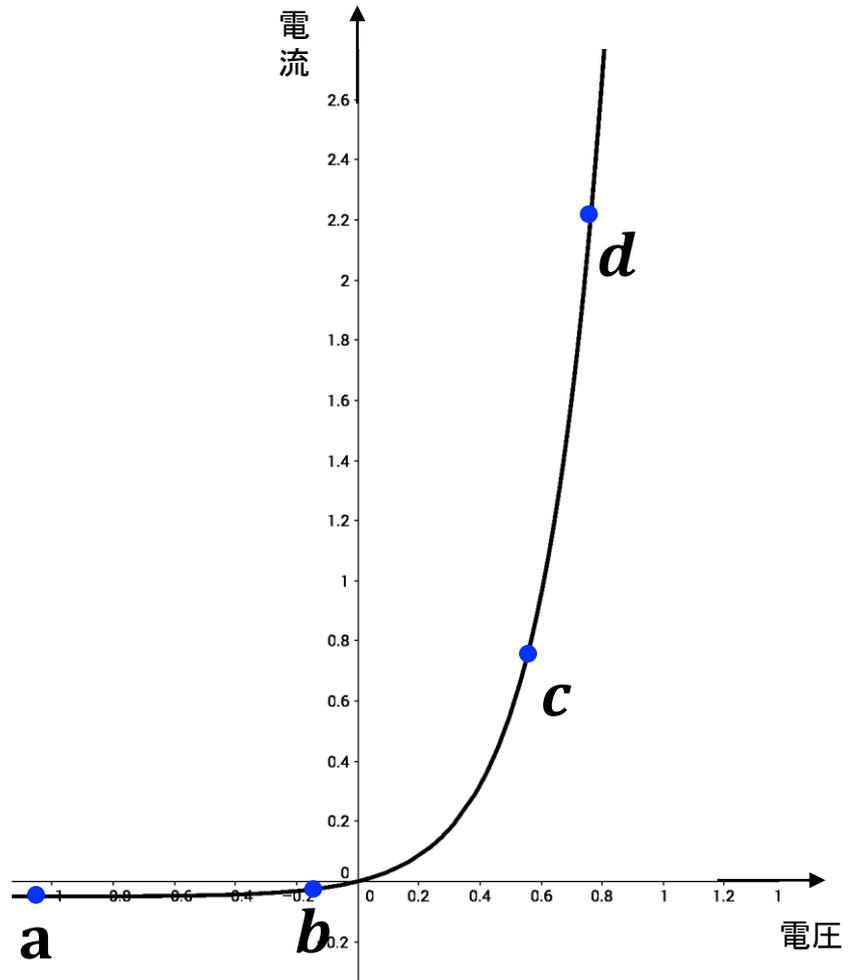
順方向電圧($V > 0$)を与えると、電流が流れる

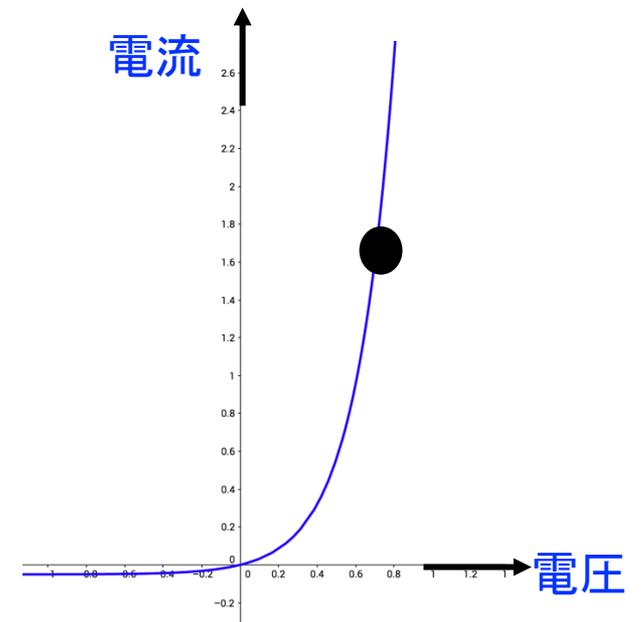
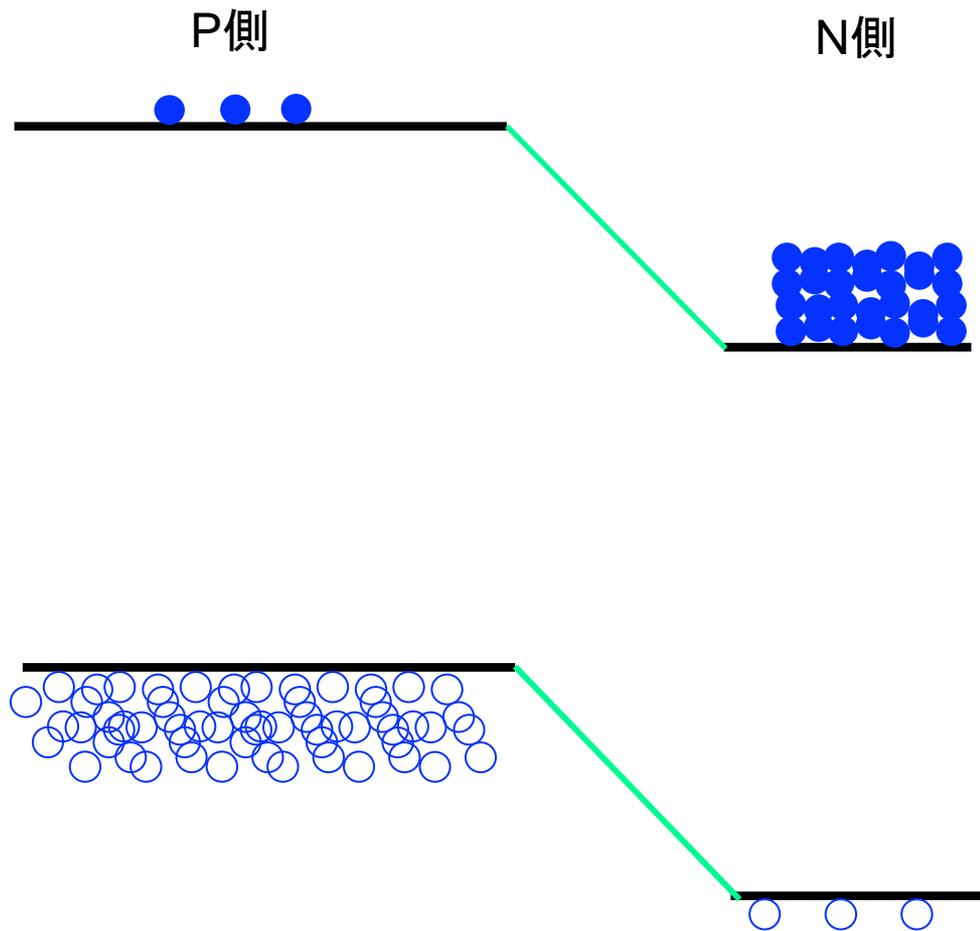


逆方向電圧($V < 0$)を与えると、電流が殆ど流れない

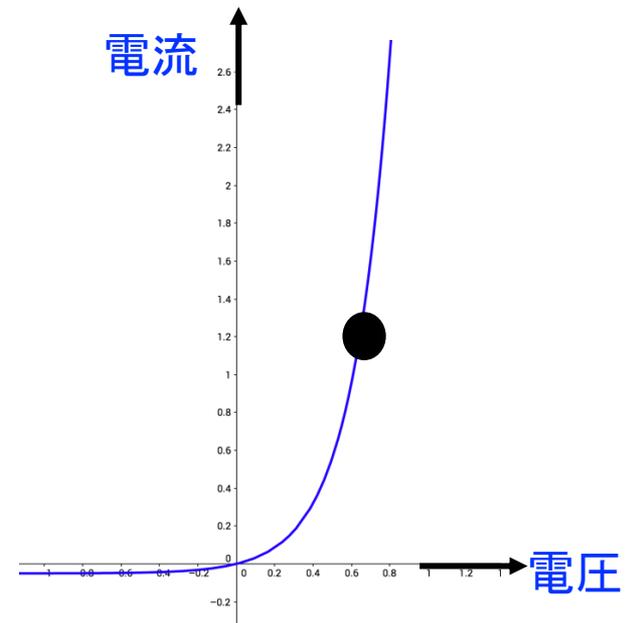
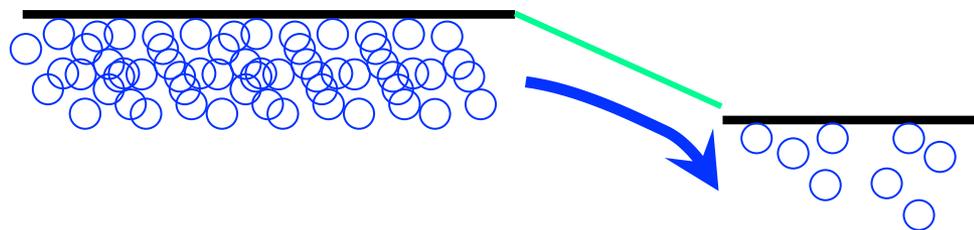
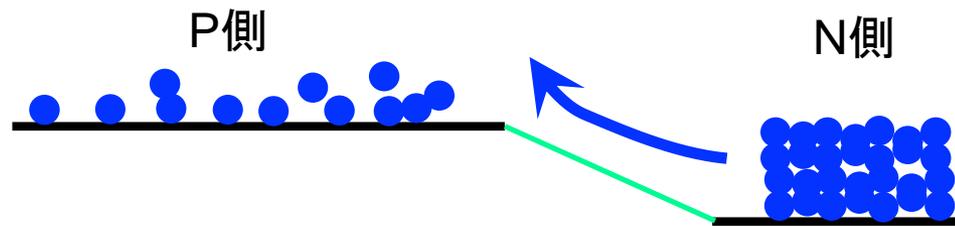


ダイオード、トランジスタ等の半導体デバイスに広く応用されている。

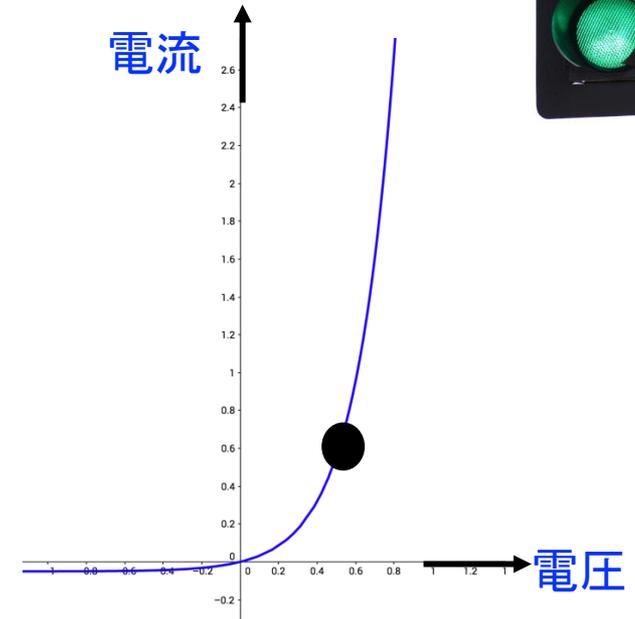
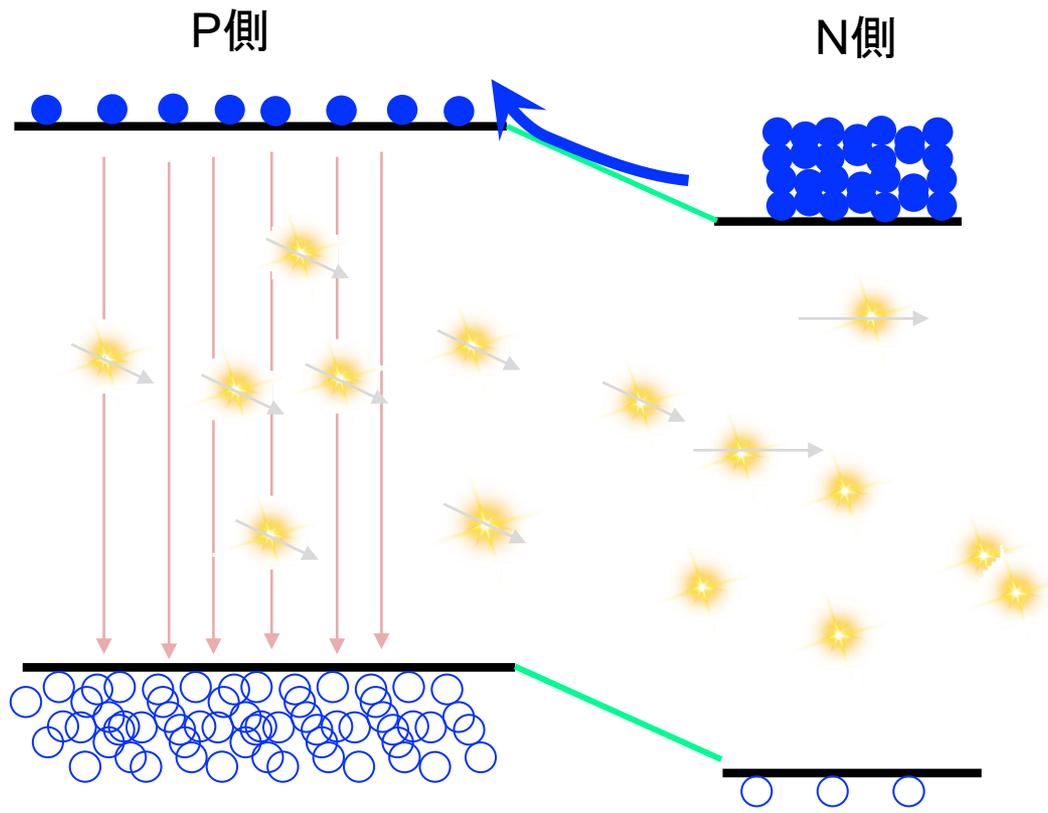




順方向電圧 $V > 0$



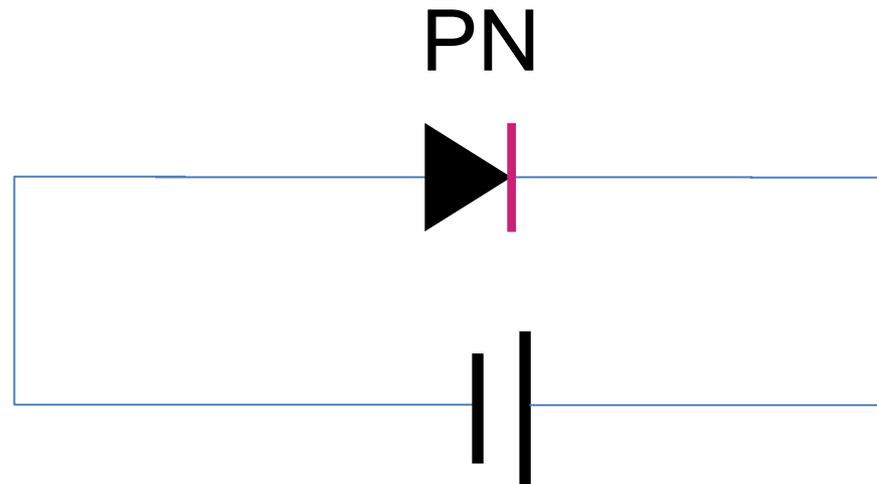
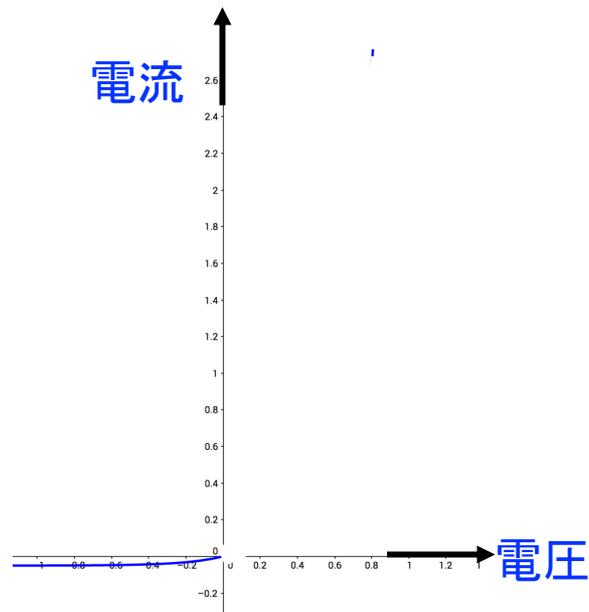
順方向電圧を印可の応用：LED



LED: 順方向電圧を印可し、少数キャリアをN側からP側に注入する。

逆バイアス(電圧)のもう一つの重要な役割:

逆方向電圧を与えると、電流が殆ど流れない



$$J$$

$$= J_s \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

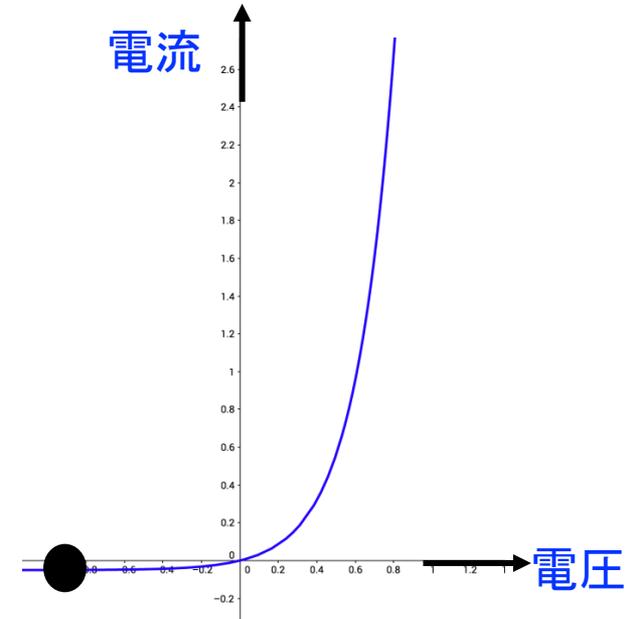
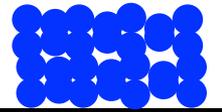
逆方向電圧を与えると、電流が絶対通らない訳ではないことに注意してください。。

逆方向電圧 $V < 0$

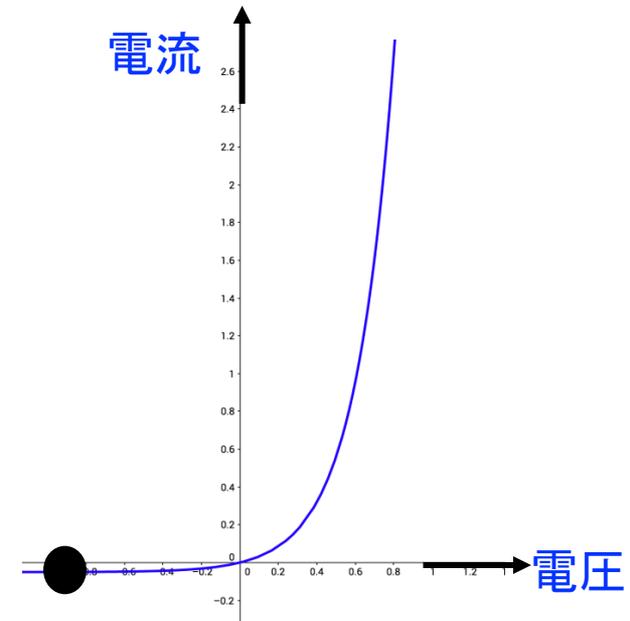
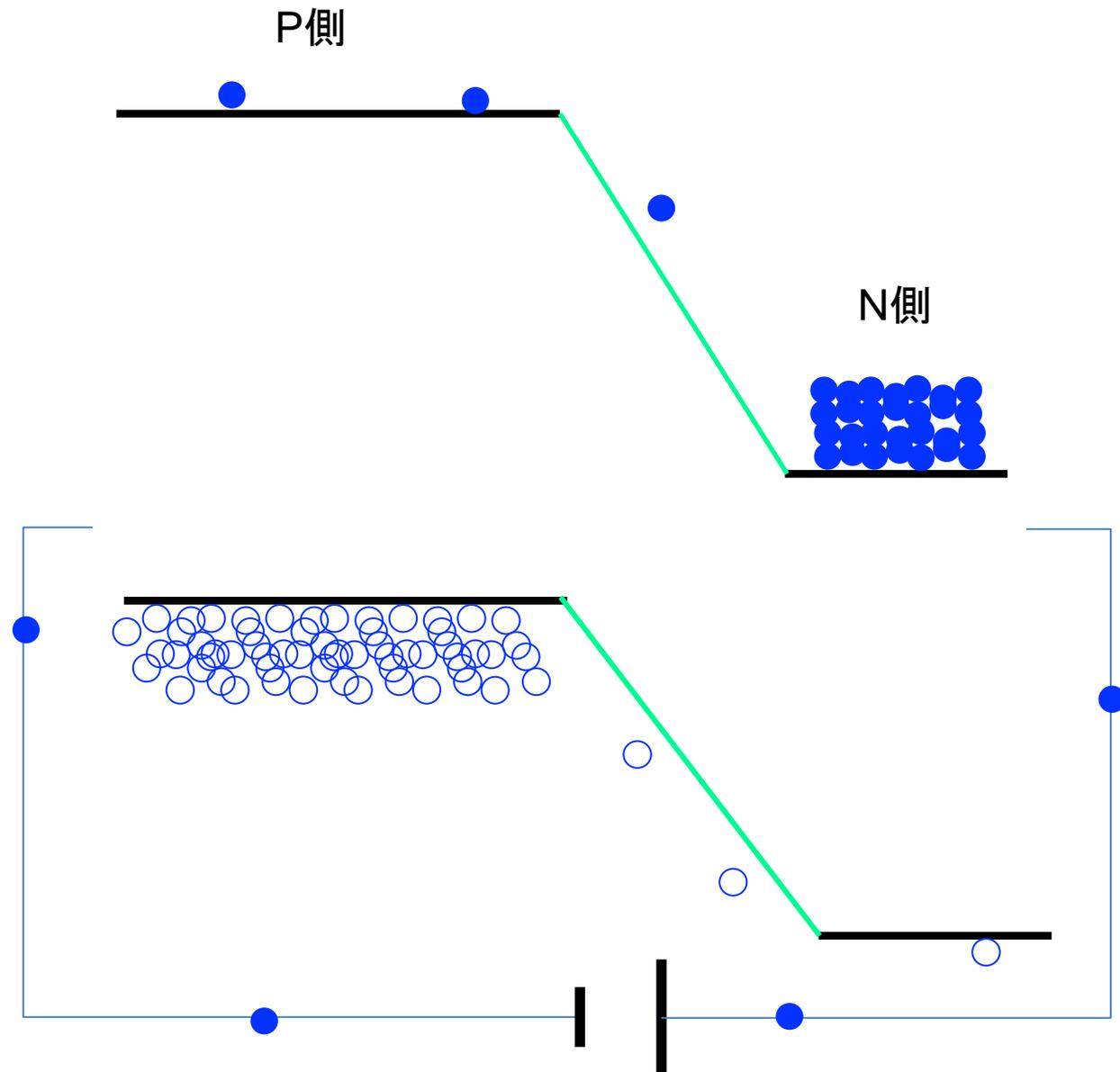
P側



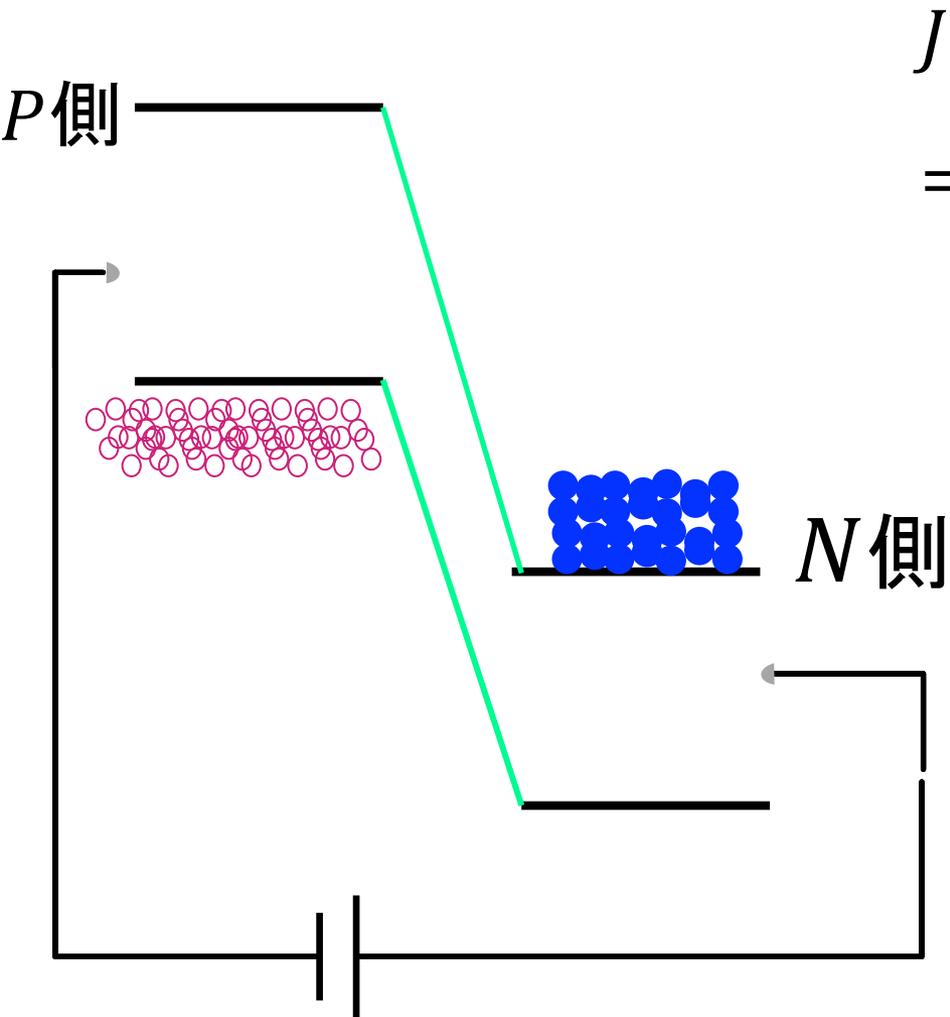
N側



逆方向電圧 $V < 0$



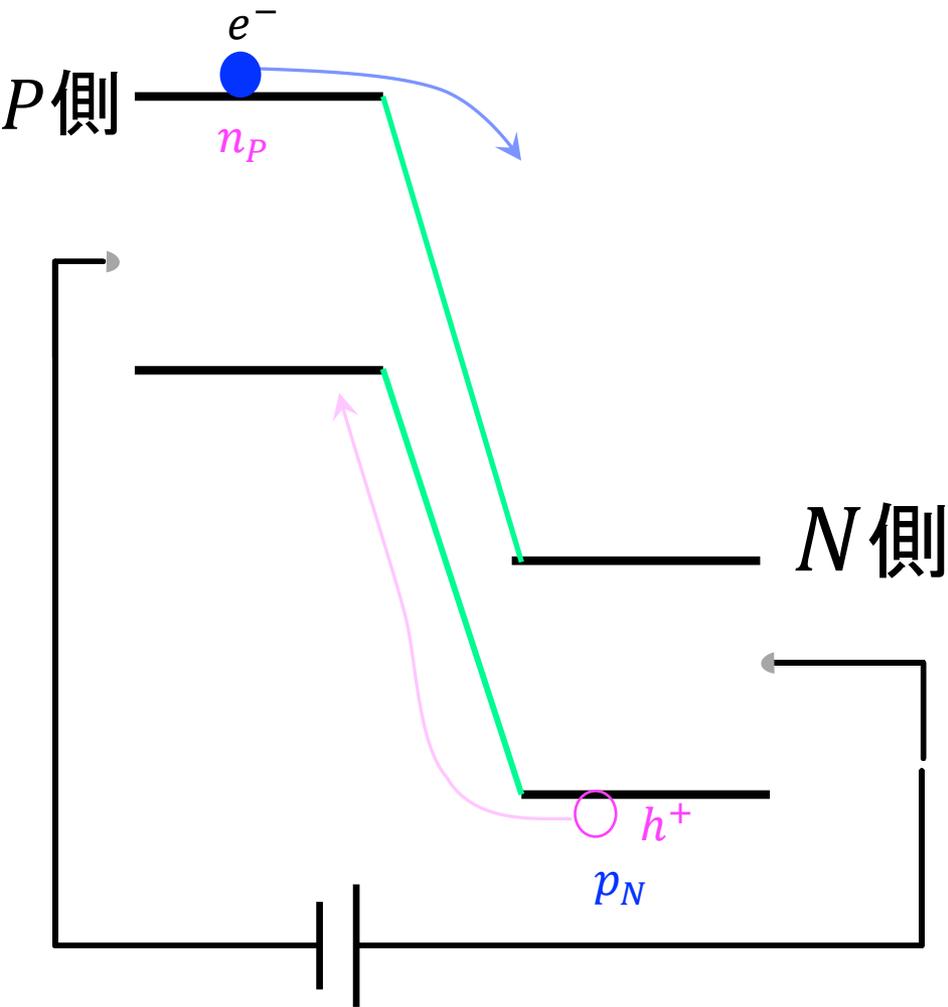
J_s の正体は



$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

逆方向電圧: 巨大

J_s の正体は



逆方向電圧: 巨大

$$J = -J_s$$

$$J_s = q \left(\frac{D_n n_i^2}{l_n N_a} + \frac{D_p n_i^2}{l_p N_d} \right)$$

$$\frac{D_n n_i^2}{l_n N_a} = \frac{D_n}{l_n} n_p$$

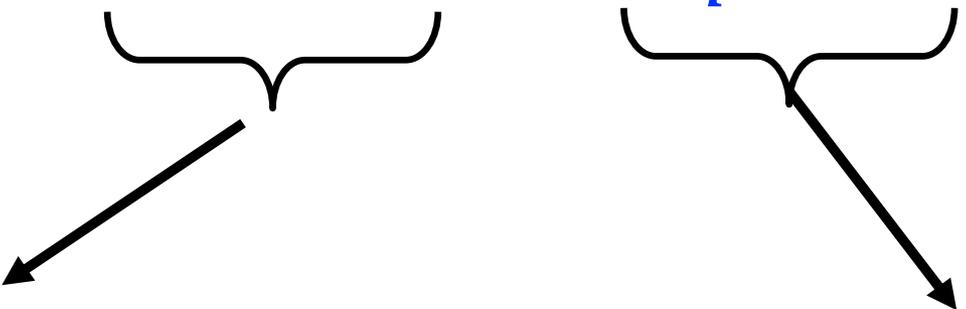
$$\frac{D_p n_i^2}{l_p N_d} = \frac{D_p}{l_p} p_N$$

$$\sqrt{D\tau} = l$$

$$\frac{D}{l} =$$

J_s が語っている物語：逆バイアス効果

$$J_s = q \left(\frac{D_n n_i^2}{l_n N_a} + \frac{D_p n_i^2}{l_p N_d} \right)$$

$$J_s = q \left(v_n n_P + v_p p_n \right)$$


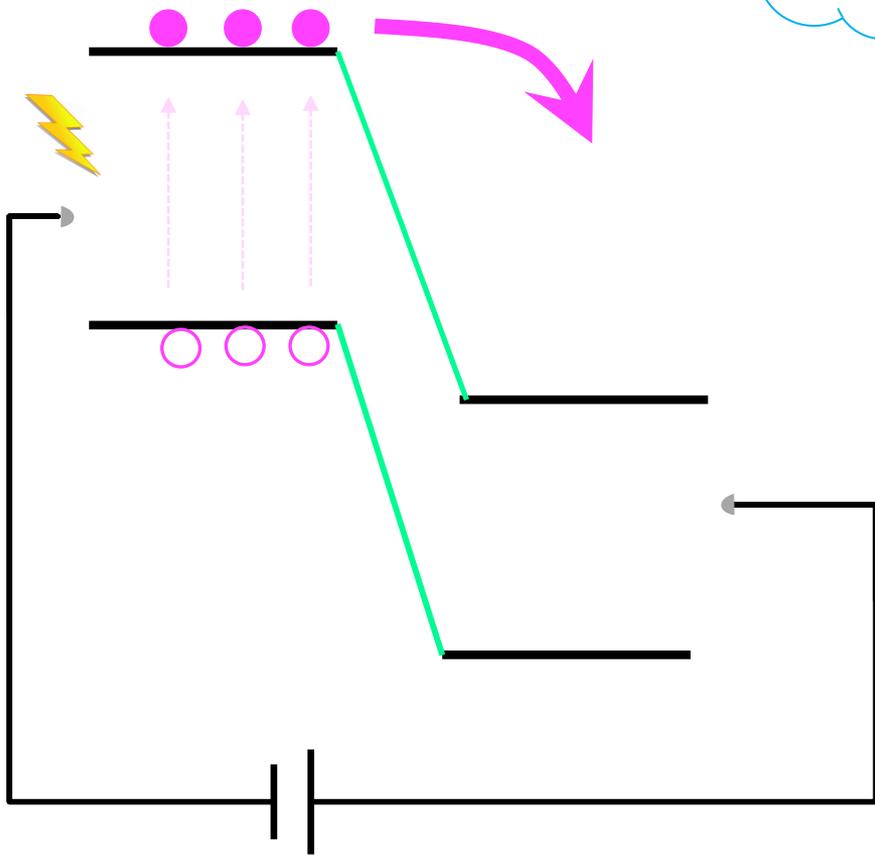
P側の固有の少数キャリアである電子 $\frac{n_i^2}{N_a}$ が電流を作っている。

N側の固有少数キャリアであるホール $\frac{n_i^2}{N_d}$ が電流を作っている

P側に少数キャリアを注入する: 光照射

$$J = -J_L + J_s \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

逆方向電圧: 大

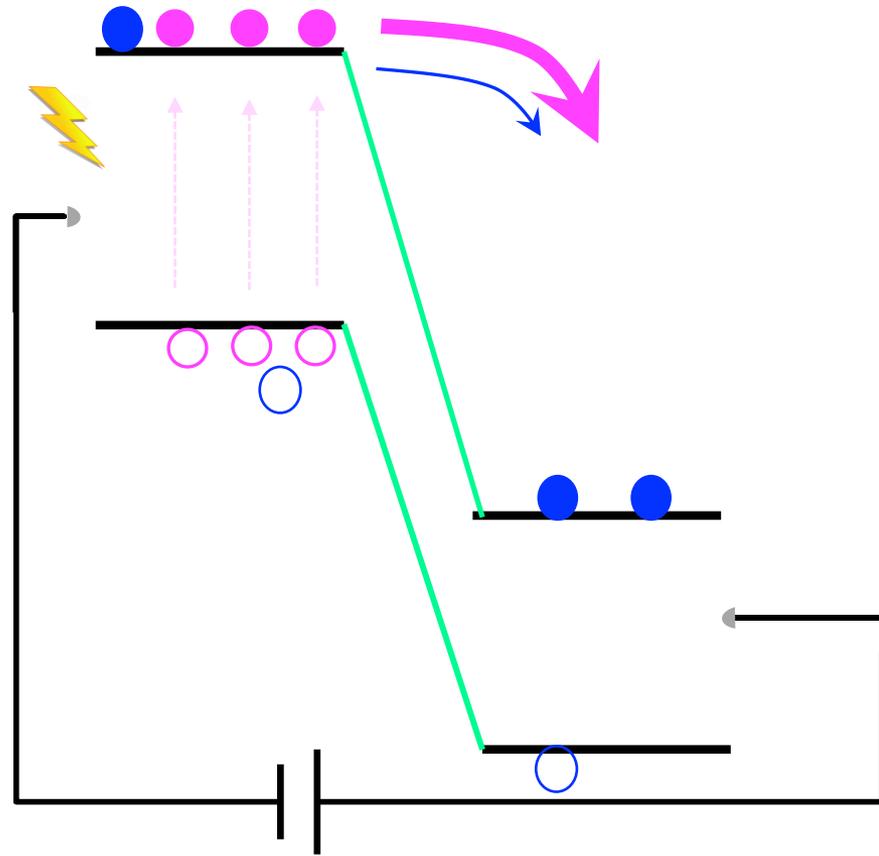


$$V = -10$$

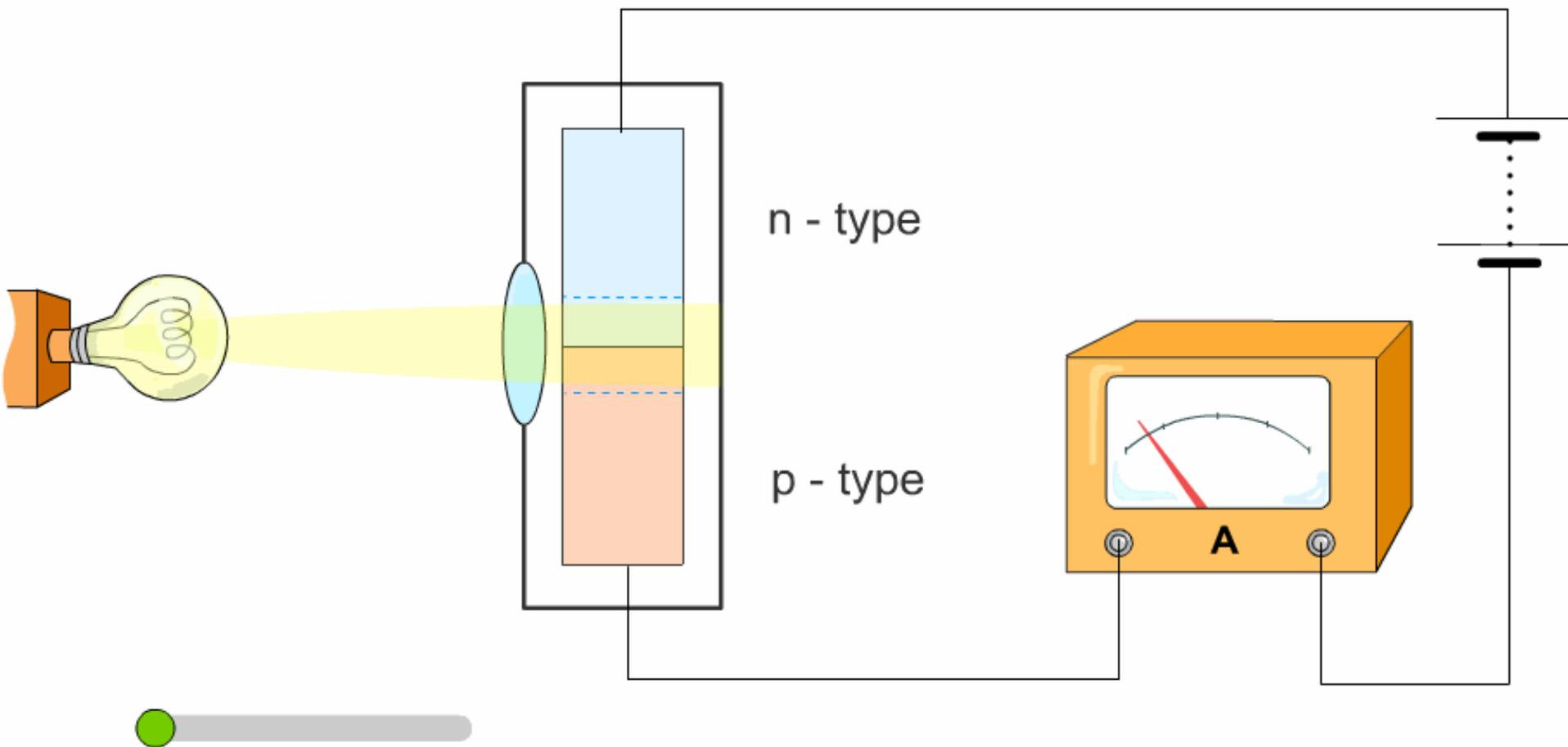
$$e^{-10} \approx 0$$

$$J = -J_L - J_s$$

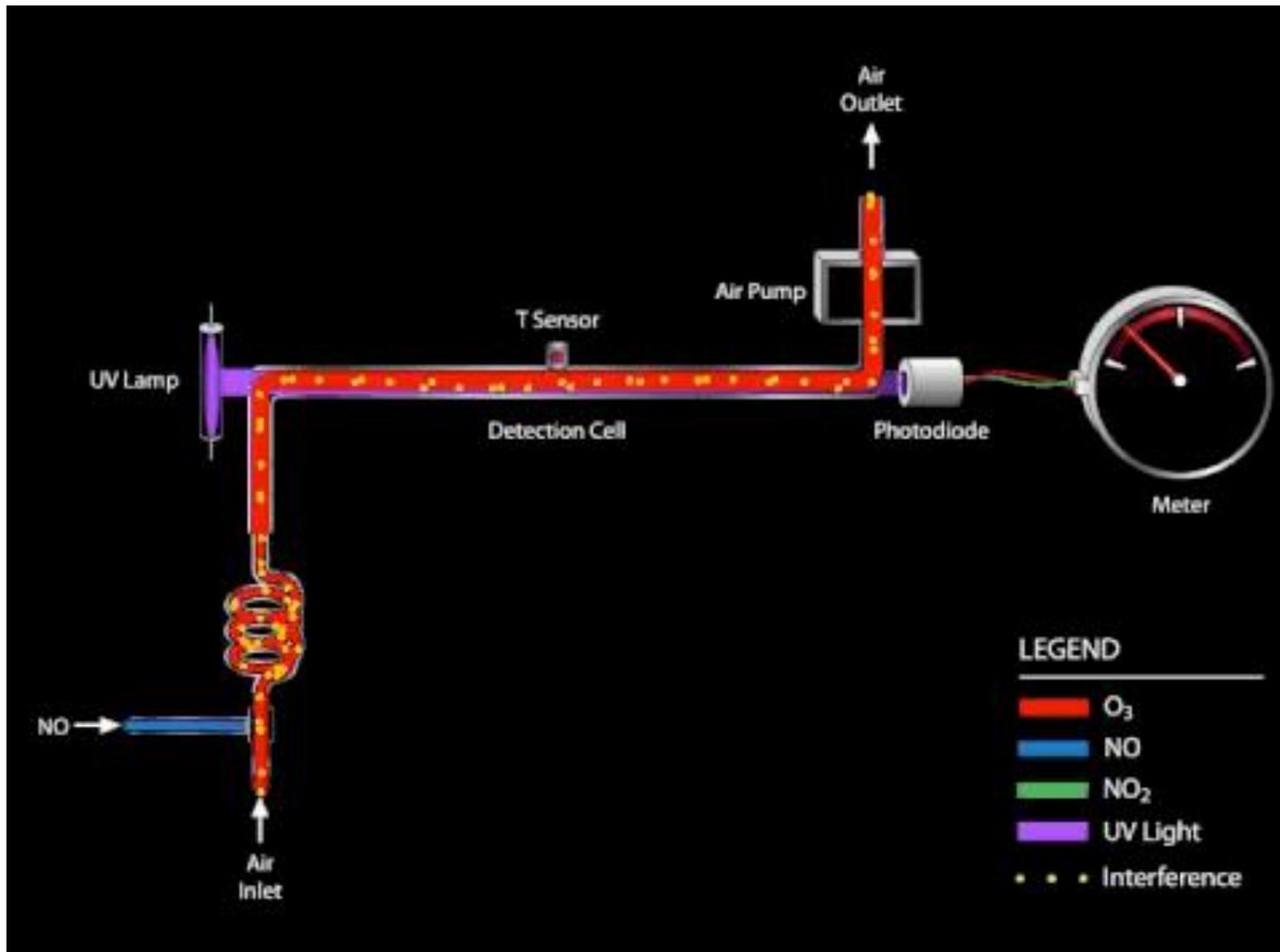
逆方向電圧: 巨大



光照射による少数キャリア生成@逆電圧:光ダイオード



光ダイオードの応用例: ガースセンサー

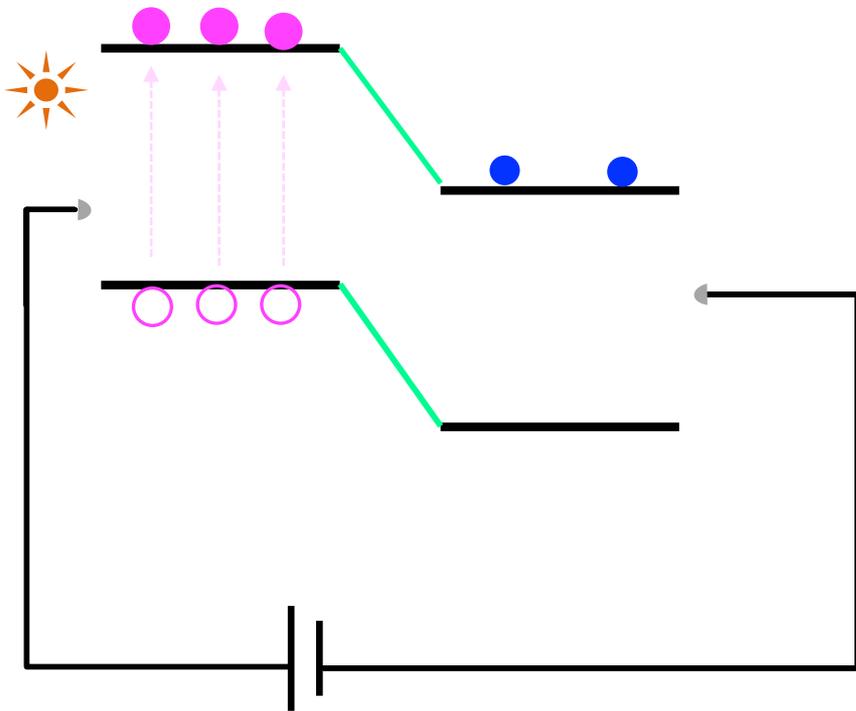




PN接合の応用例：太陽電池の原理

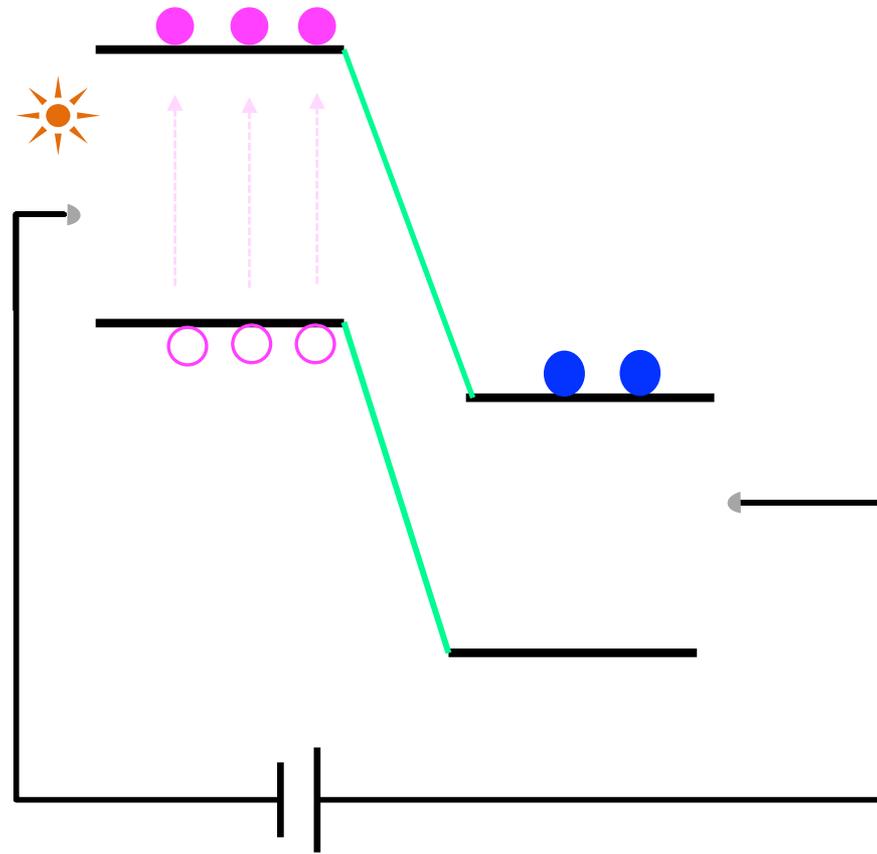
$$J = -J_L + J_s \left[\exp\left(\frac{V > 0}{kT}\right) - 1 \right]$$

順方向電圧



$$J = -J_L + J_s \left[\exp\left(\frac{V < 0}{kT}\right) - 1 \right]$$

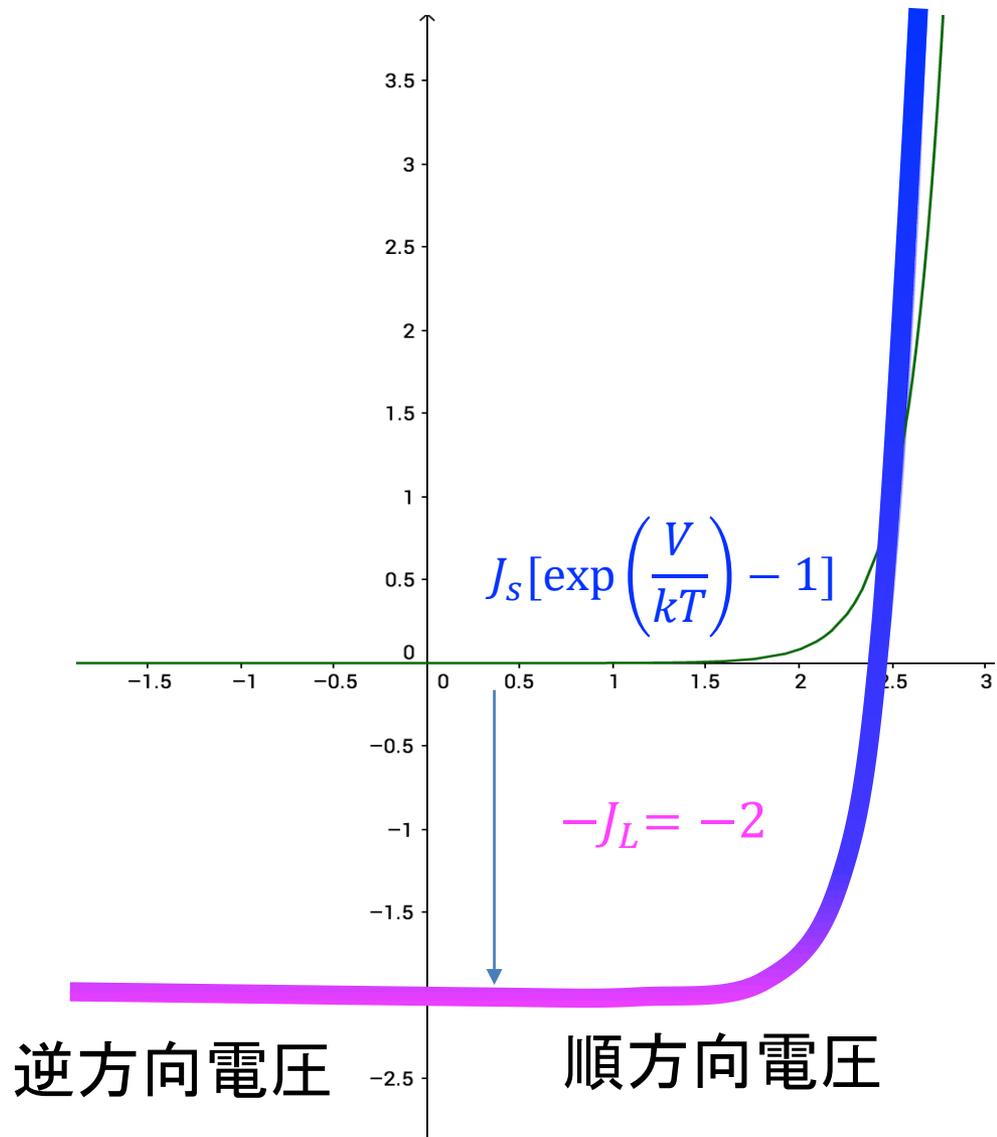
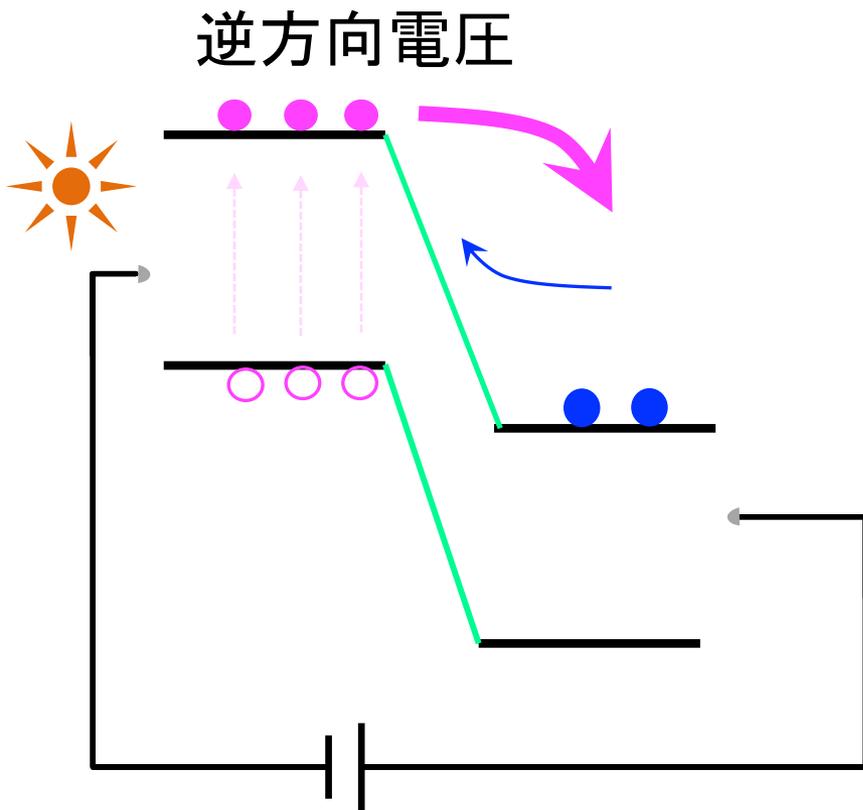
逆方向電圧



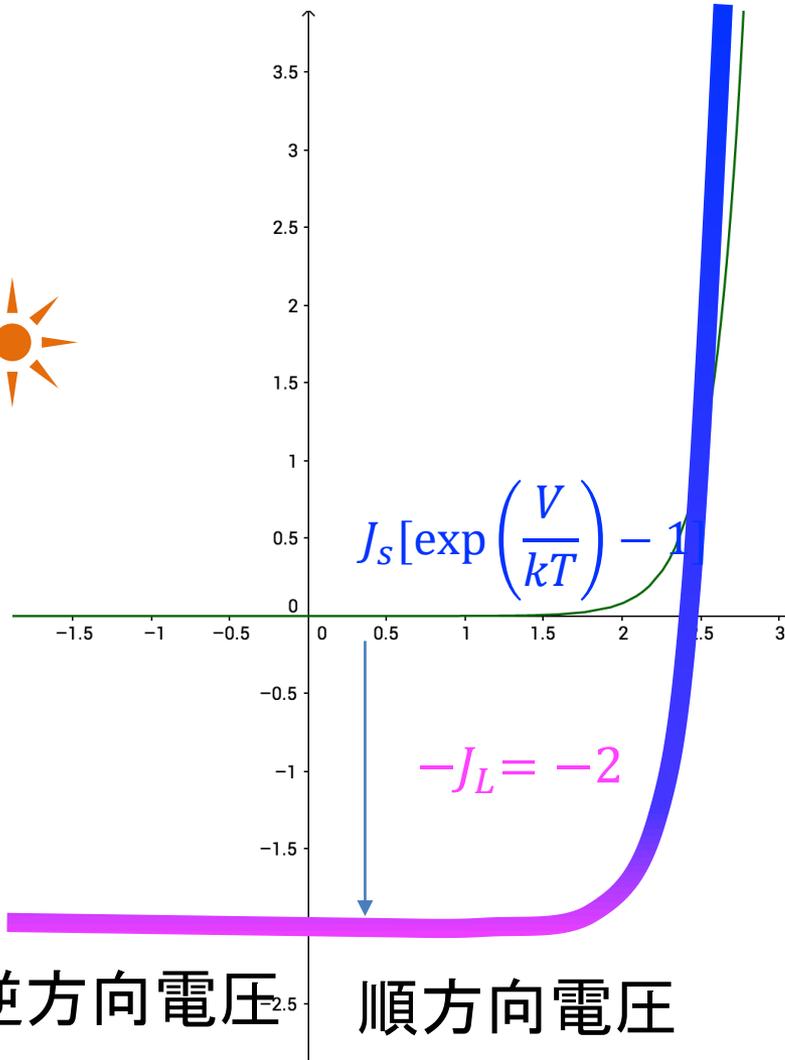
PN接合の応用例：太陽電池の原理

$$J = -J_L + J_s \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

$$J = -2 + 10^{-5} [\exp(5V) - 1]$$

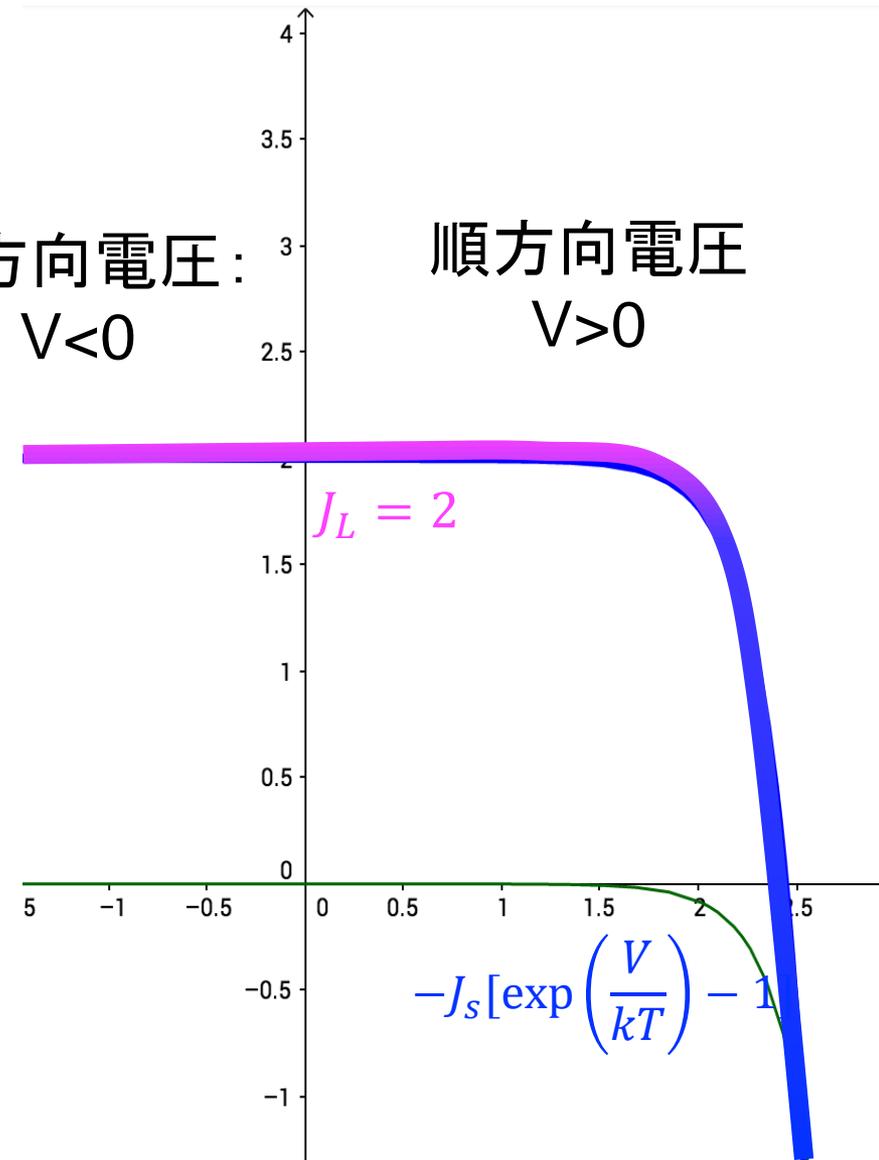


PN接合の応用例：太陽電池の原理

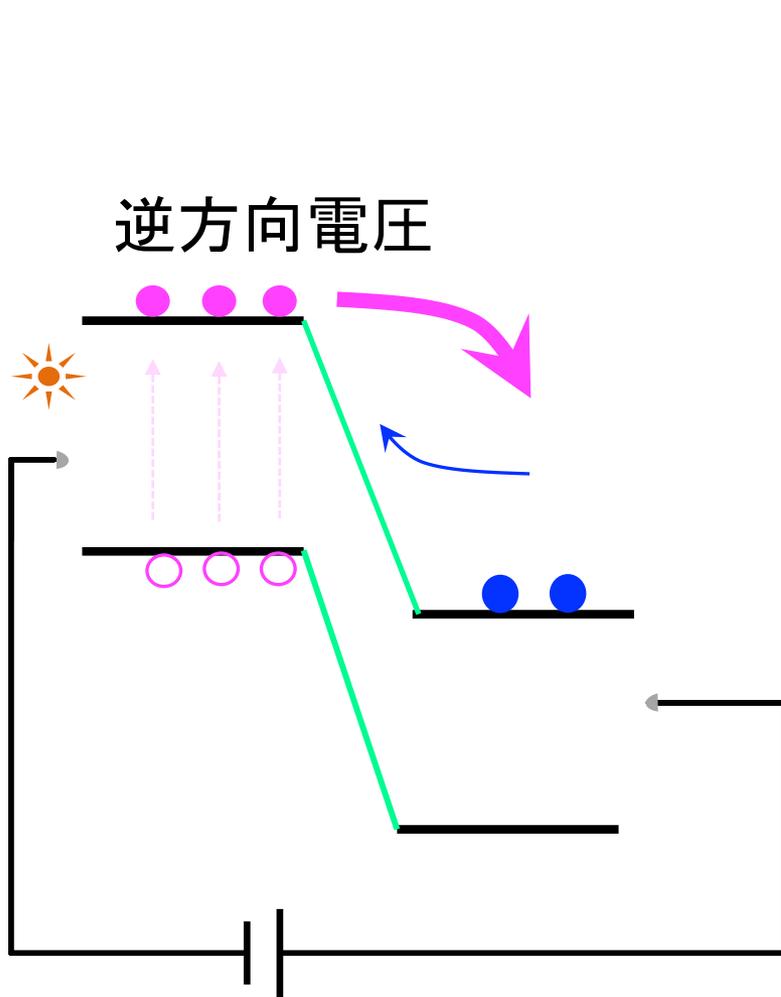


逆方向電圧：
 $V < 0$

順方向電圧
 $V > 0$

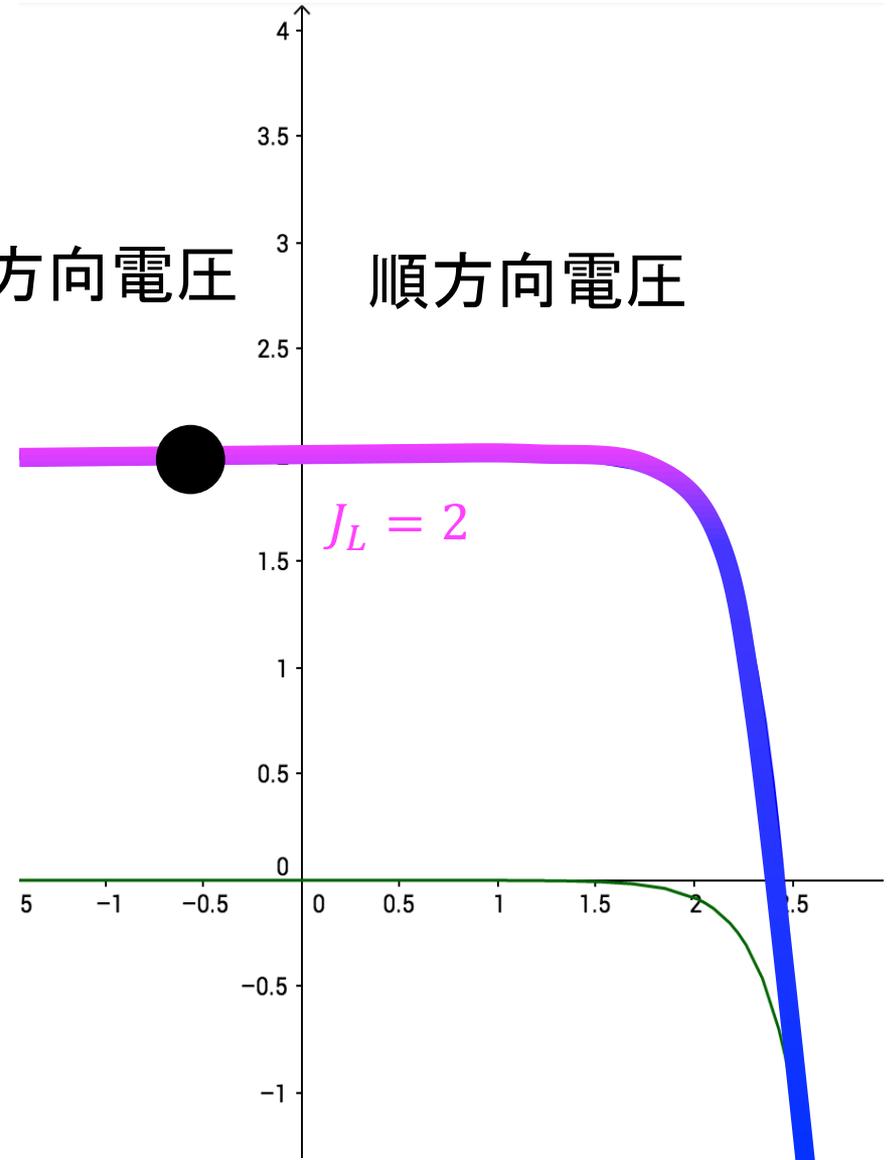


太陽電池：最大電流値を目指すなら、逆方向電圧をかけるべき



逆方向電圧

順方向電圧

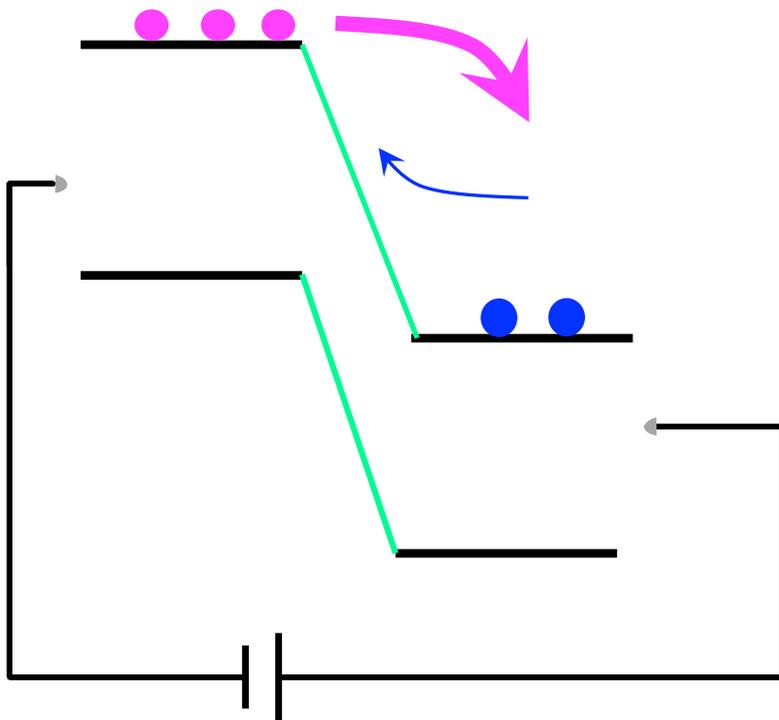


最大電流値を目指すなら、逆方向電圧をかけるべき

光励起による少数キャリアの生成

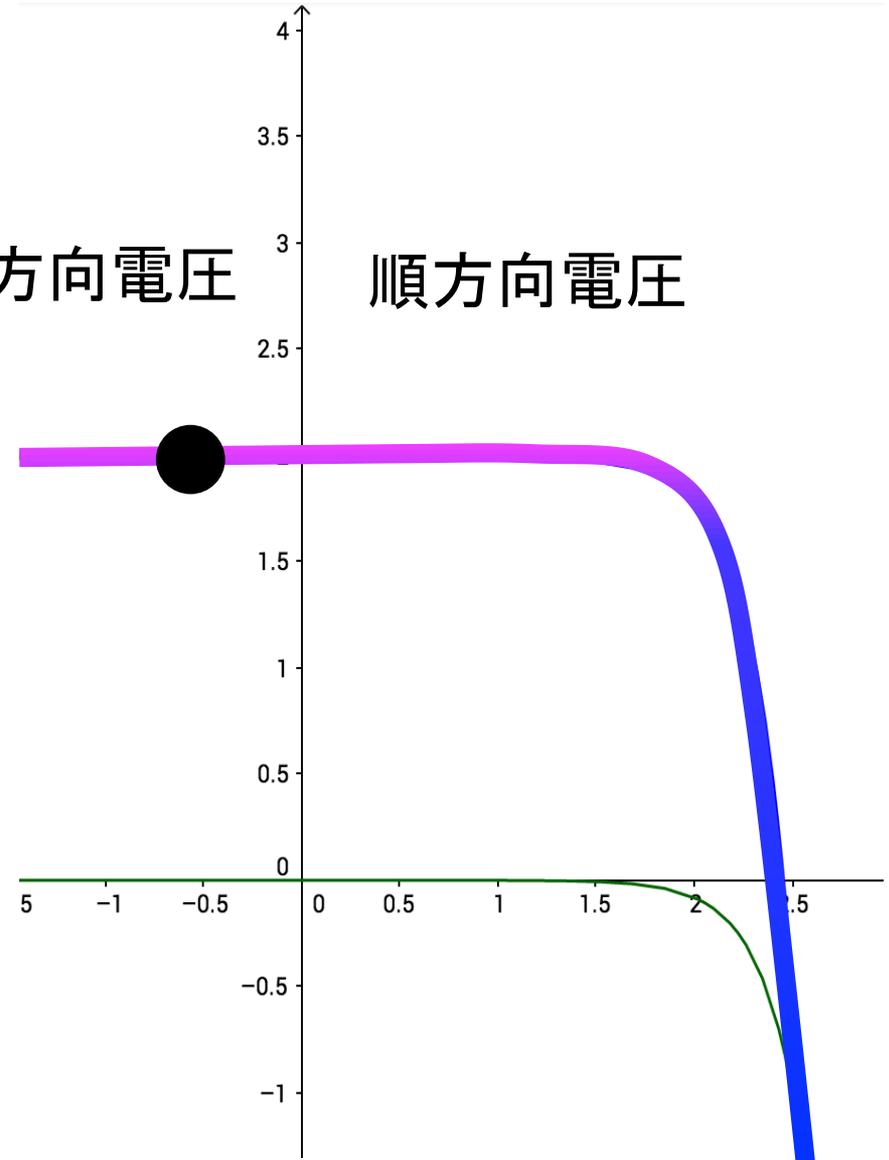
PN接合によって少数の注入

逆方向電圧



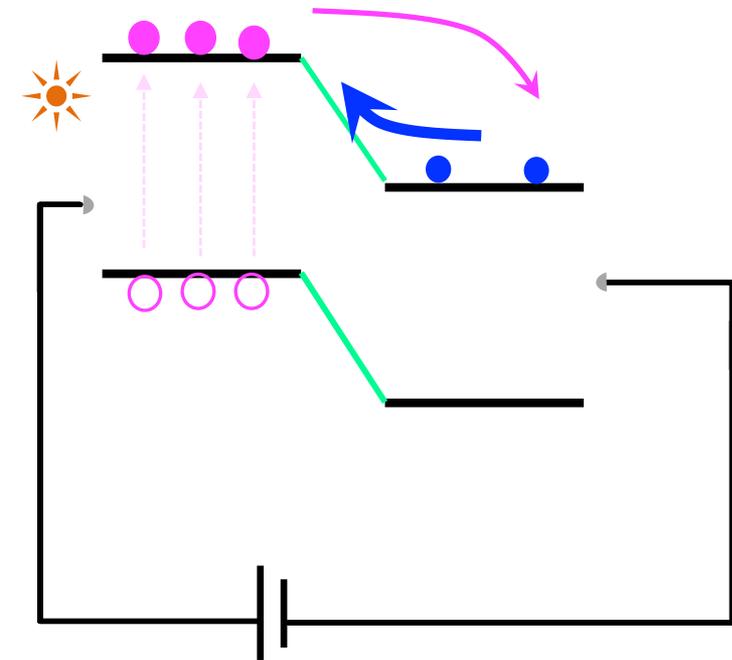
逆方向電圧

順方向電圧



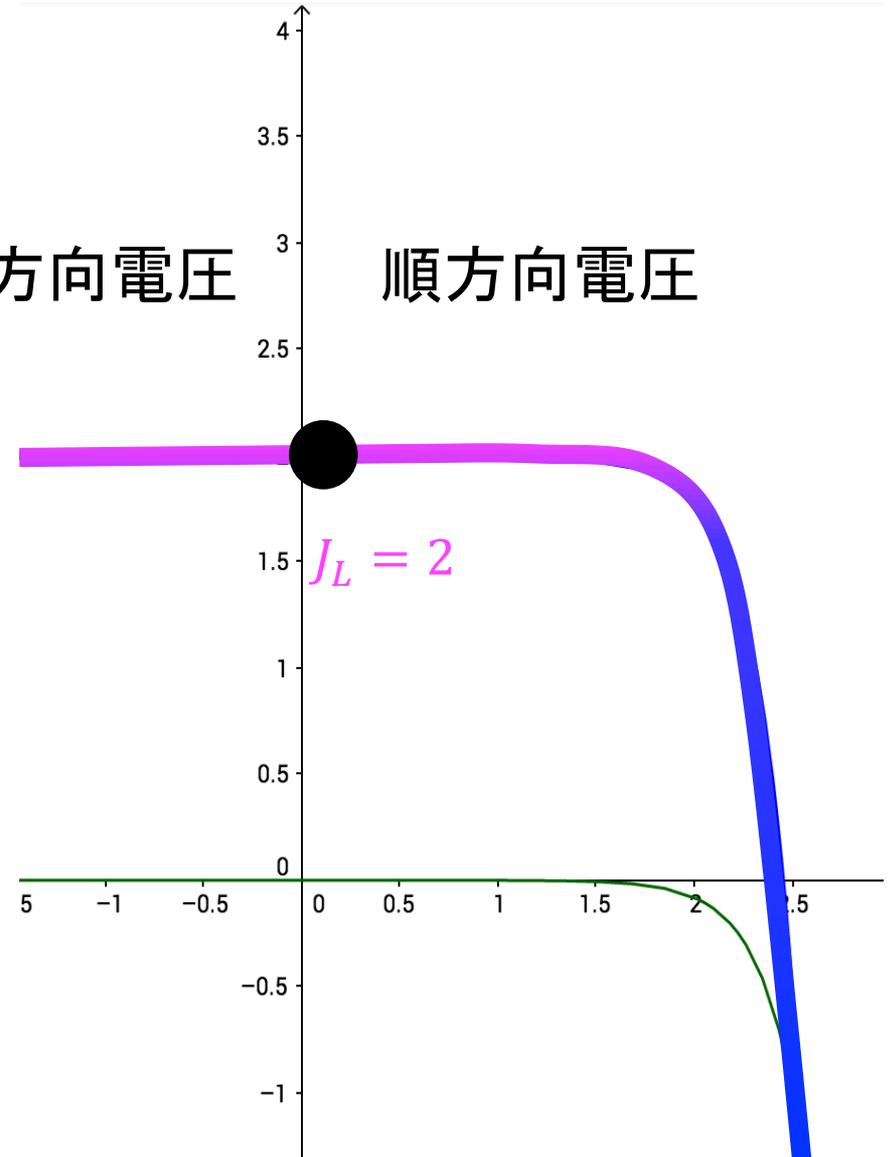
太陽電池：最大出力($I \times V$)を目指すなら、順方向電圧をかけるべき

順方向電圧

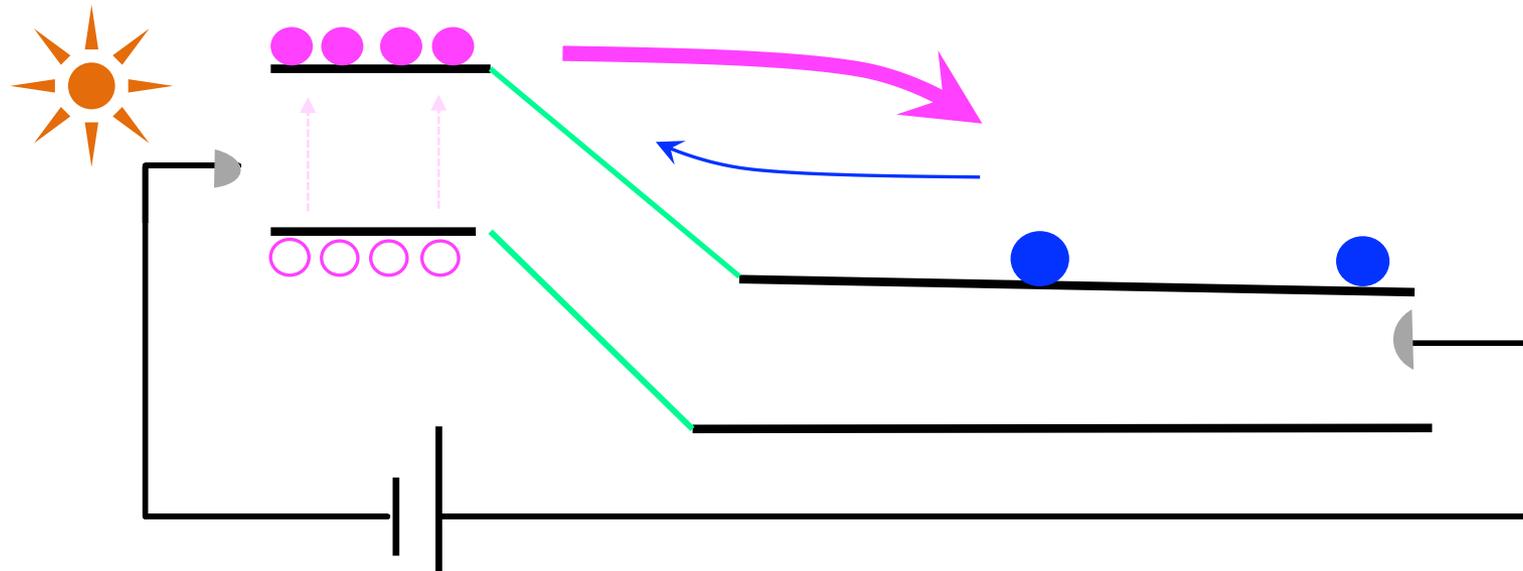
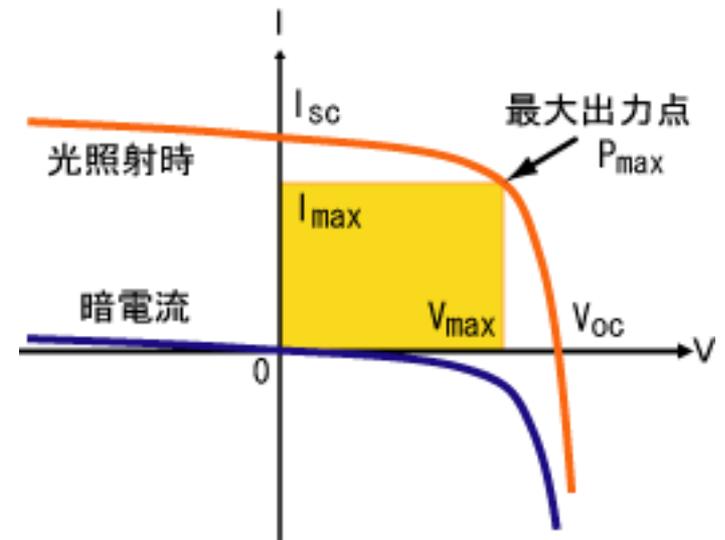
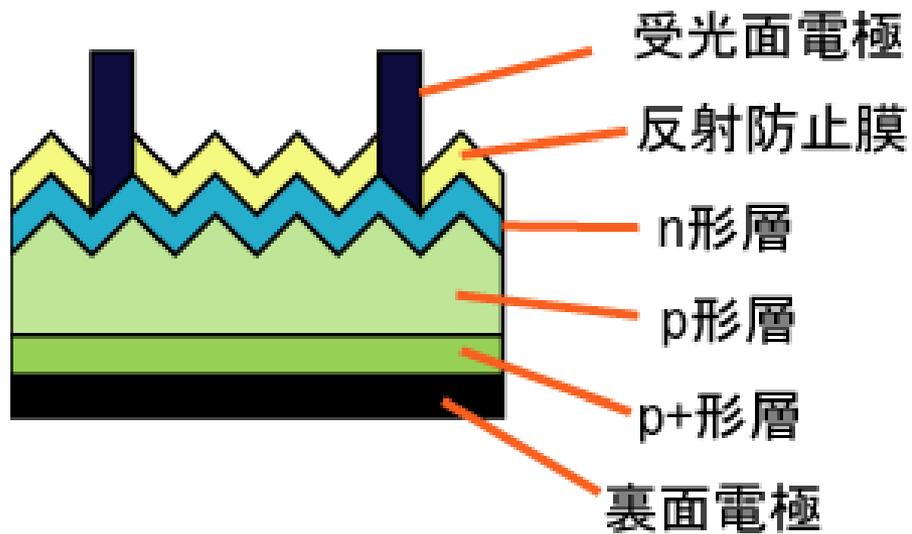


逆方向電圧

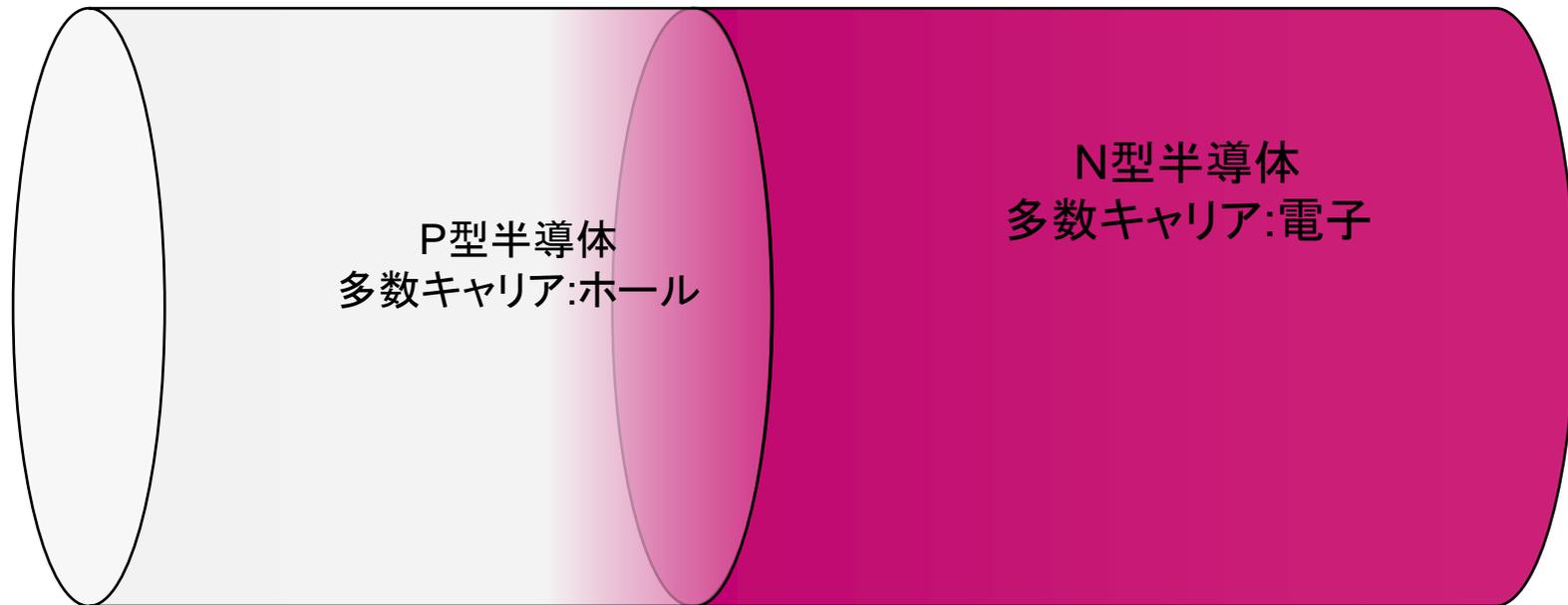
順方向電圧



PN接合の応用例：太陽電池の原理

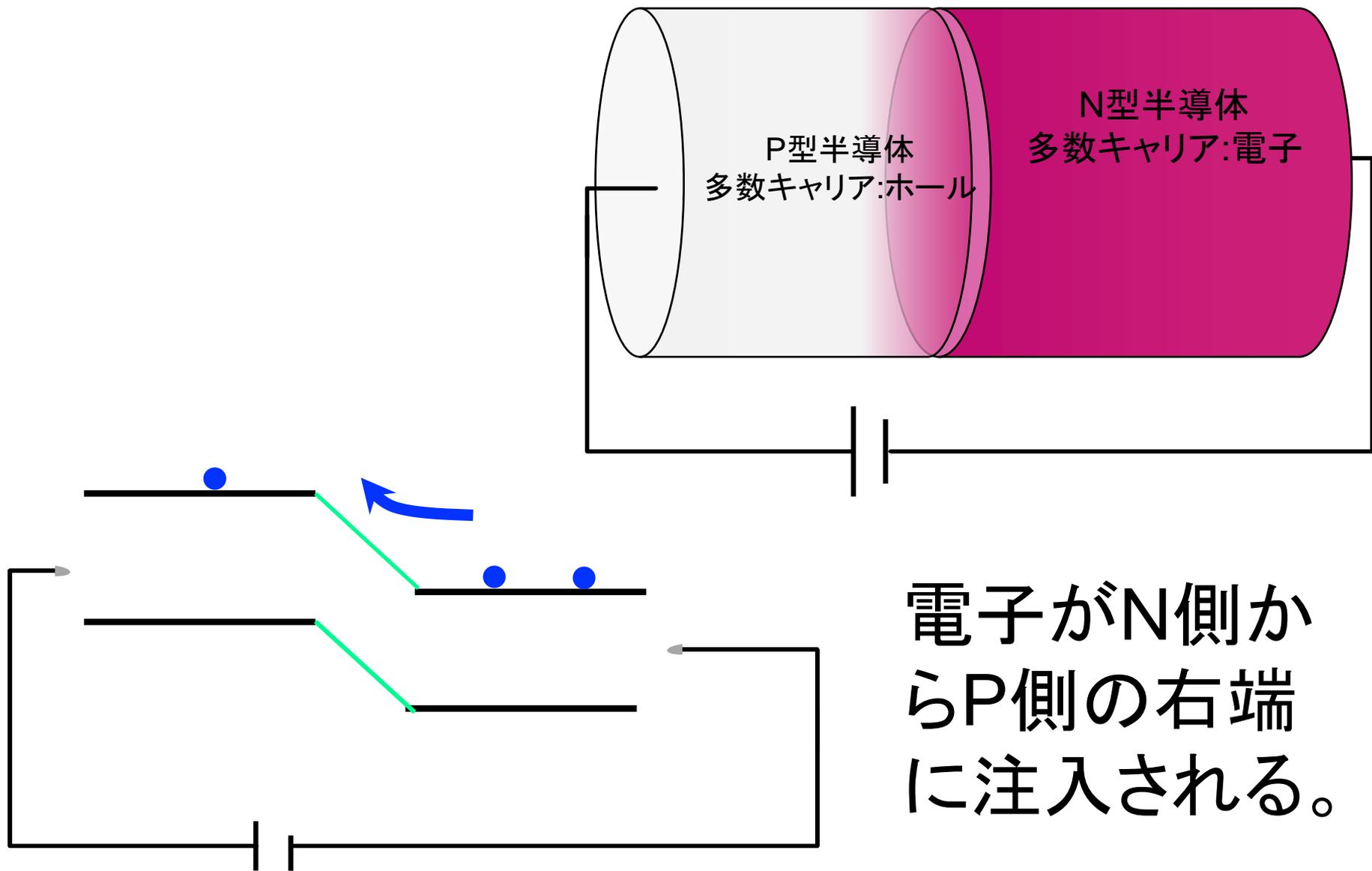


PN接合の復習

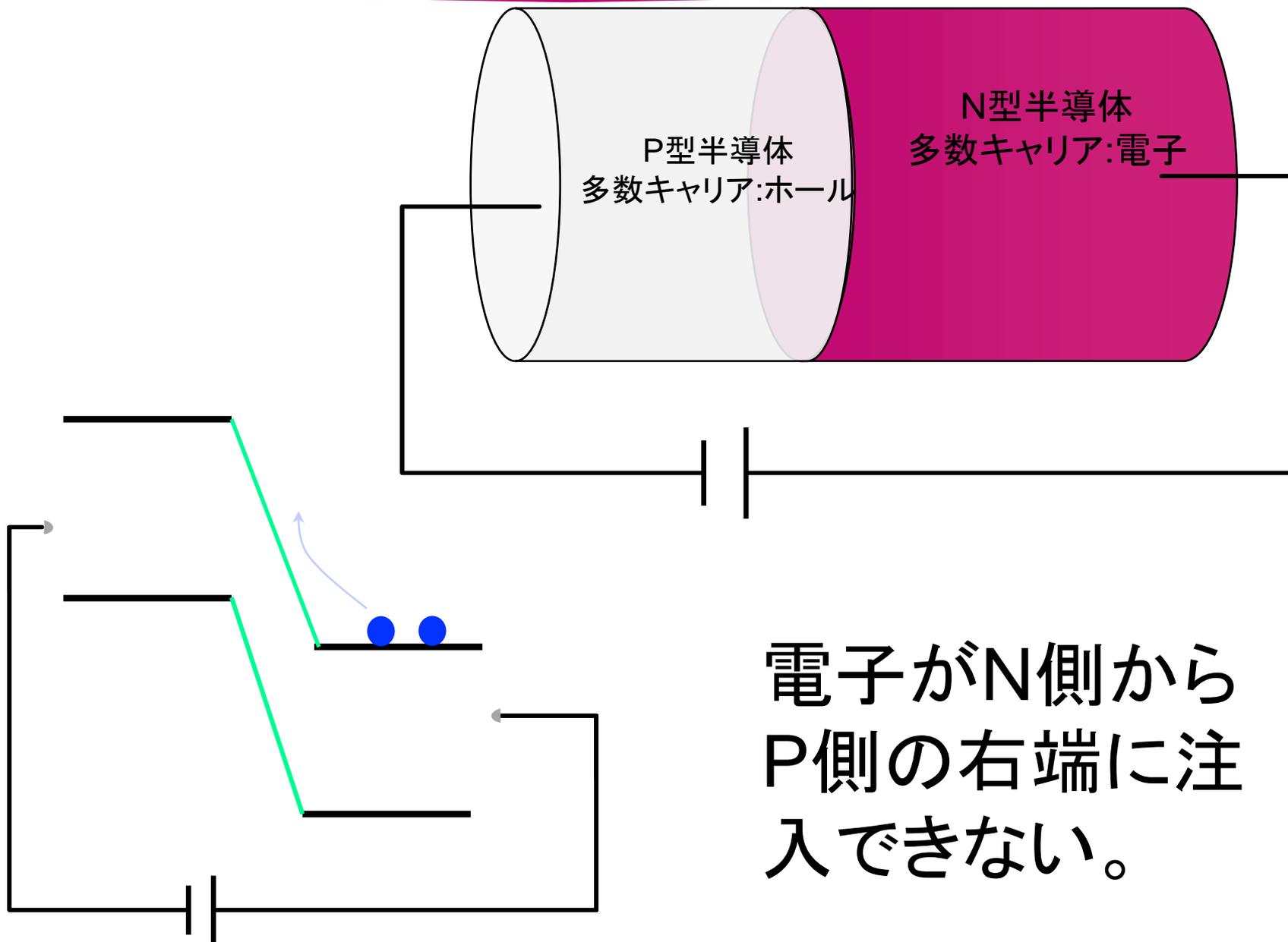


P少数キャリア電子注入(右端):
P側の右端に光照射の代わりに、電子が多数であるN半導体を接続するという発案でした。

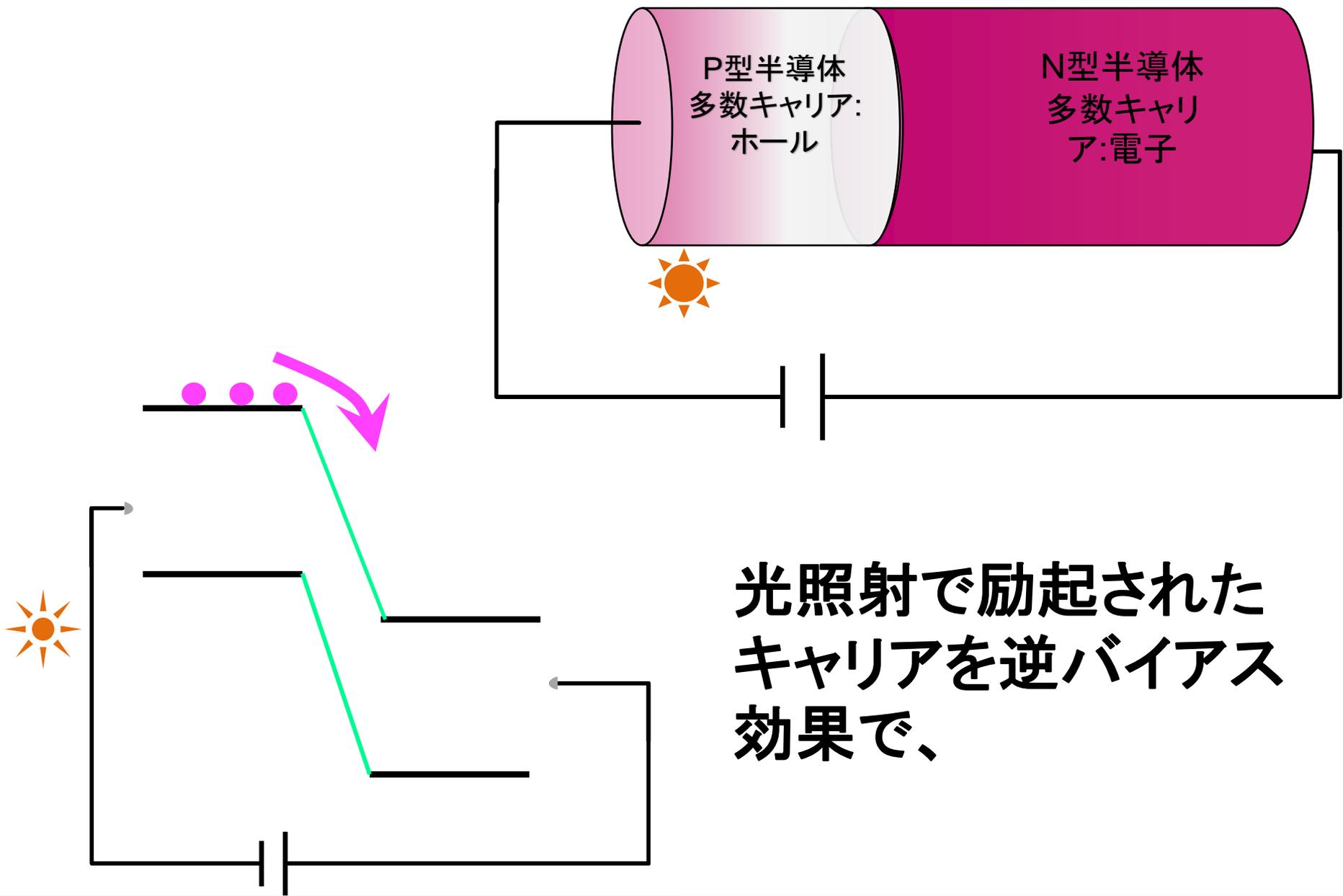
PN接合の電圧印可効果： 順方向 $V > 0$



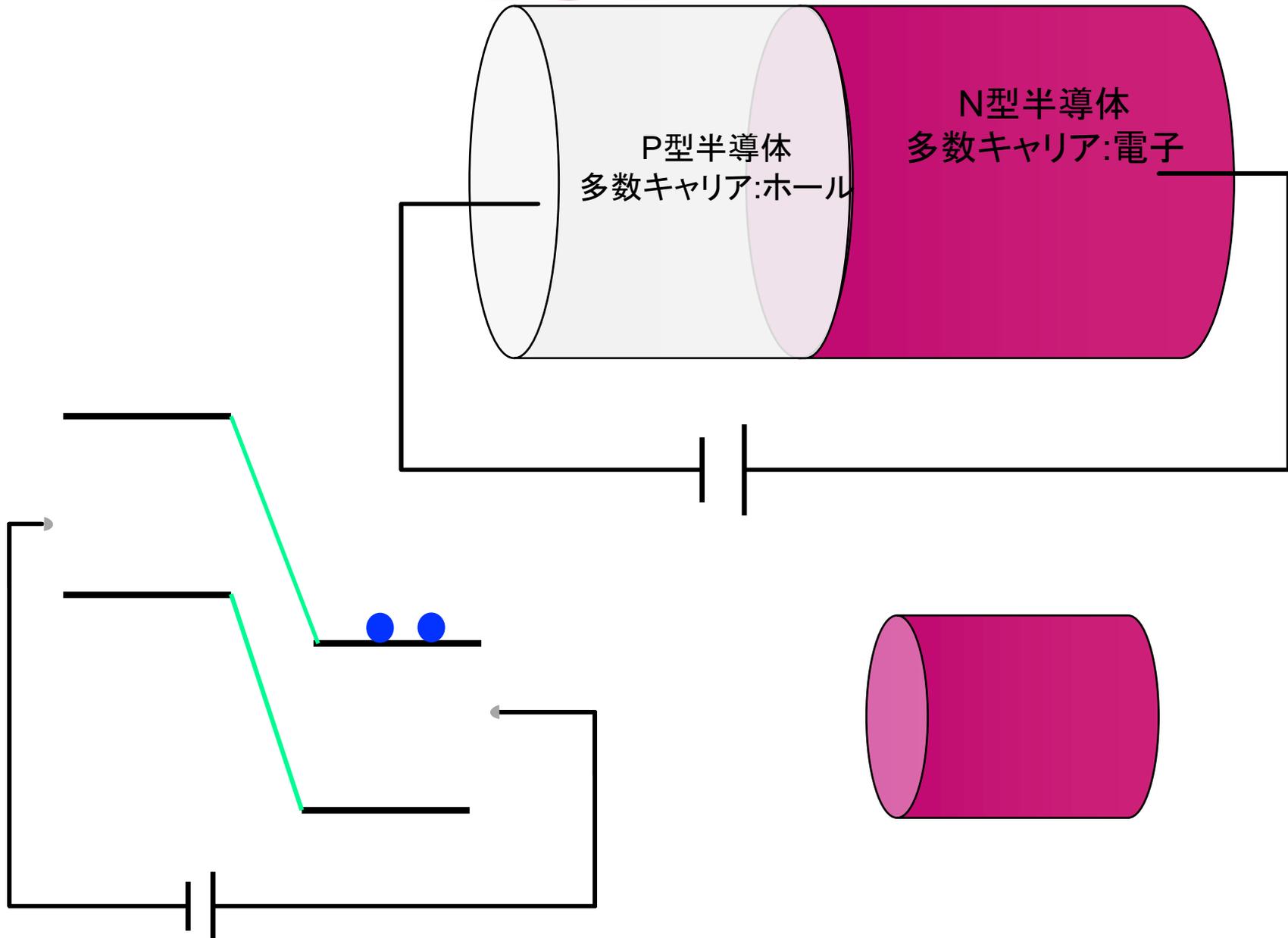
PN接合の電圧印可効果: 逆方向 $V < 0$



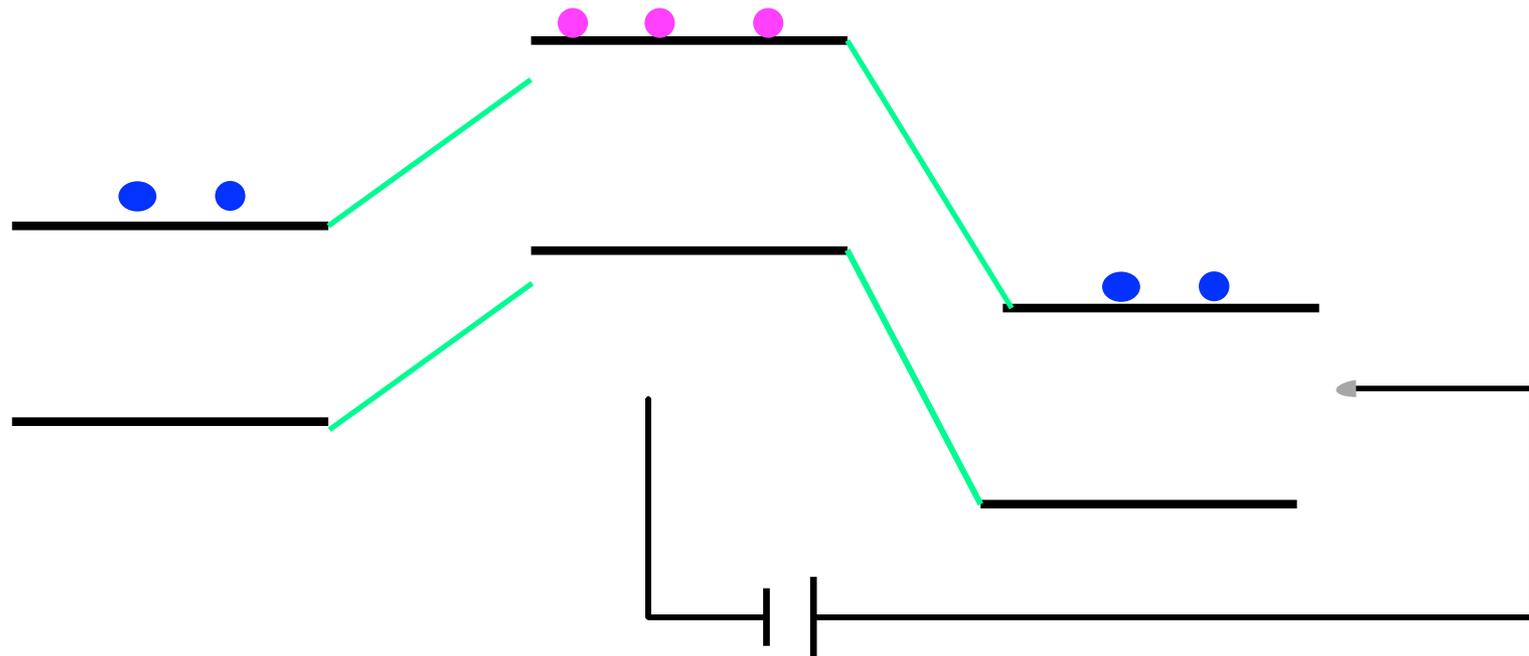
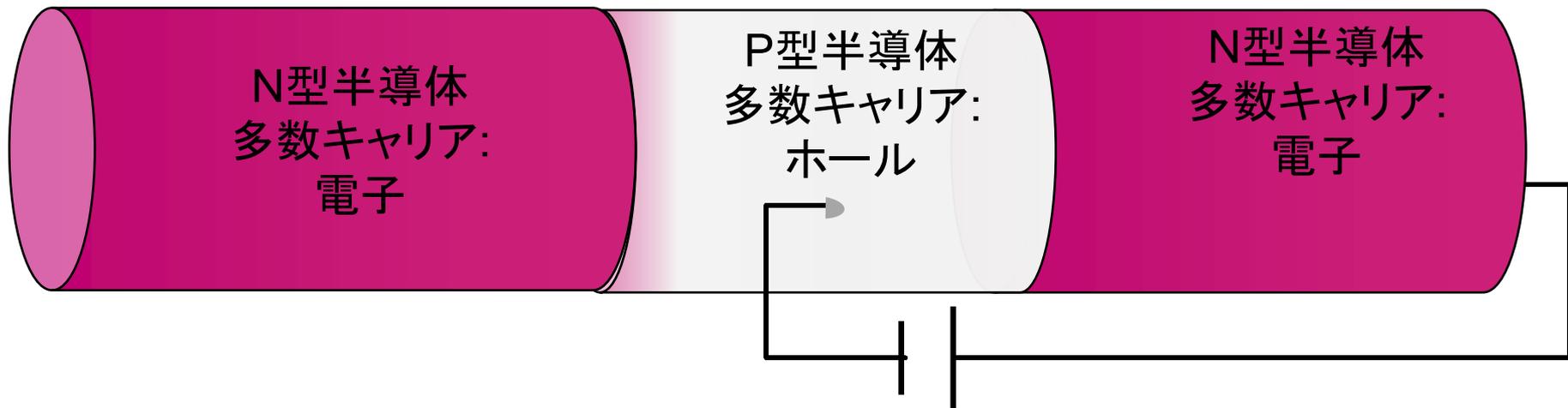
逆バイアス下でのPN接合：光照射



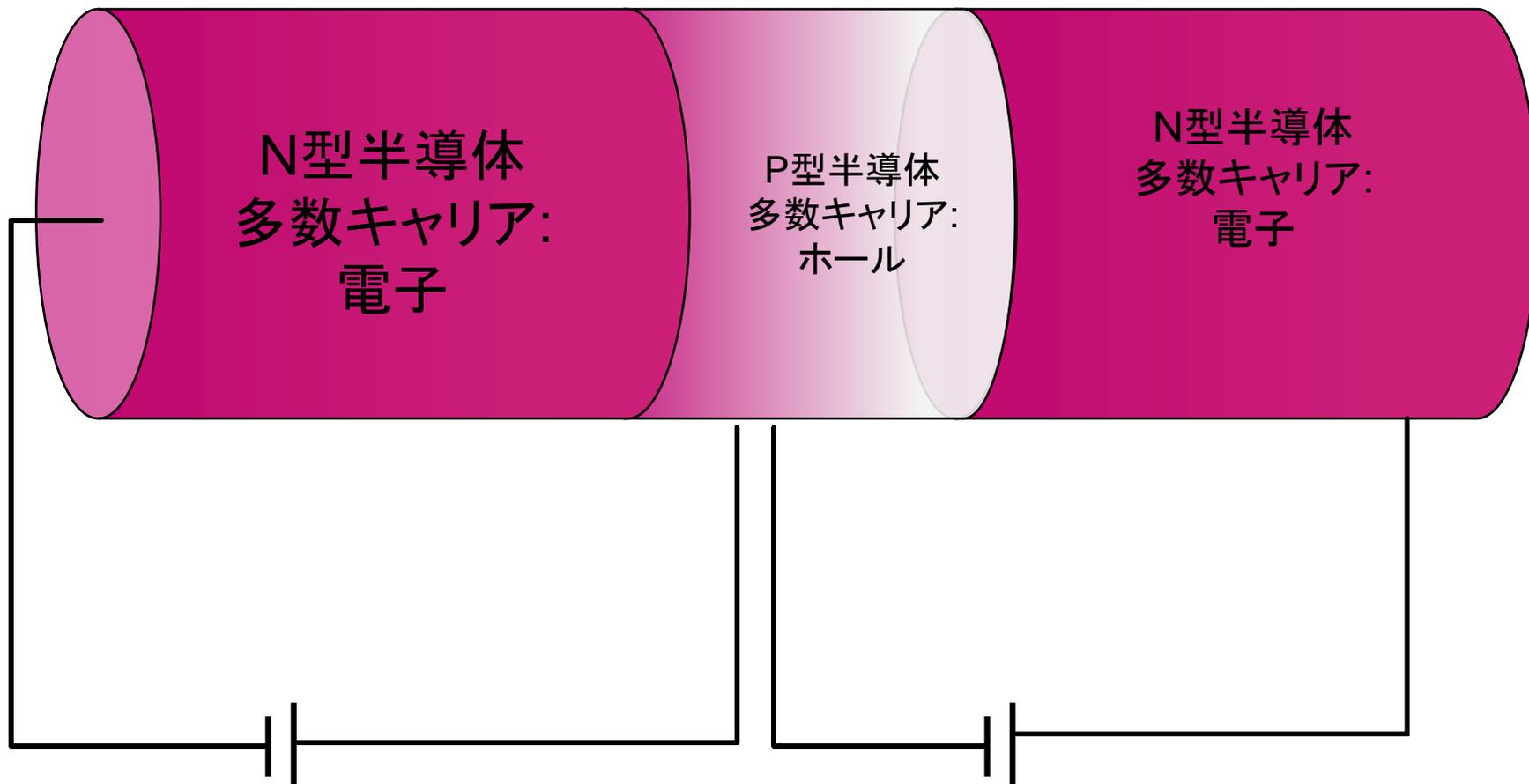
光照射しないでP型に少数キャリアを生成する



NPN接合でP側に少数キャリアを生成する



NPN接合：電圧効果



NPの間に順方向バイアス
PNの間に逆バイアス

NPN接合：各部署に名前をつける

E: Emitter

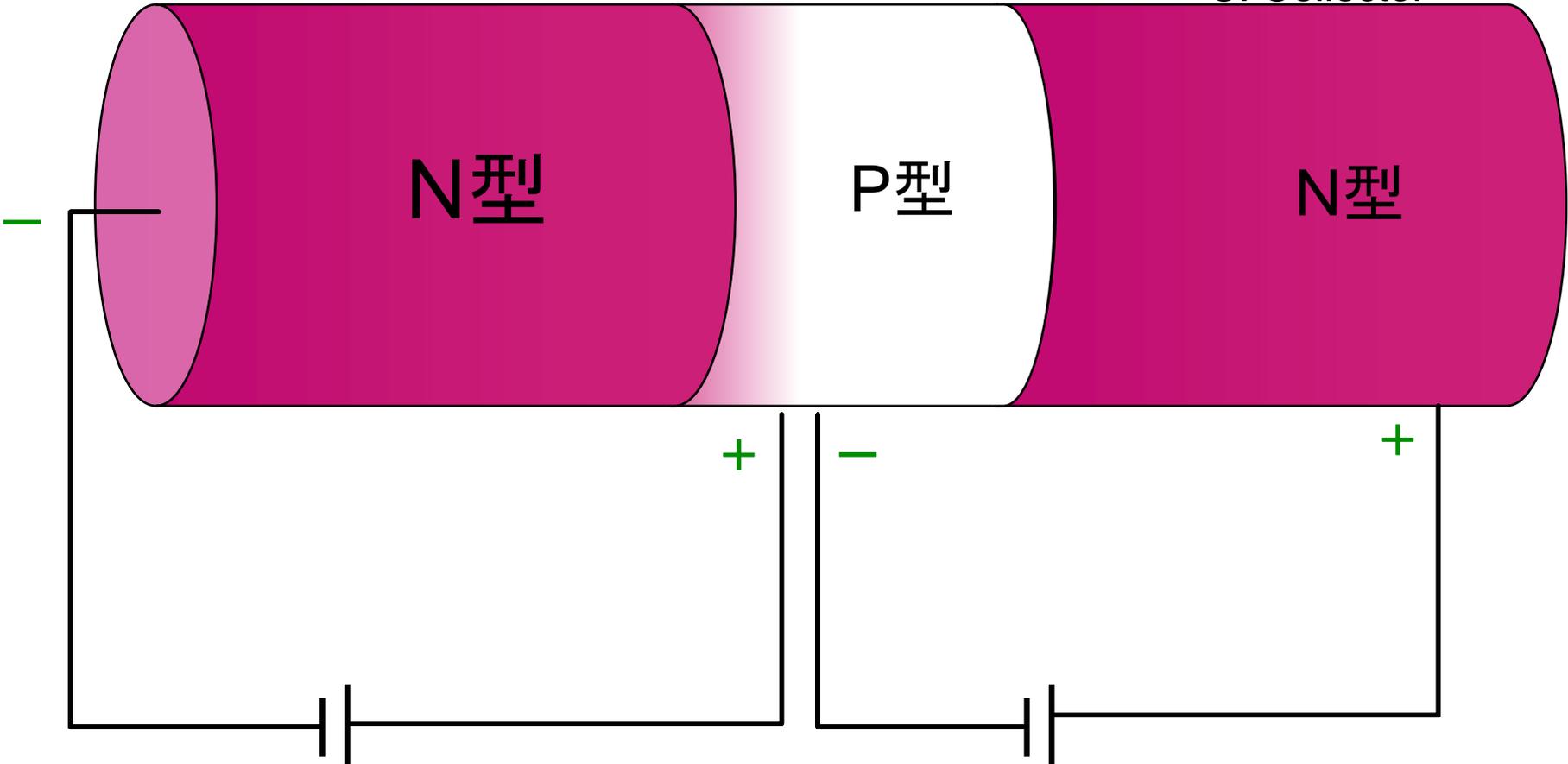
B: Base

C: Collector

N型

P型

N型



NPN接合：各部署に名前をつける

E: Emitter

B: Base

C: Collector

N型

P型

N型

$$V_{BA} = +0.5V$$

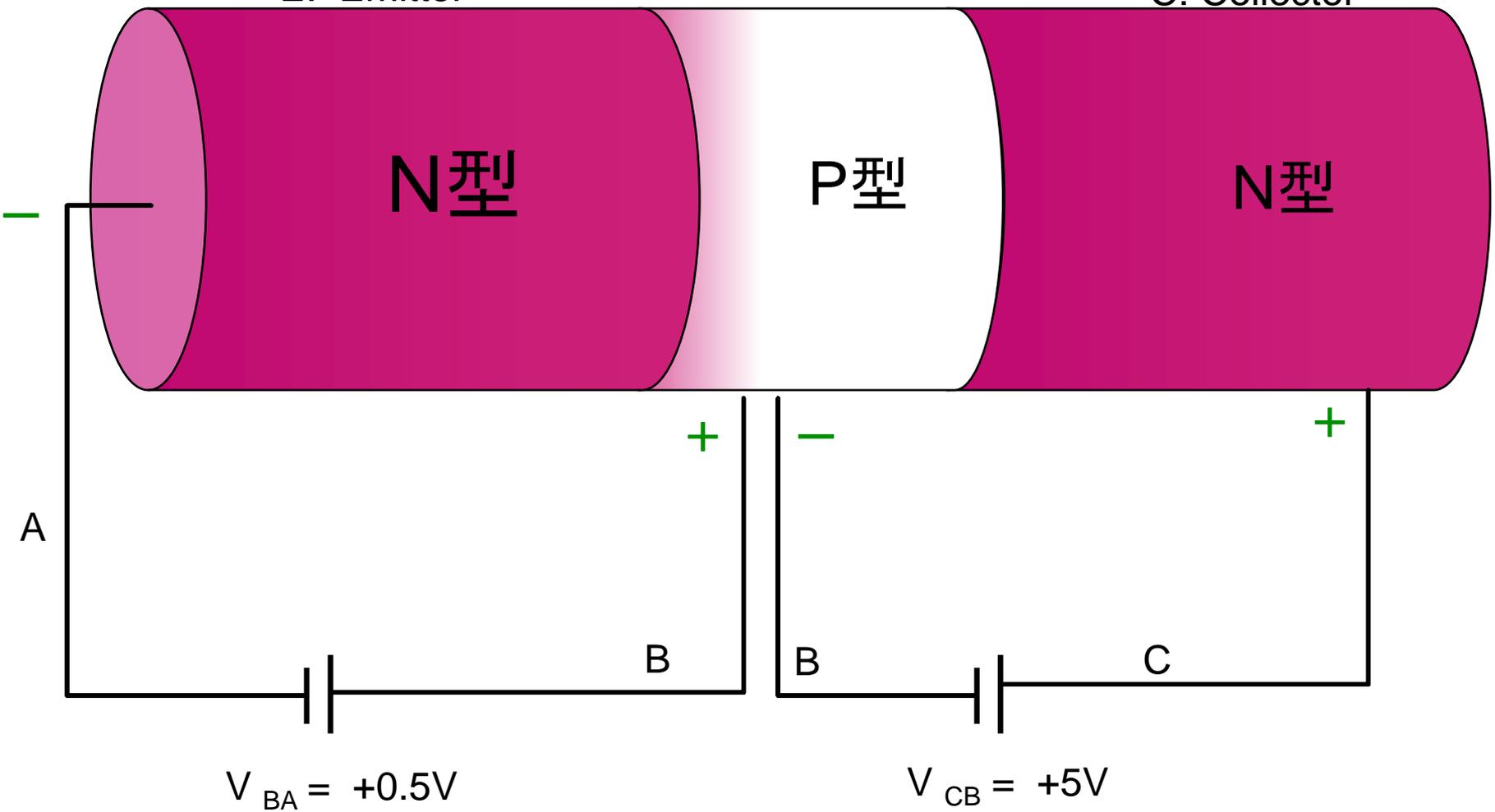
$$V_{CB} = +5V$$

NPN接合：各部署に名前をつける

E: Emitter

B: Base

C: Collector



NPN接合：各部署に名前をつける

E: Emitter

B: Base

C: Collector

N型

P型

N型

A

+

-

+

B

B

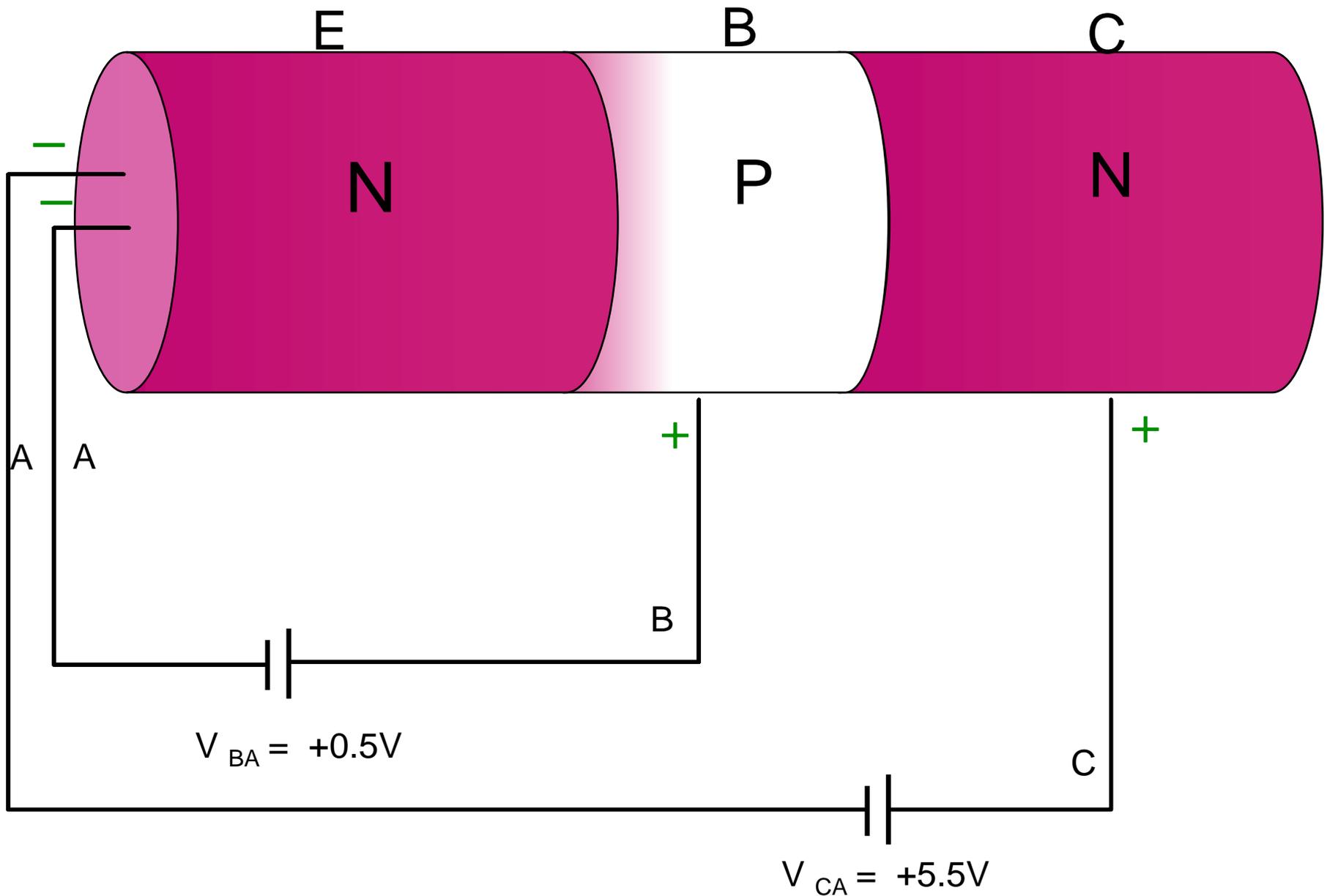
C

$$V_{BA} = +0.5V$$

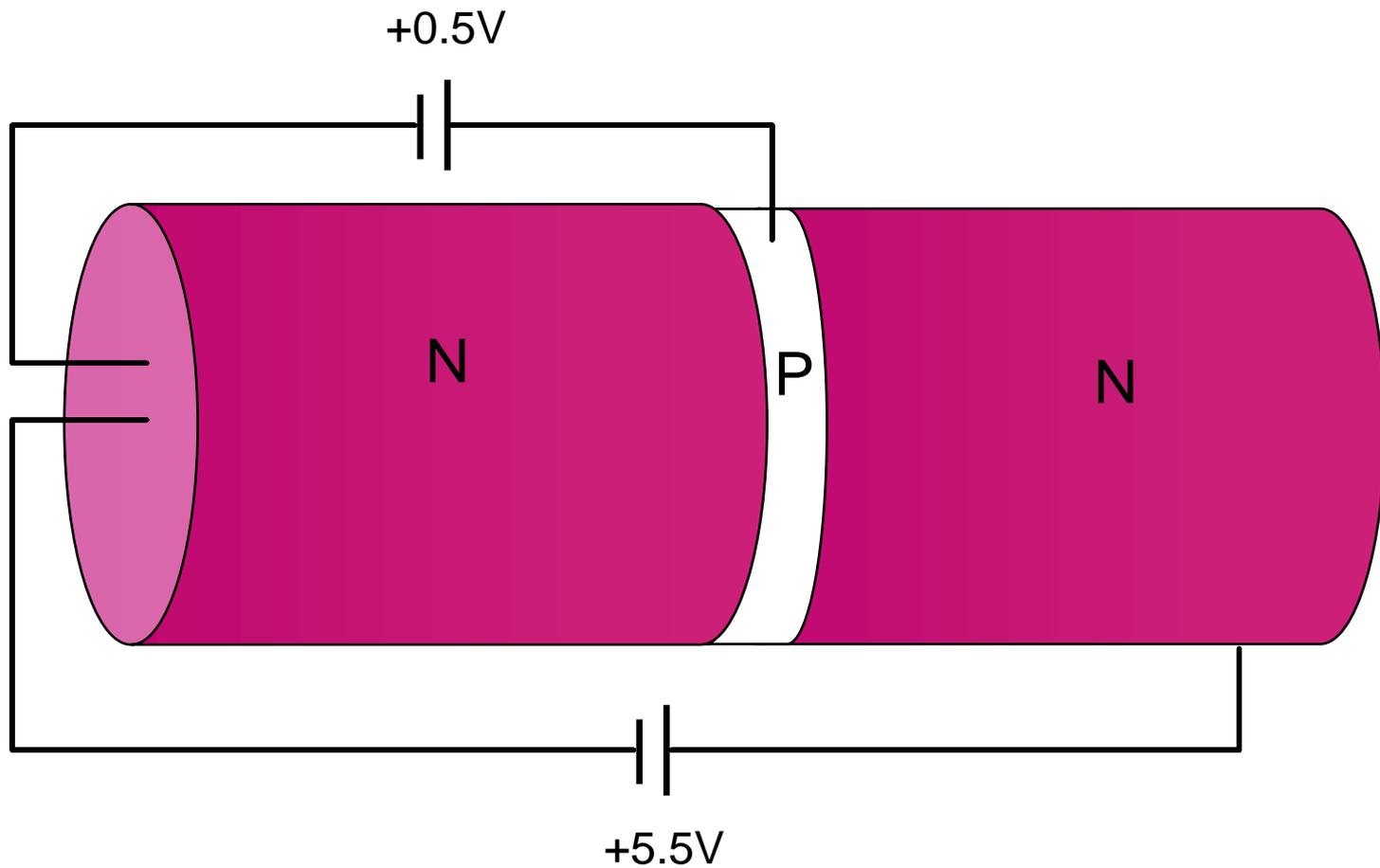
$$V_{CB} = +5V$$

$$V_{CA} = V_{CB} + V_{BA} = 5.5V$$

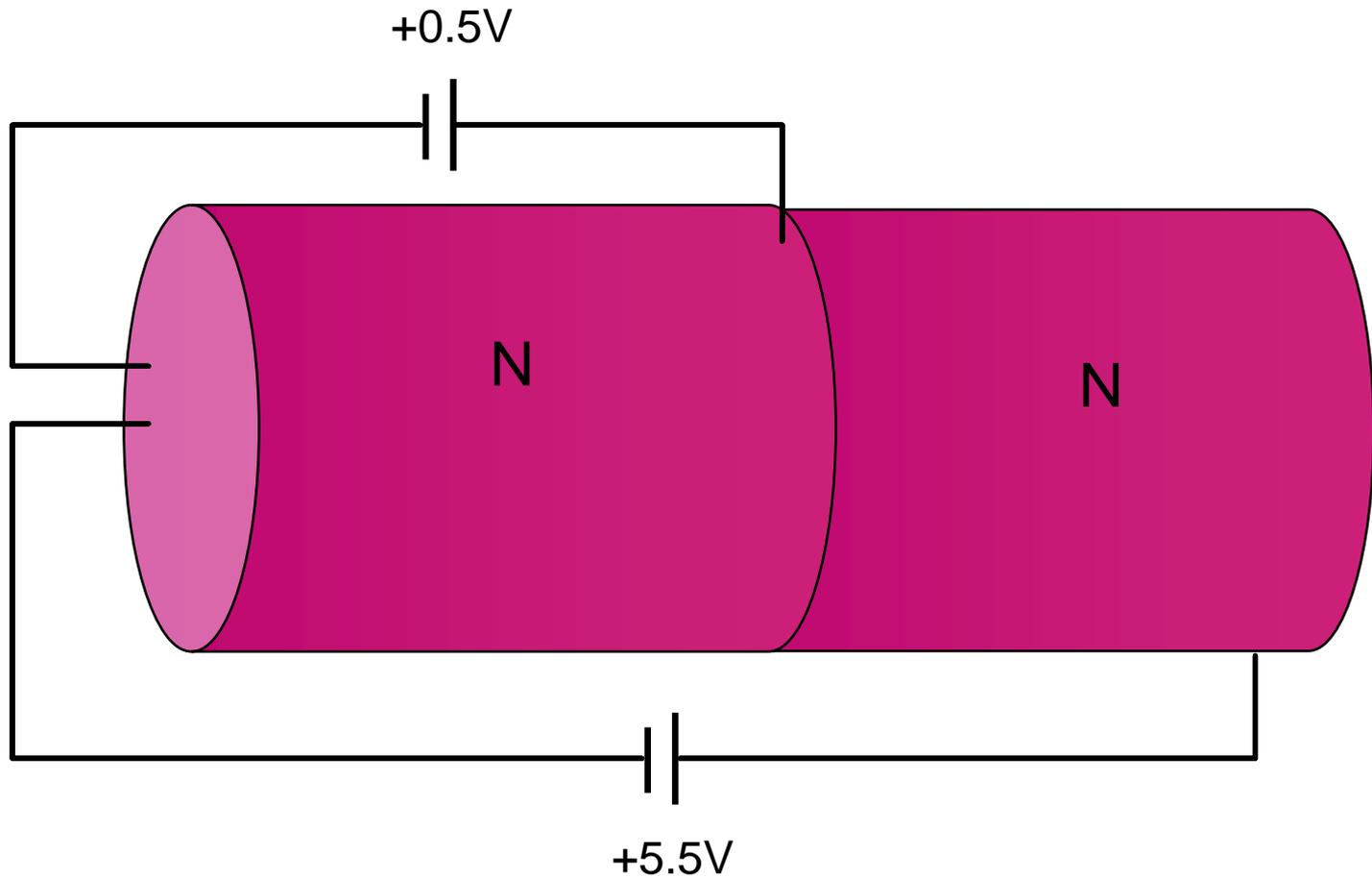
NPN接合：共有電極をemitterにする



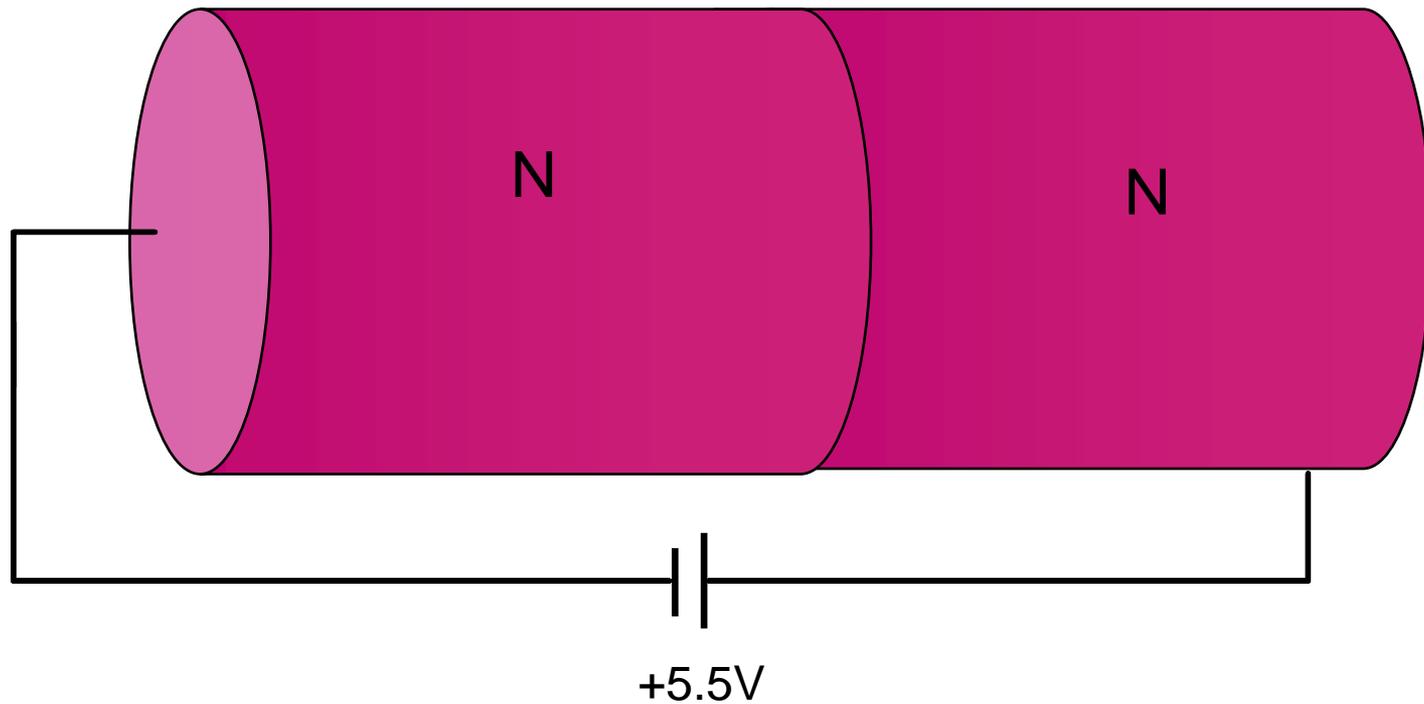
NPN接合：ベース層(P層)の厚みを薄くする



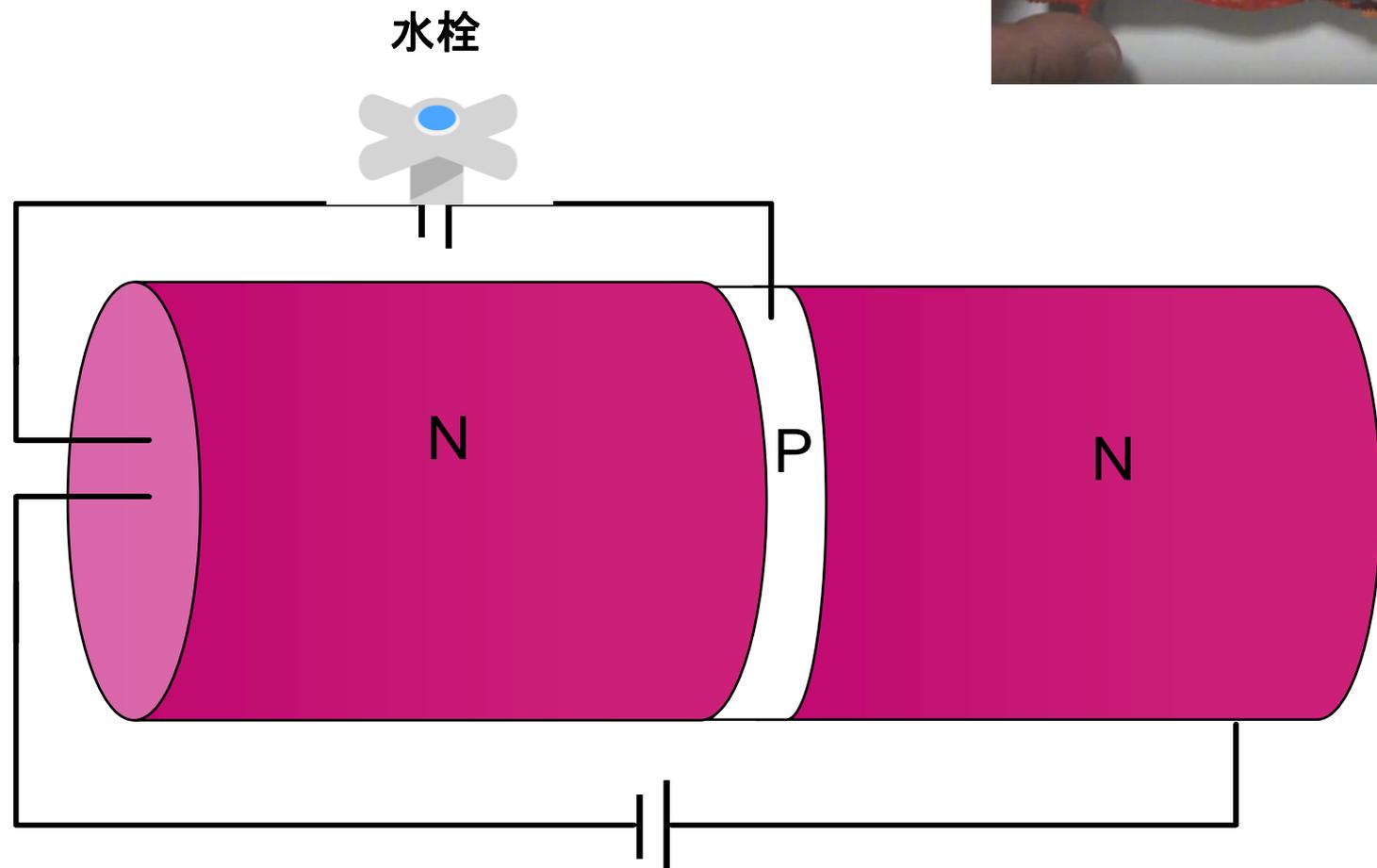
ベース層(P層)の厚みを無限に薄くする



ベース層(P層)の厚みを無限に薄くする



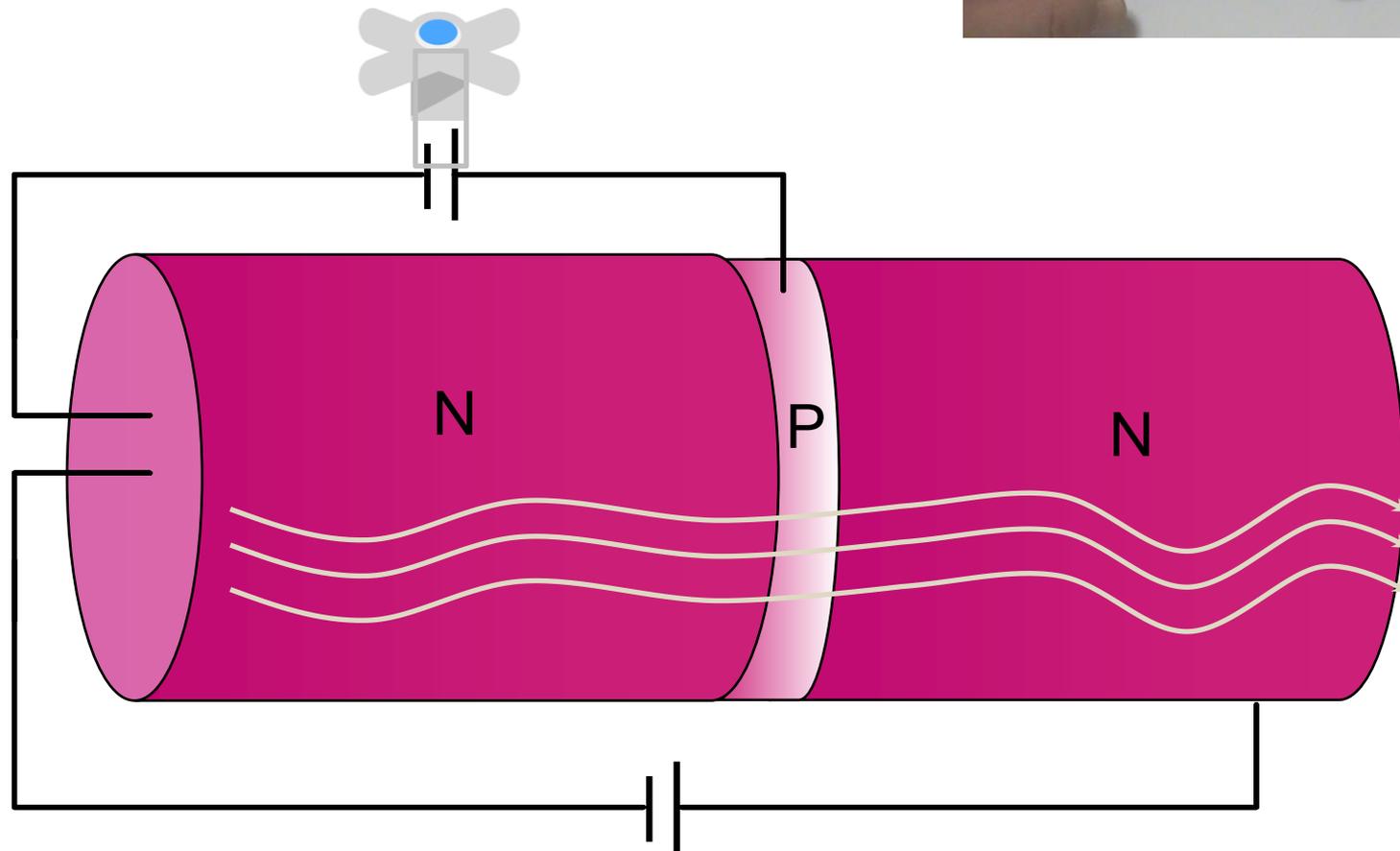
NPN接合：水道との類似性



NPN接合：水道との類似性

水栓の開閉で水道水の流量を制御する

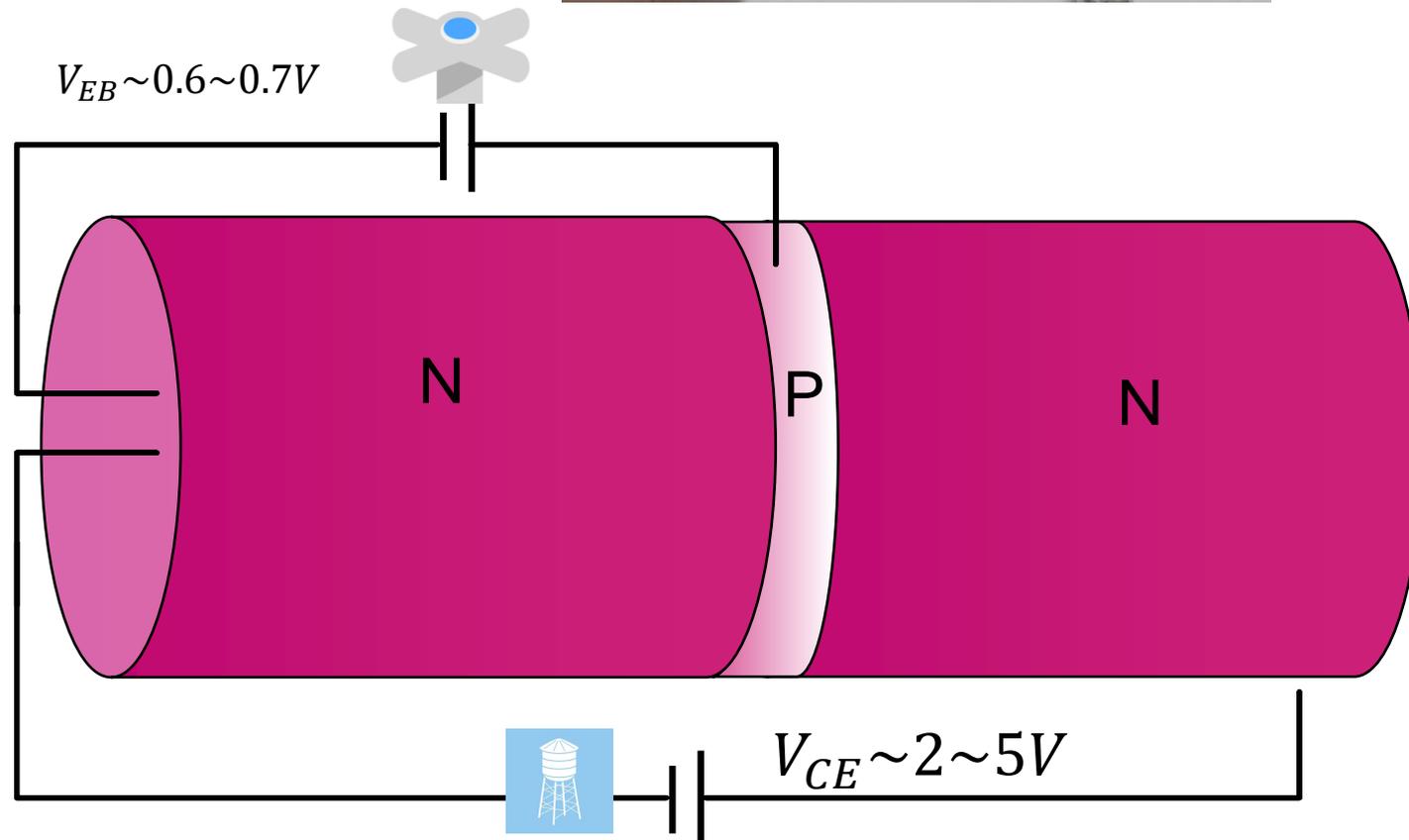
NP間の電流のon / offで N→Nに流れる電流を制御する



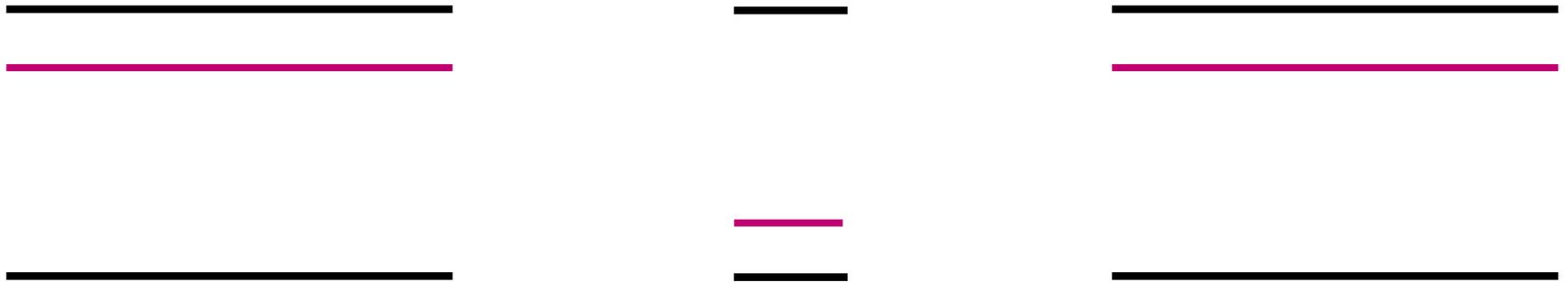
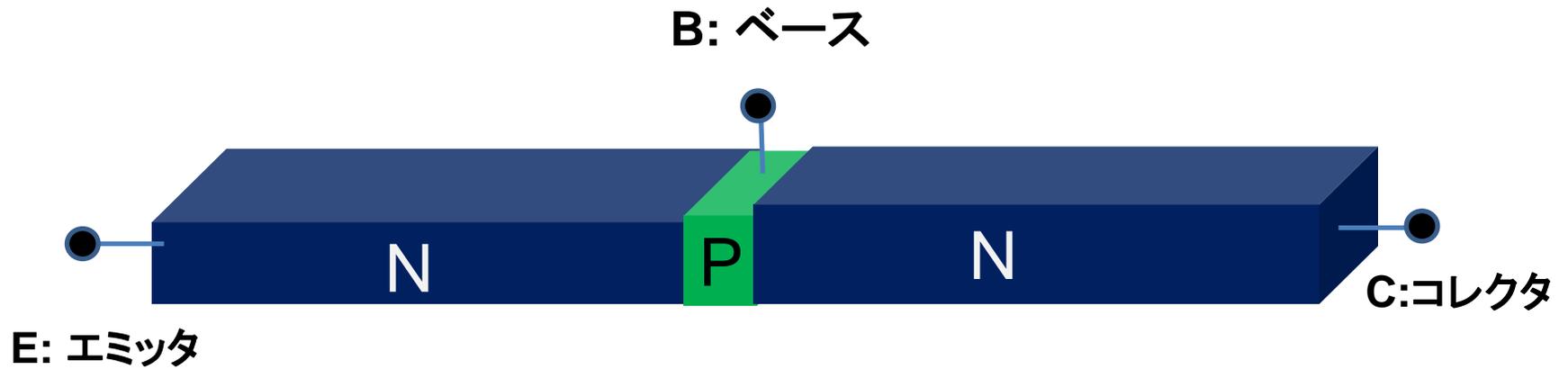
NPN接合：水道との類似性



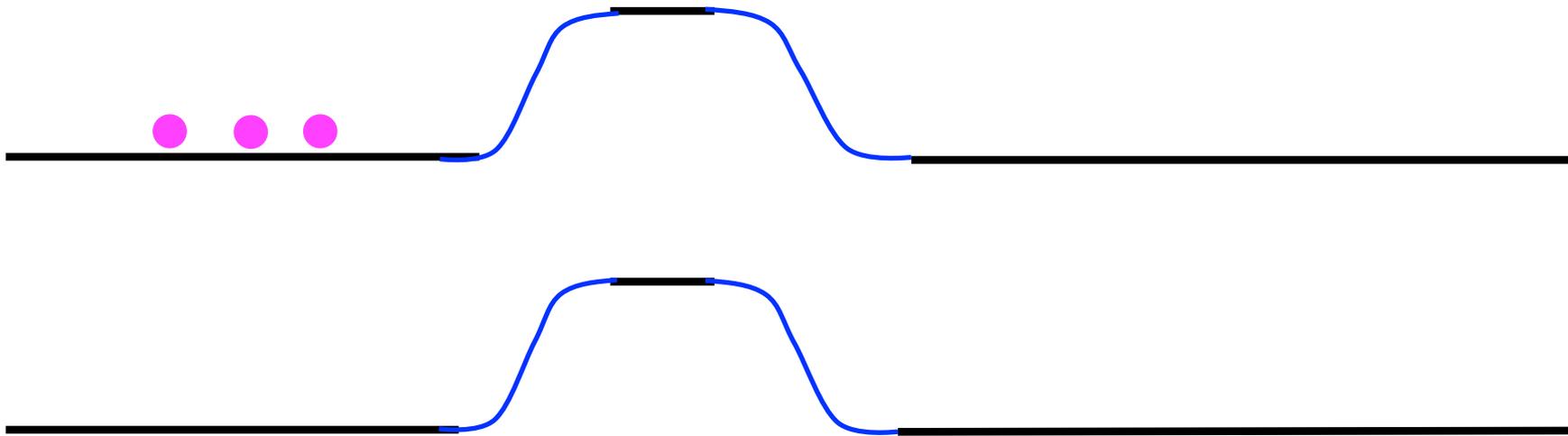
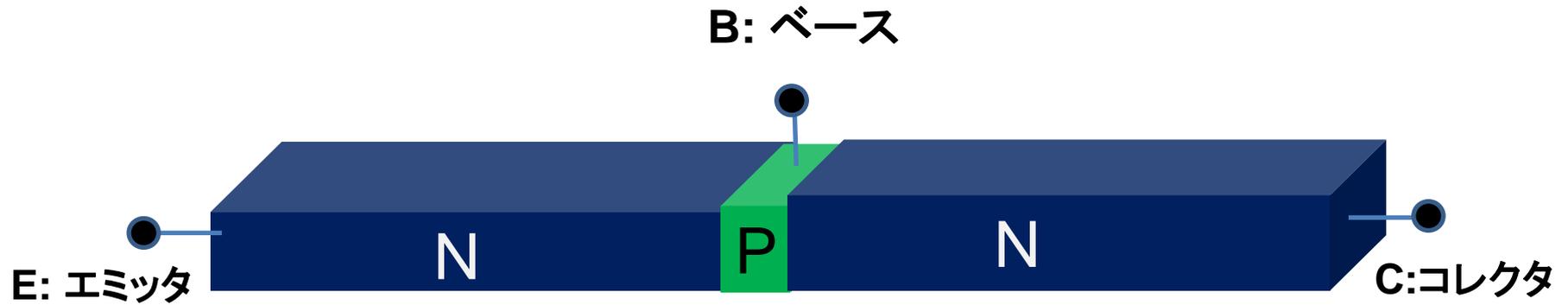
給水塔



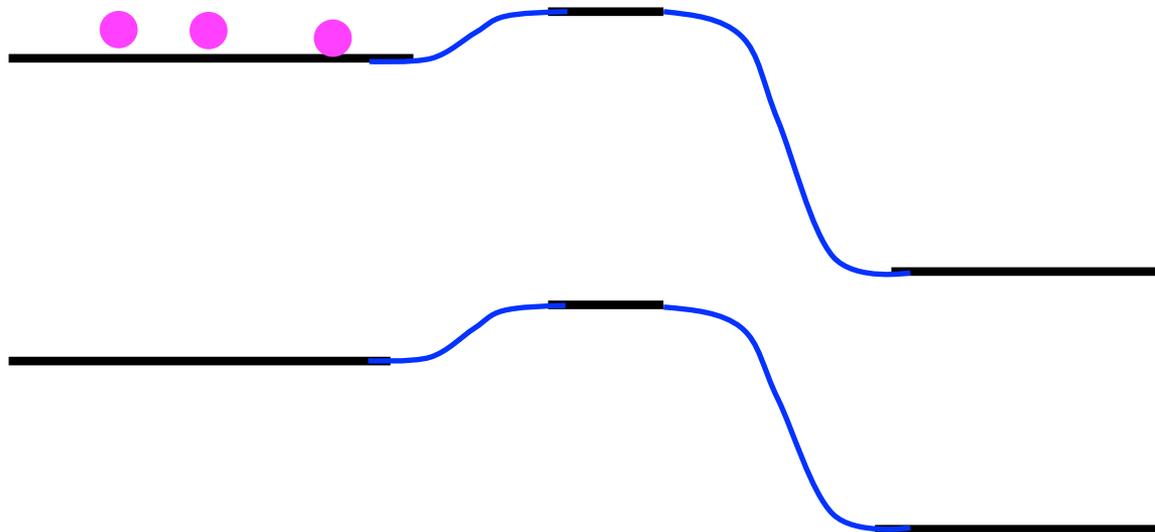
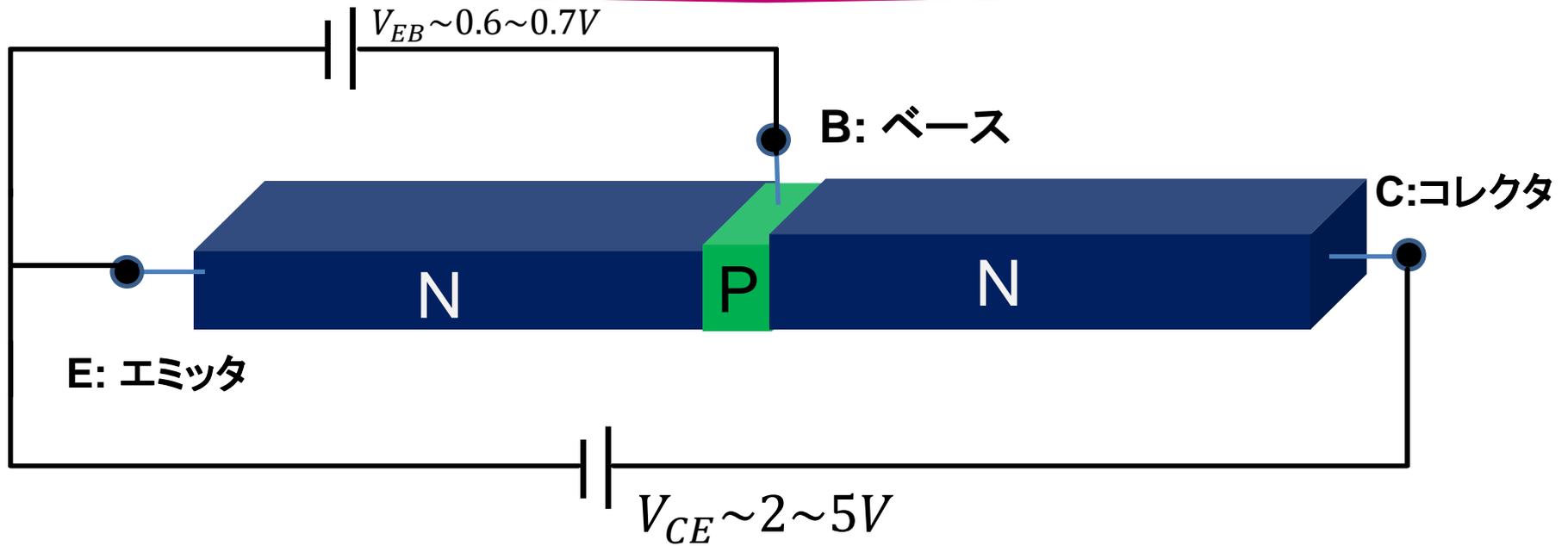
NPN接合:バンド図



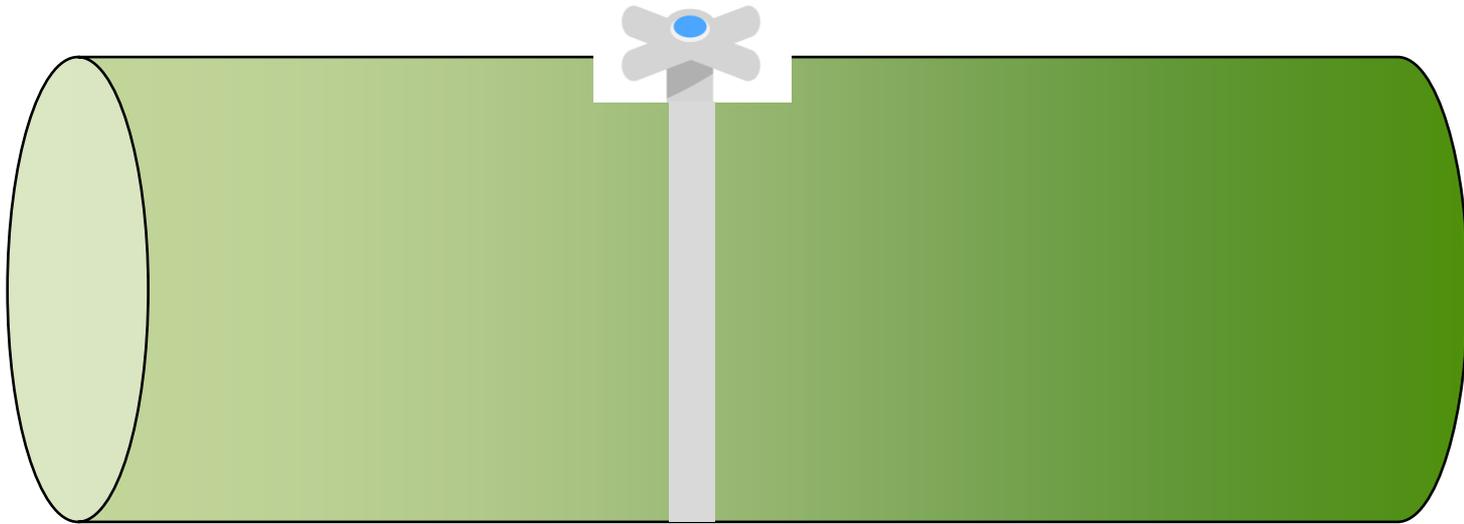
NPN接合:バンド図



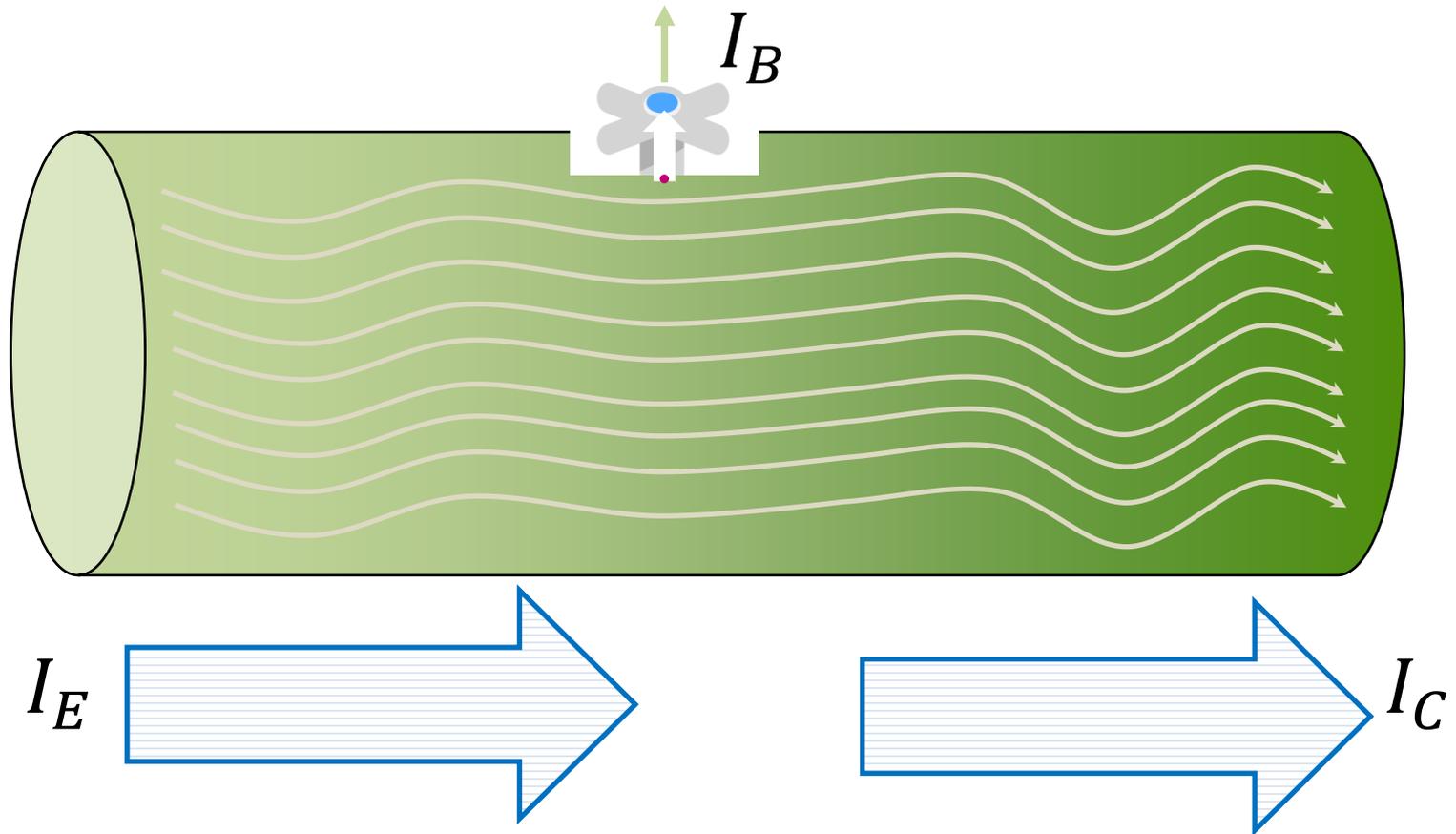
NPN接合:バンド図



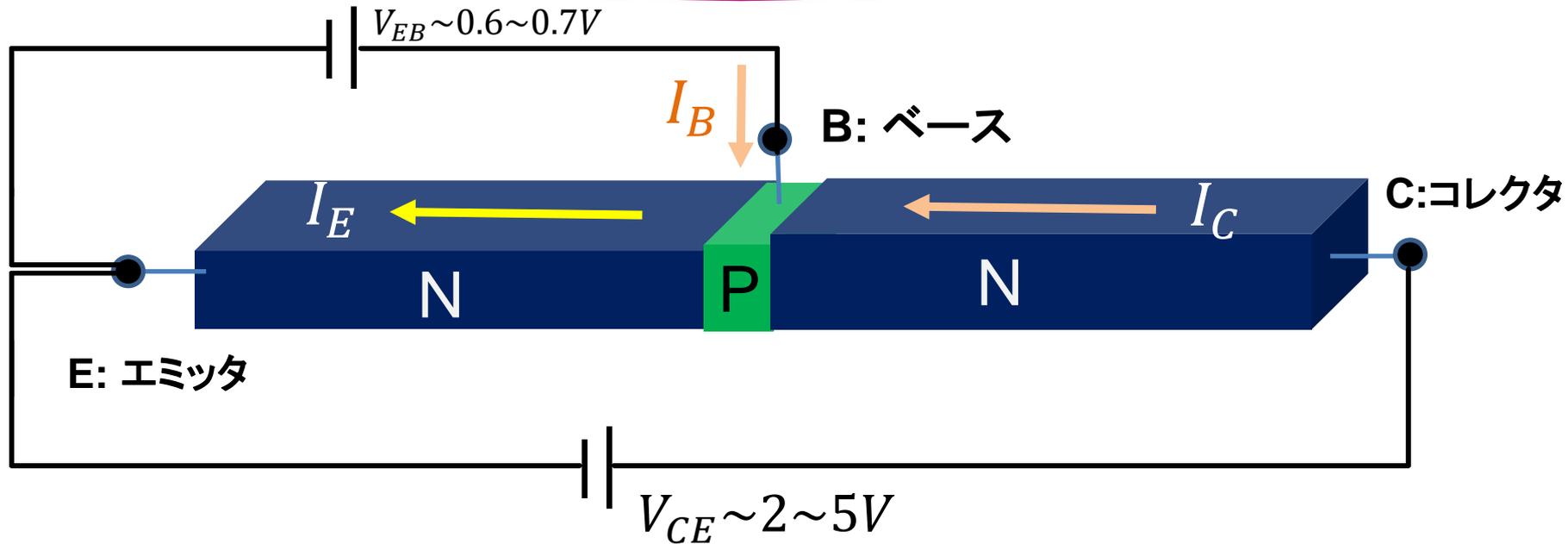
NPN接合：再び水道との類似性



NPN接合：再び水道との類似性→増幅効果



NPN接合：増幅率の計算

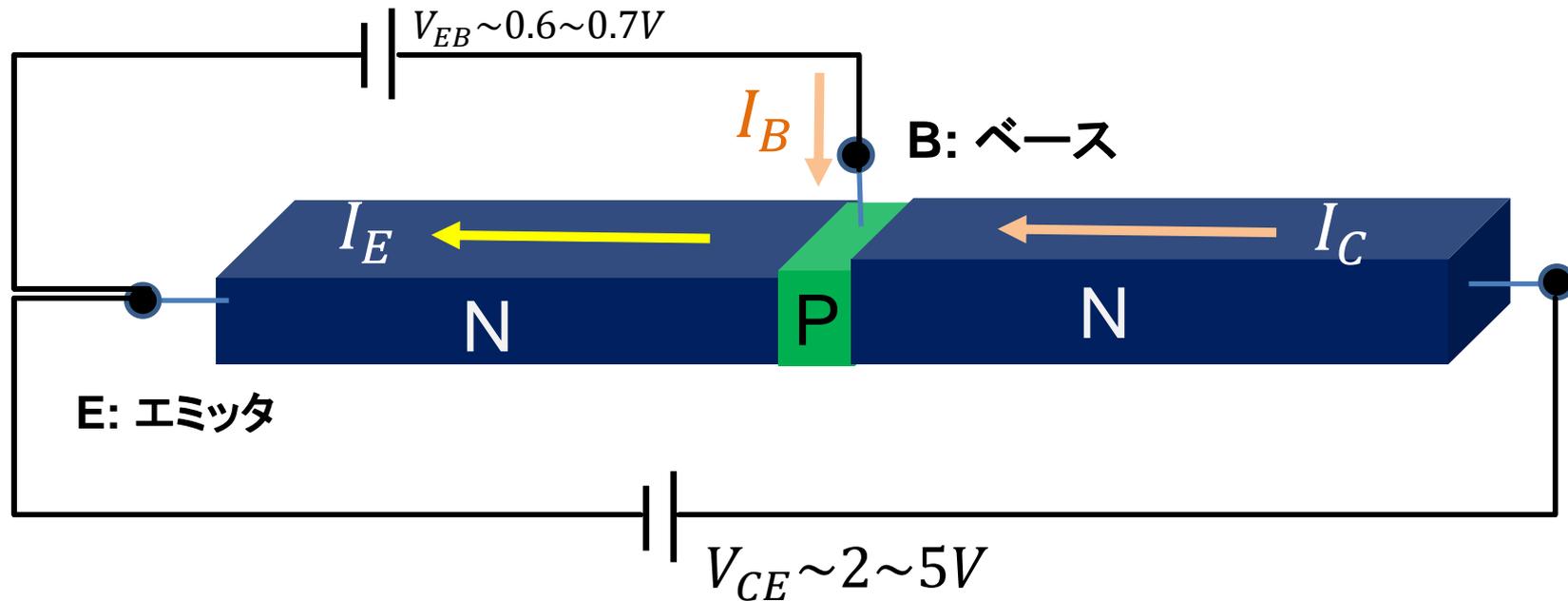


$$I_B + I_C = I_E \quad \beta = \frac{I_C}{I_B} \quad \alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\frac{I_B}{I_C} + 1 = \frac{I_E}{I_C}$$

$$\frac{1}{\beta} + 1 = \frac{1}{\alpha}$$

NPN接合：増幅率の計算



$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

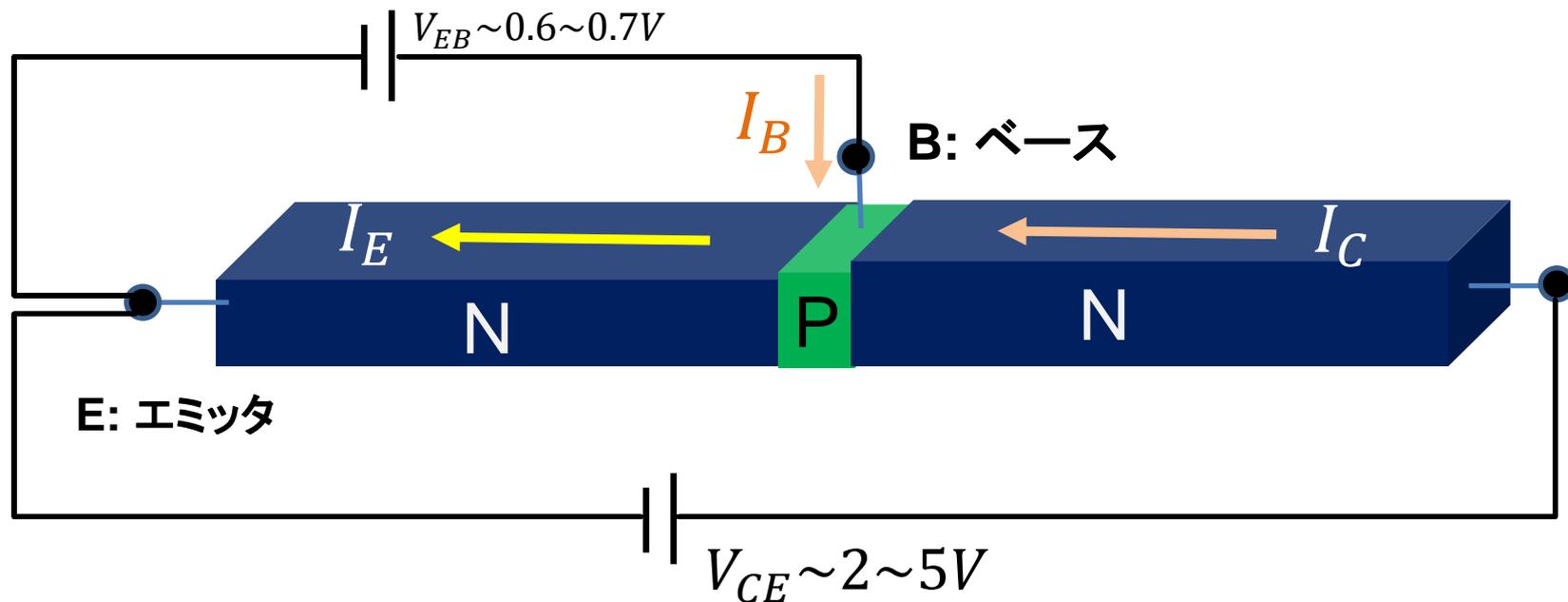
例： $\alpha \cong 0.999$

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta = 999$$

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

NPN接合：増幅率の計算



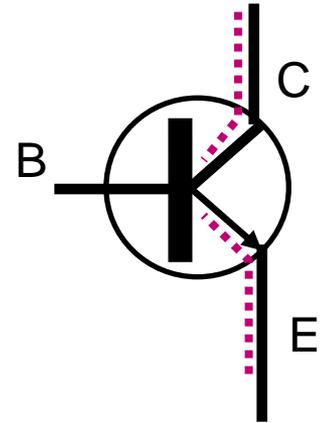
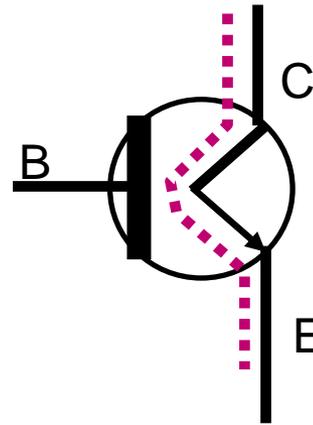
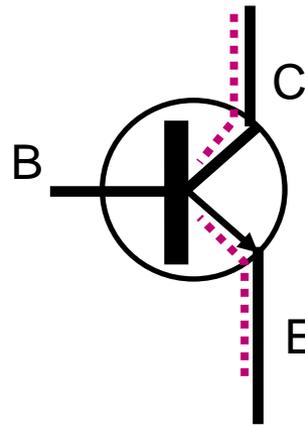
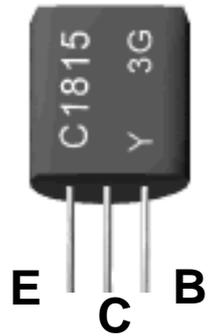
$$\beta = 999$$

$$999 = \frac{I_C}{I_B}$$

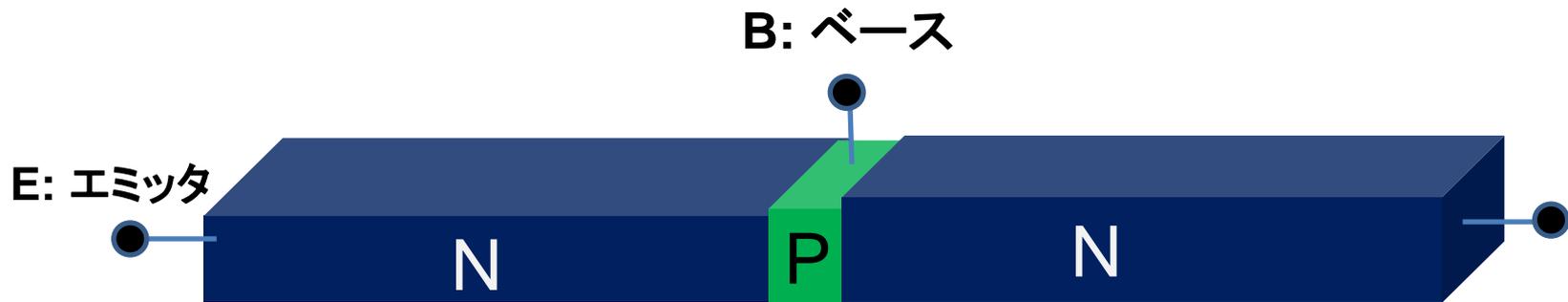
$$I_C = 999I_B$$

電流が増幅される

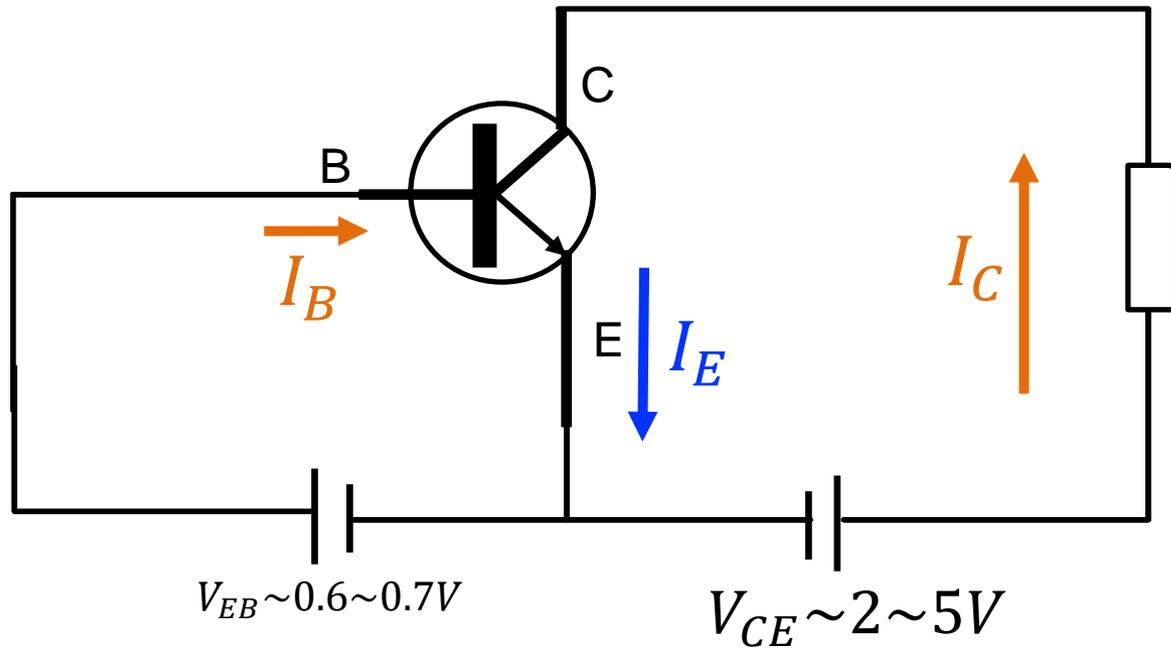
NPN接合の正式名前：バイポーラトランジスタ



水栓との類似性



バイポーラトランジスタの増幅回路



$$\beta = 999$$

$$999 = \frac{I_C}{I_B}$$

$$I_C = 999I_B$$

電流が増幅される

