固体物理学1

第12講

非線形素子

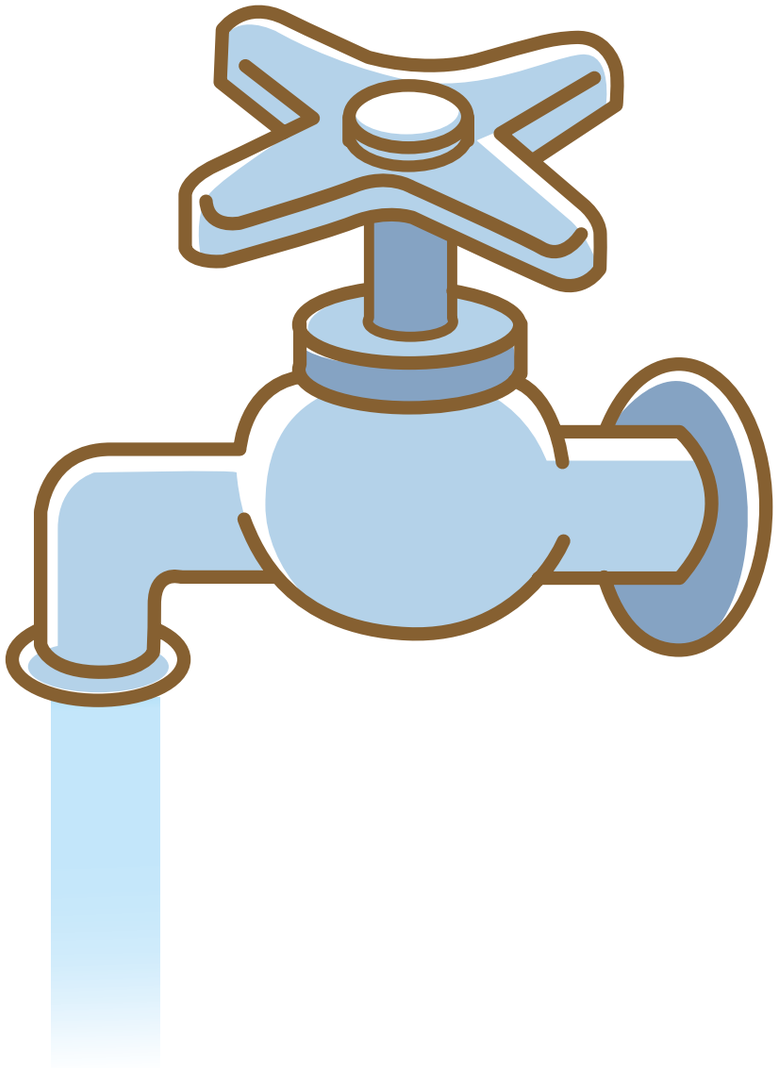
～～ 固体の電子を制御せよ ～～

広島大学　井野明洋

居室：理D205、放射光セ408

固体の電子をあやつる技

要は、スイッチング（増幅）



複雑な計算機

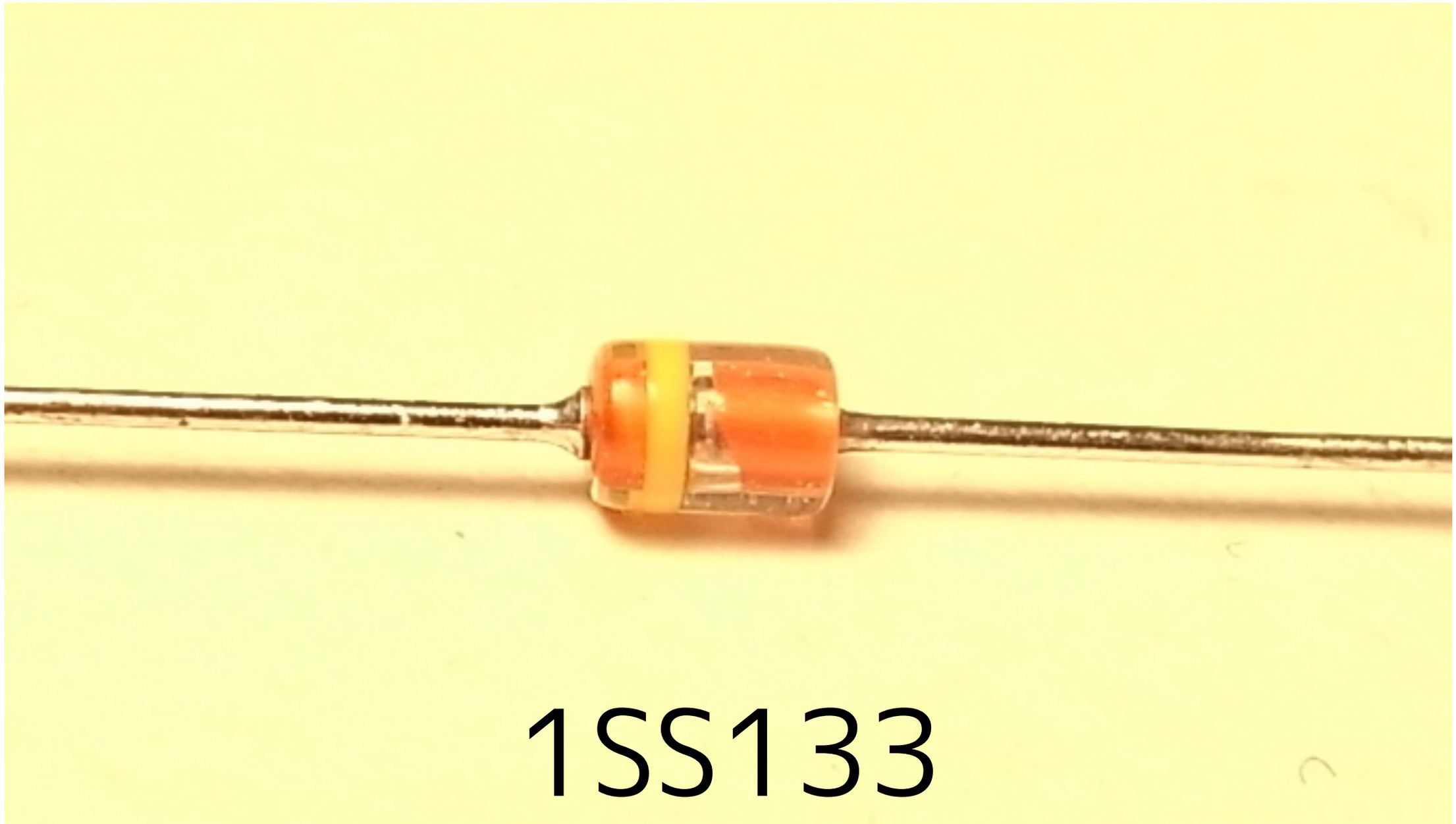
各種、役に立つ電子回路

電気で 電気を 制御したい

実験事実

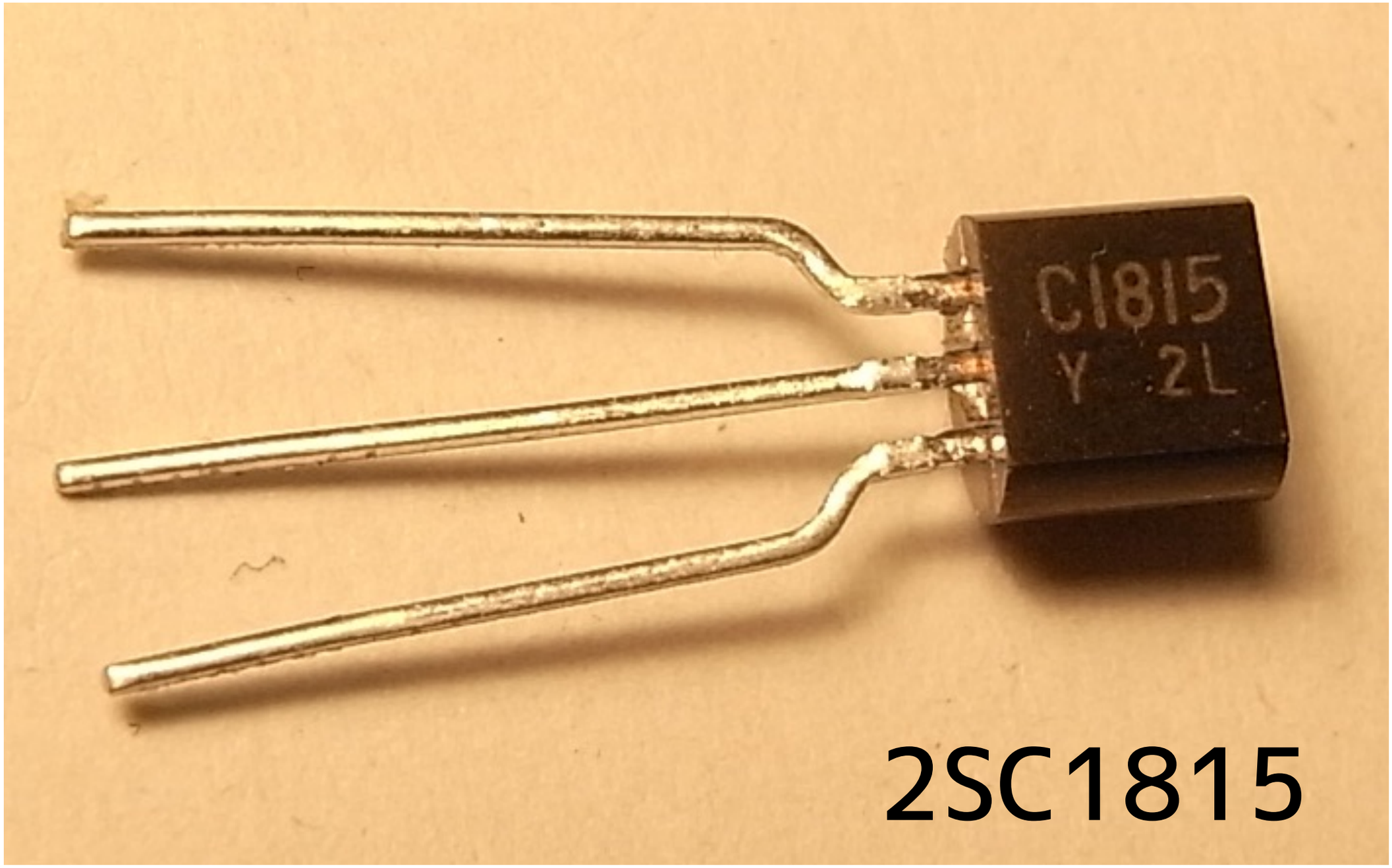
三年実験エレクトロニクスより

ダイオード



1SS133

バイポーラ・トランジスタ

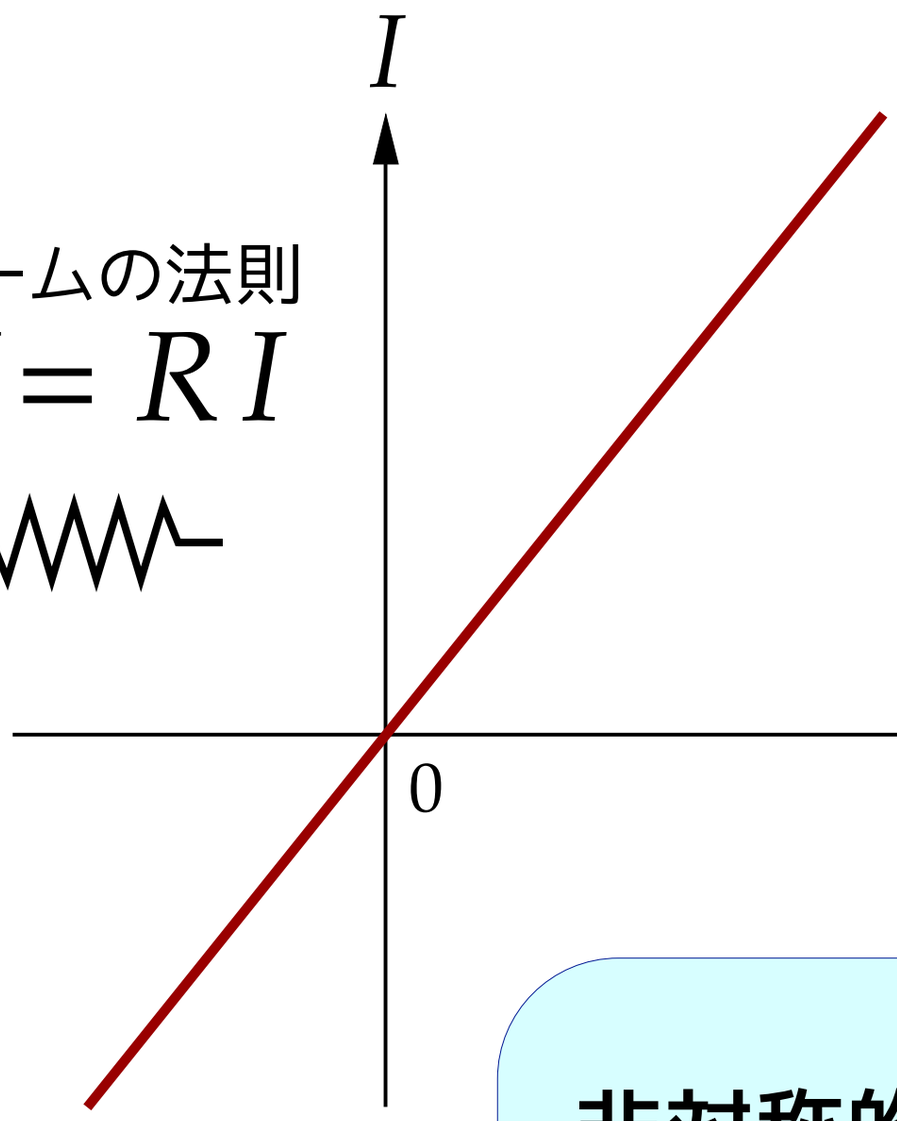


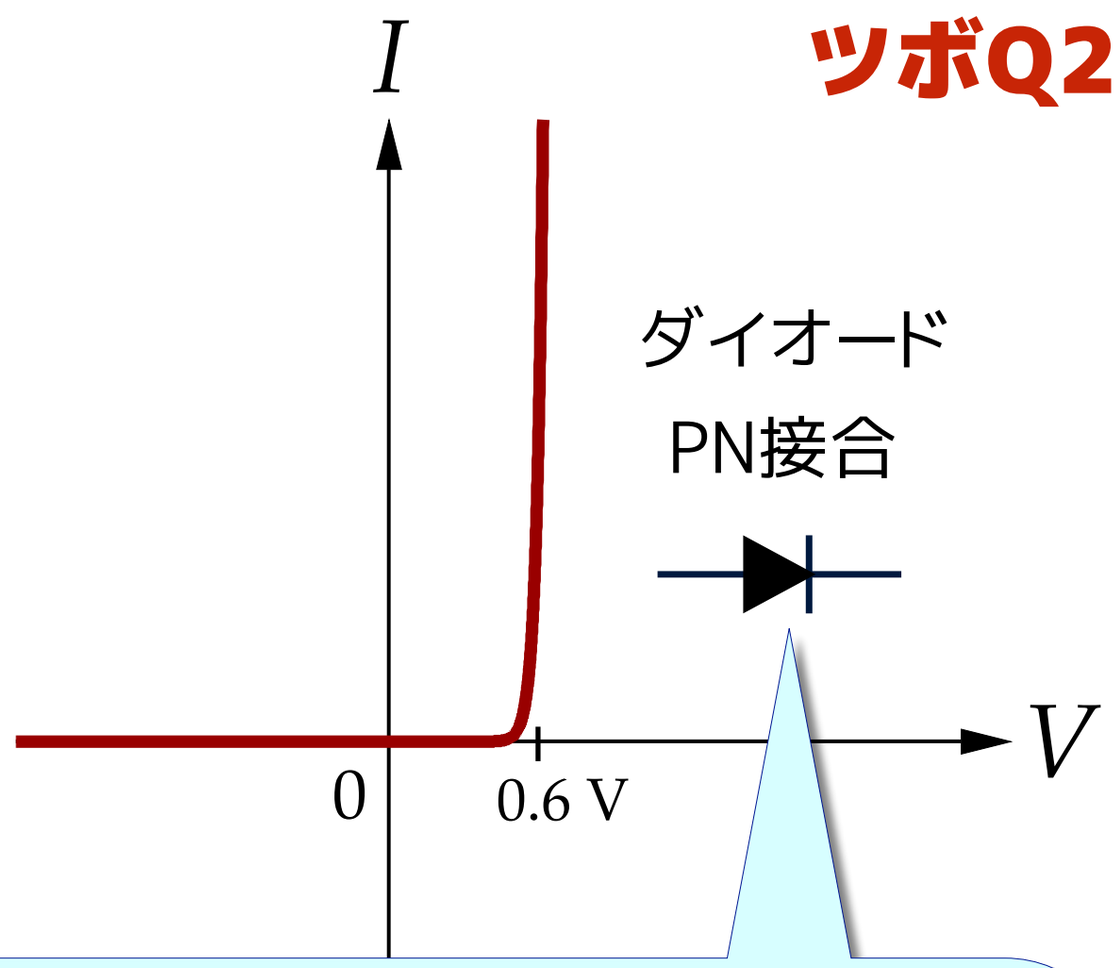
非線形素子

ツボQ2

オームの法則

$$V = RI$$





ダイオード

PN接合

非対称的

- 順方向は通すが、逆は通さない
- ONは速いが、OFFは遅い

なぜ、対称性が破れるのか？

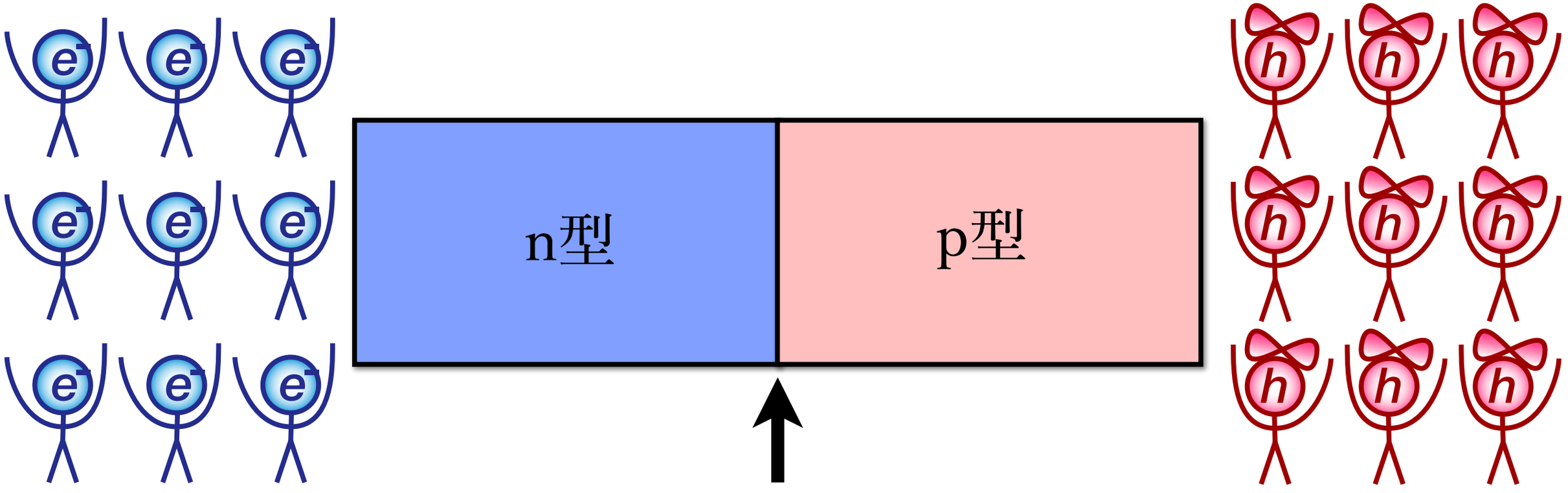
課題

固体中の電子を自在に操りたい

でも、どうやって?

1. キャリヤ注入により、電子･ホール対称性を、人為的に崩す。

2. 電子が動く n 型 と ホールが動く p 型 を、接合する。



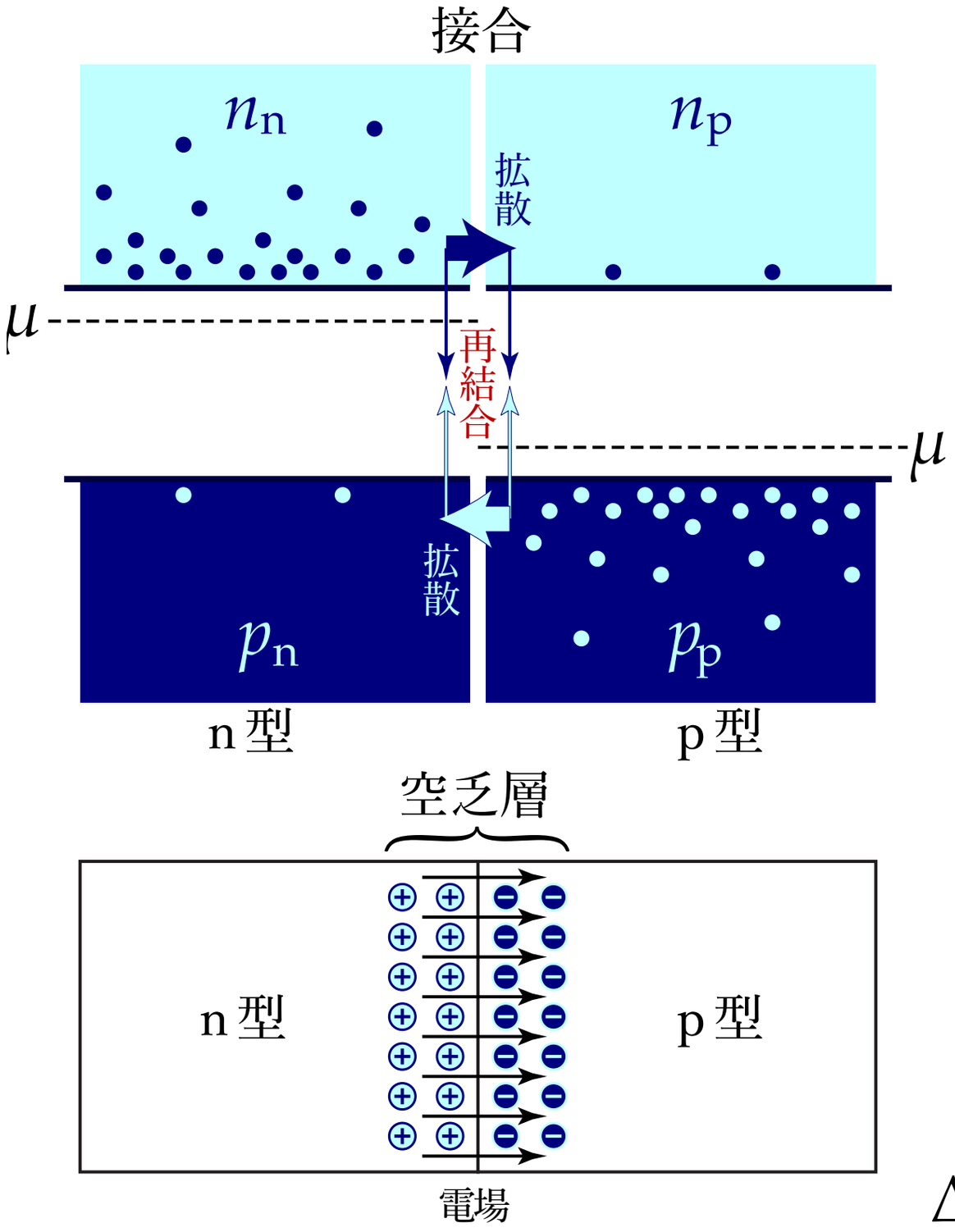
電子くん と ホールちゃん の
出会いの場

方針

電子過多と
ホール過多の
半導体を接合する

・pn接合

pn接合の形成



キャリヤーの相互拡散

再結合

空乏層の形成

$$\Delta\phi = -\frac{\rho}{\epsilon}$$

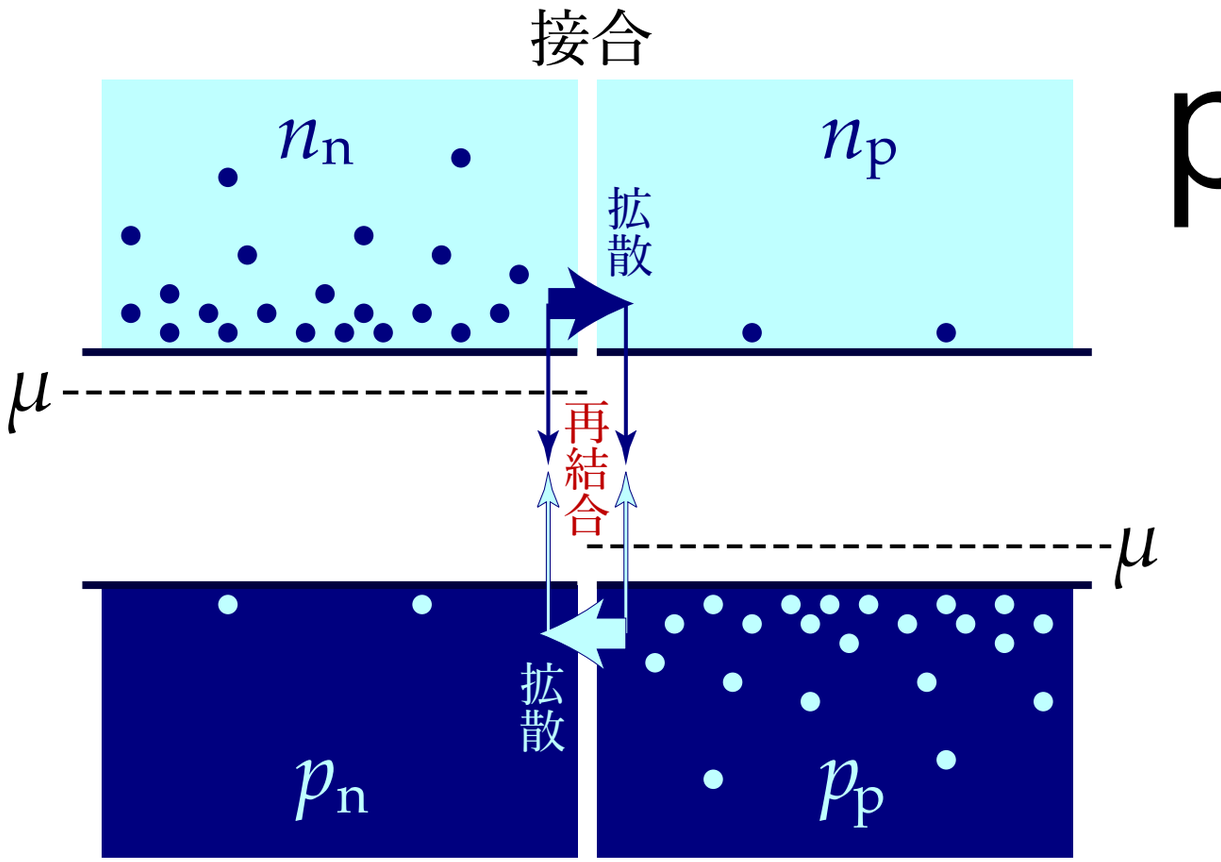
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

内蔵電場

内蔵電位

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi$$

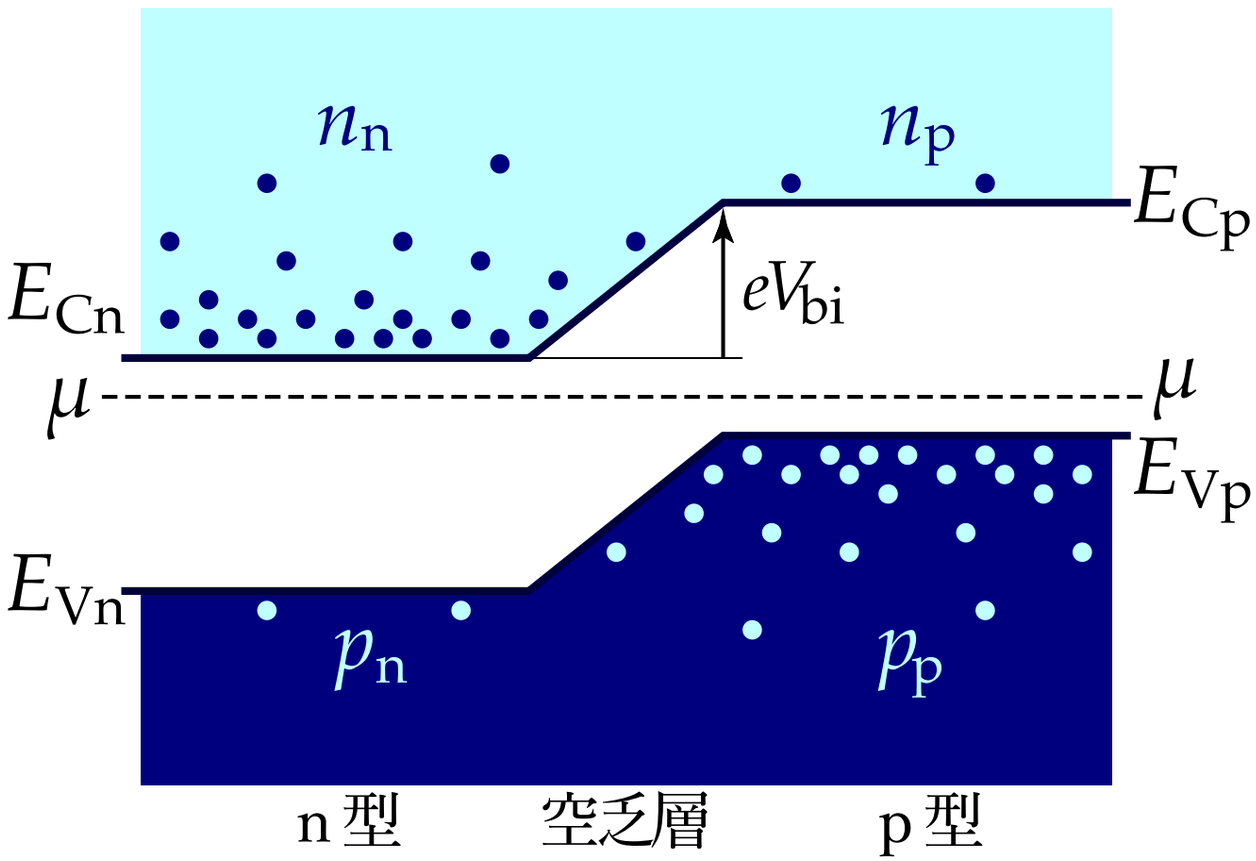
pn接合の形成



接合直後

↓

平衡



板書

内蔵電位

整流方程式

built-in

内蔵電位

$$eV_{\mathrm{bi}} \overset{\text{def.}}{=} E_{\mathrm{Cp}} - E_{\mathrm{Cn}}$$

$$\begin{cases} n_{\mathrm{n}} = N_{\mathrm{C}}^{\mathrm{eff}} \exp\left(-\dfrac{E_{\mathrm{Cn}} - \mu}{k_{\mathrm{B}}T}\right) \\ n_{\mathrm{p}} = N_{\mathrm{C}}^{\mathrm{eff}} \exp\left(-\dfrac{E_{\mathrm{Cp}} - \mu}{k_{\mathrm{B}}T}\right) \end{cases} \Rightarrow \frac{n_{\mathrm{n}}}{n_{\mathrm{p}}} = \exp\left(\frac{eV_{\mathrm{bi}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

電子密度の比

$$eV_{\mathrm{bi}} = k_{\mathrm{B}}T \cdot \ln\left(\frac{N_{\mathrm{D}}N_{\mathrm{A}}}{n_{\mathrm{i}}^2}\right)$$

二種類の電流

逆方向： 勾配は十分だが、水源が枯渇。

ちょろちょろ湧き出して勾配を下る流れ（**ドリフト電流**）

$$I_{\mathrm{e}}^{\mathrm{dt}} = C_{\mathrm{e}}\, n_{\mathrm{p}}$$

drift

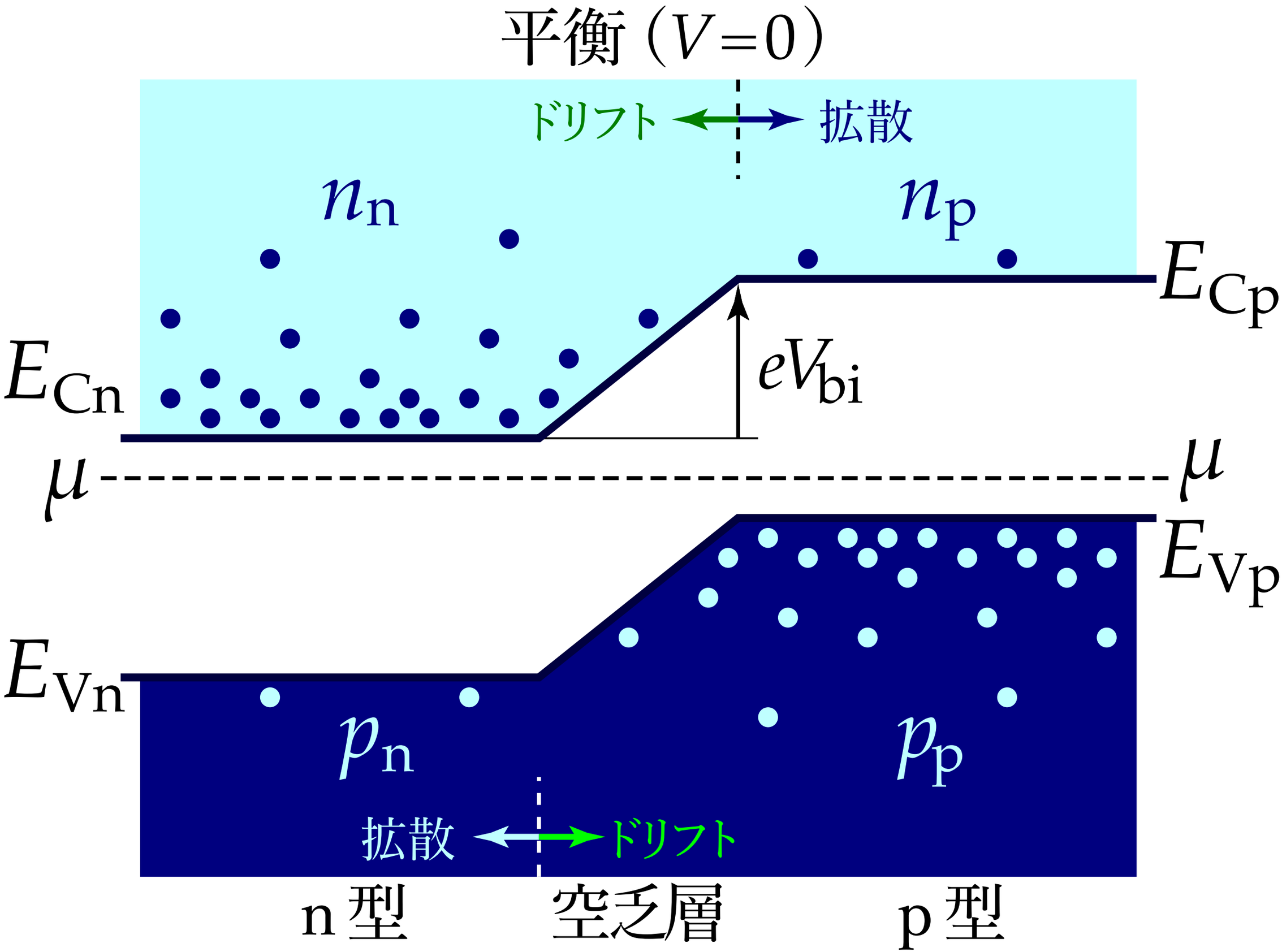
平衡

順方向： 水源は潤沢だが、逆勾配で堰き止め。

ちゃぷちゃぷダムから溢れて拡散する流れ（**拡散電流**）

$$I_{\mathrm{e}}^{\mathrm{ds}}(V) = C_{\mathrm{e}}\, n^{\mathrm{ds}}(V) \;=\; C_{\mathrm{e}}\, n_{\mathrm{p}} \exp\!\left(\frac{eV}{k_{\mathrm{B}}T}\right)$$

diffusion


平衡（$V=0$）
ドリフト
拡散
n_{n}
n_{p}
E_{Cp}
E_{Cn}
eV_{bi}
μ
μ
E_{Vp}
E_{Vn}
p_{n}
p_{p}
拡散
ドリフト
n 型
空乏層
p 型

順方向（$V>0$）

ドリフト ← → 拡散

n_n

n_p

$e(V_\mathrm{bi}-V)$

μ

μ

p_n

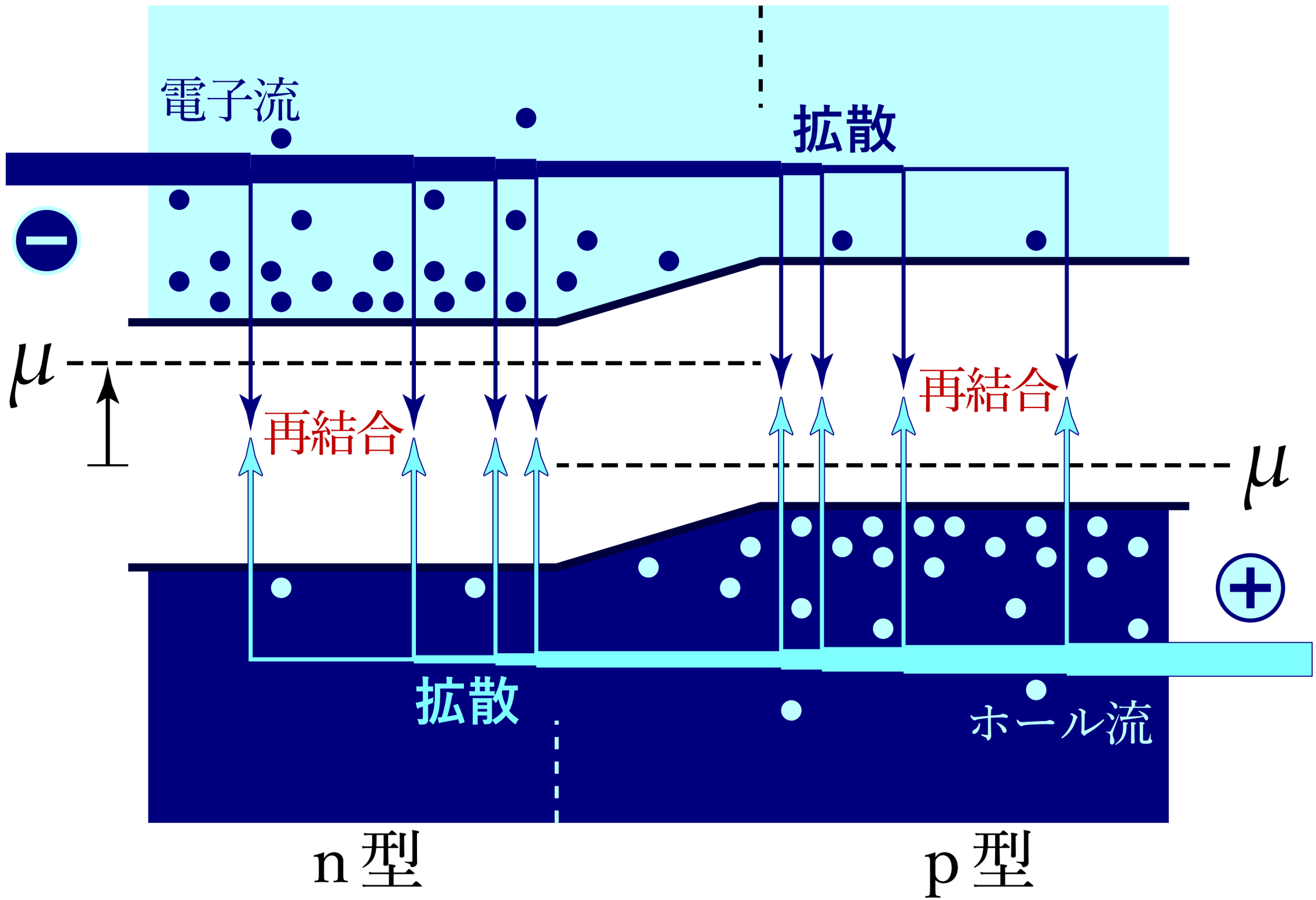
p_p

拡散 ← → ドリフト

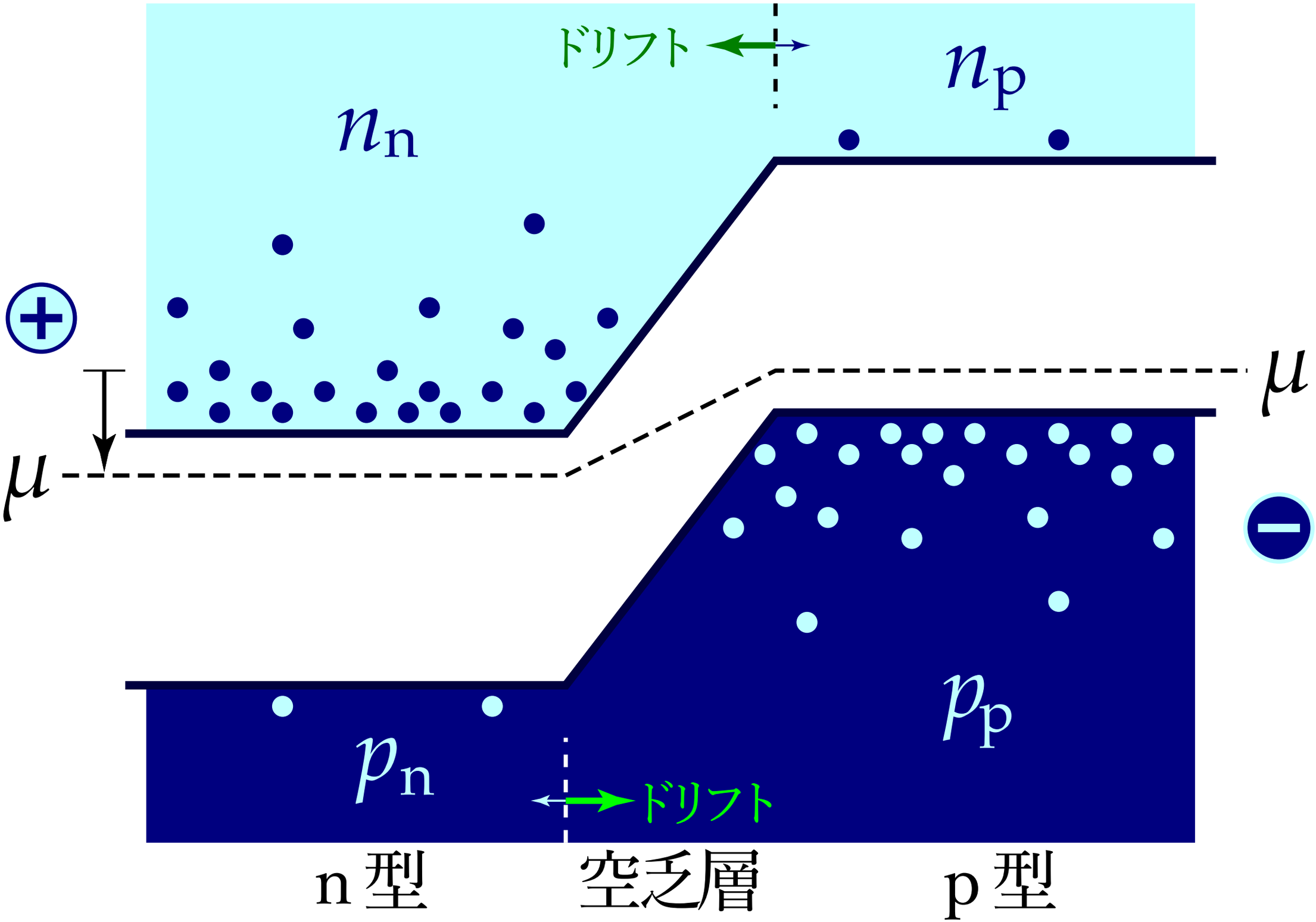
n 型

p 型

順方向（$V>0$）



逆方向（$V<0$）


ドリフト
n_{n}
n_{p}
μ
μ
p_{n}
p_{p}
ドリフト
n 型
空乏層
p 型

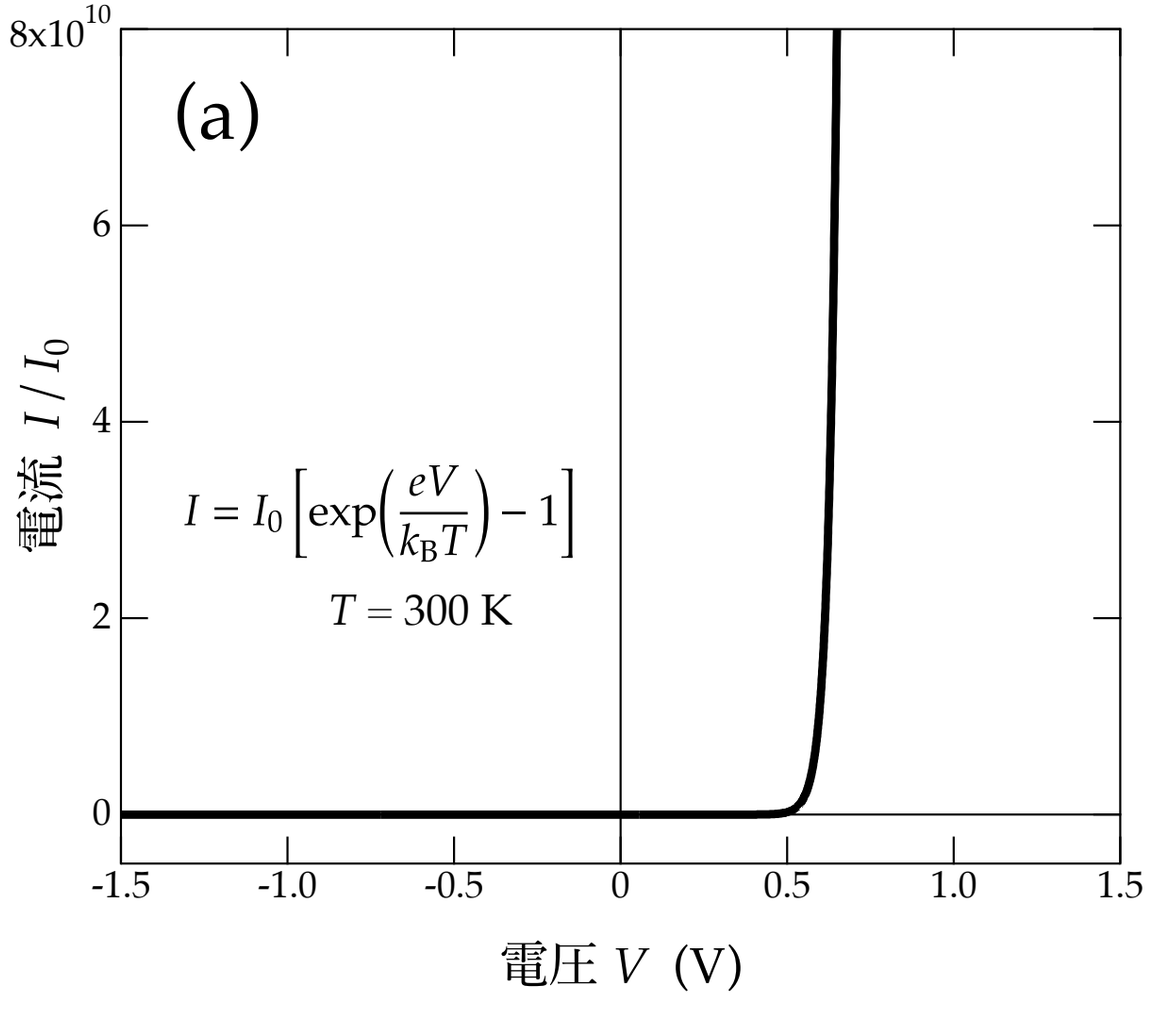
ダイオードの理想的な電流電圧特性

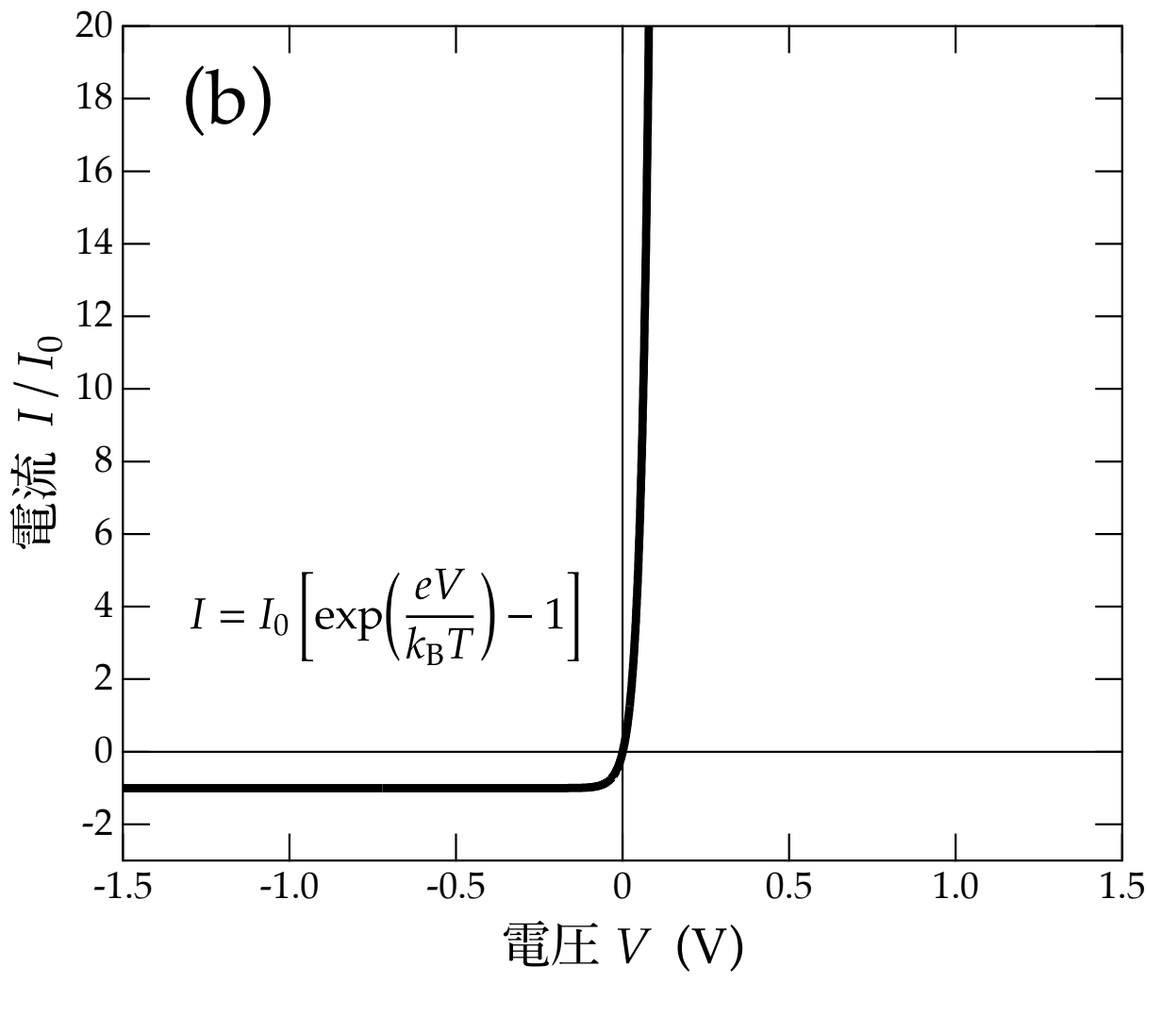
$$I(V) = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_{\mathrm{B}} T} \right) - 1 \right]$$

逆方向飽和電流　$I_0 = C_{\mathrm{e}}\, n_{\mathrm{p}} + C_{\mathrm{h}}\, p_{\mathrm{n}}$

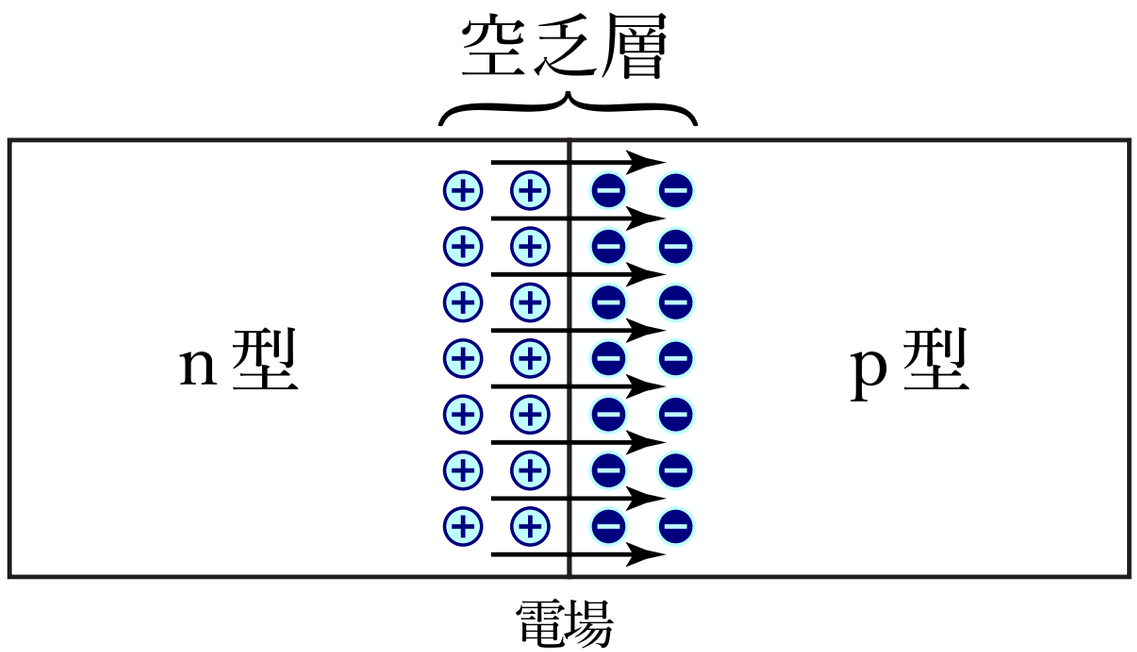
ツボQ1

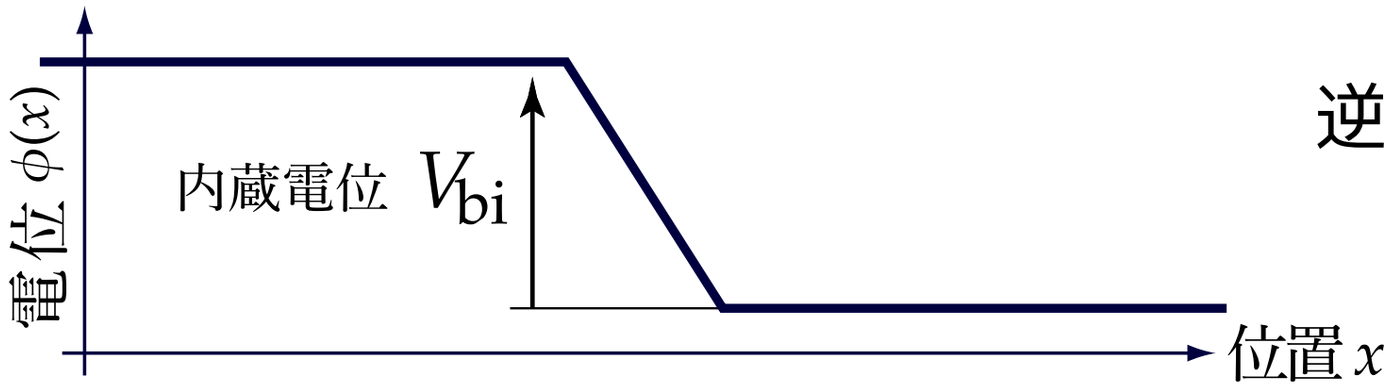
300 K ↕ 0.026 meV





隠れたコンデンサ





バリキャップ

（可変容量ダイオード、バラクタ）

- **スイッチングの遅延**や**高周波特性低下**の要因

- **電圧により容量が変わる**

順方向の電圧：空乏層が狭まる。
→ 電流を通す。容量増加。

逆方向の電圧：空乏層が広がる。
→ 電流を遮断。容量低下。

OFF→ON は速いが、
ON→OFF は遅い。

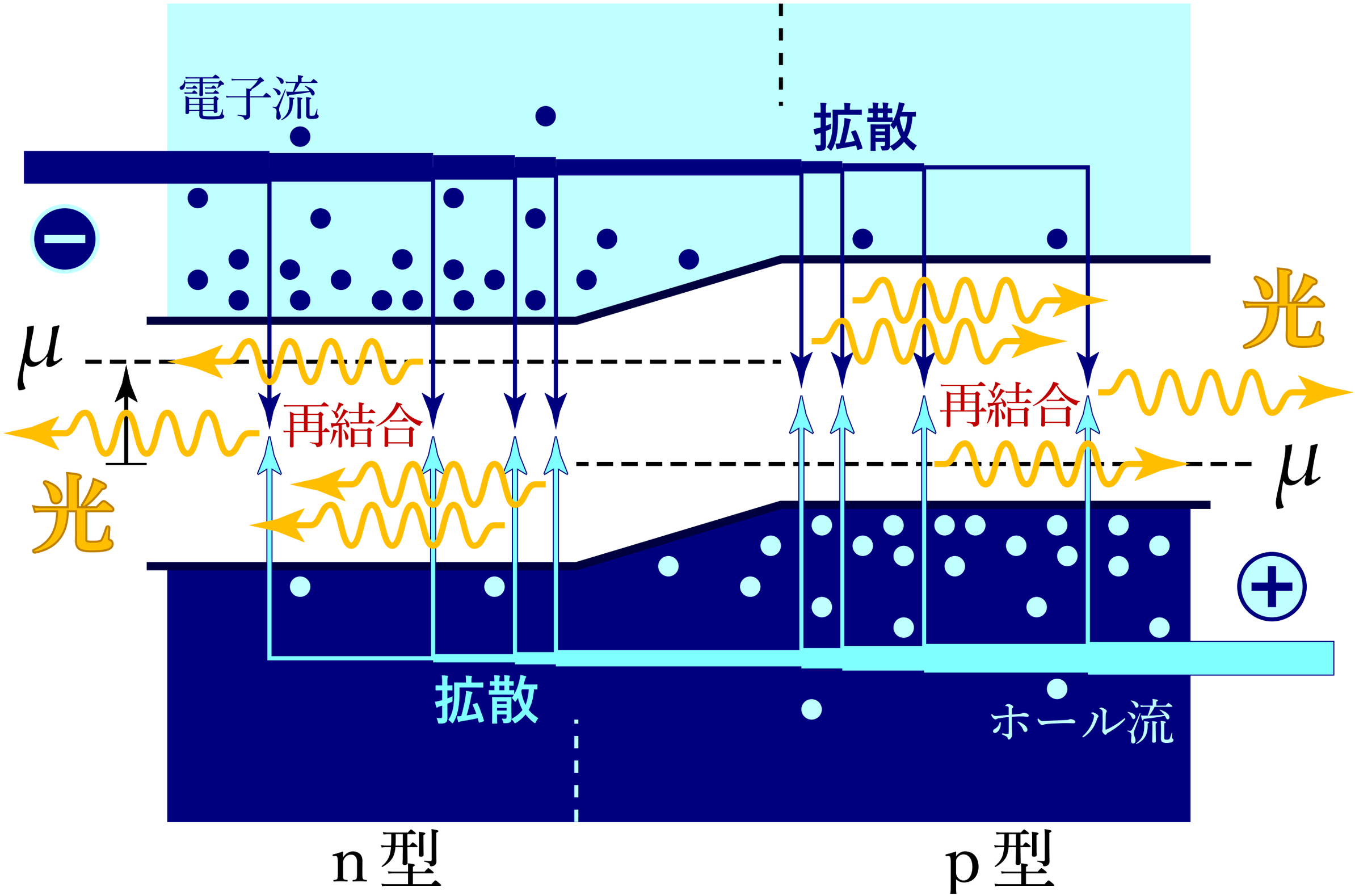
- 電圧制御発振器
- 位相同期回路
- 周波数シンセサイザ

発光ダイオード
Light Emitting Diode (LED)

電子・ホール再結合による **光放出** を利用

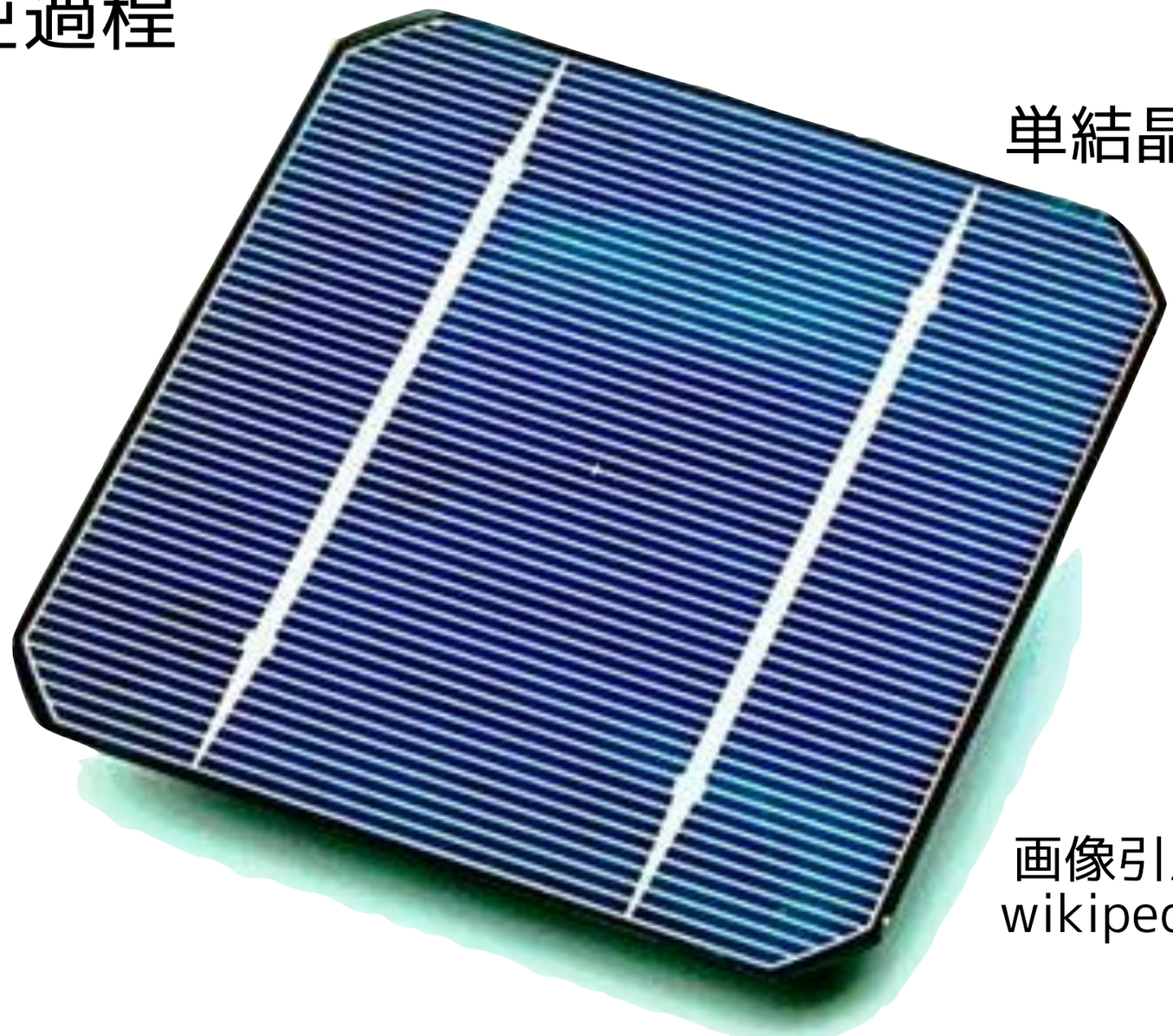
- エネルギー変換効率が良い
- 低消費電力な光源

発光ダイオード (LED)



太陽電池

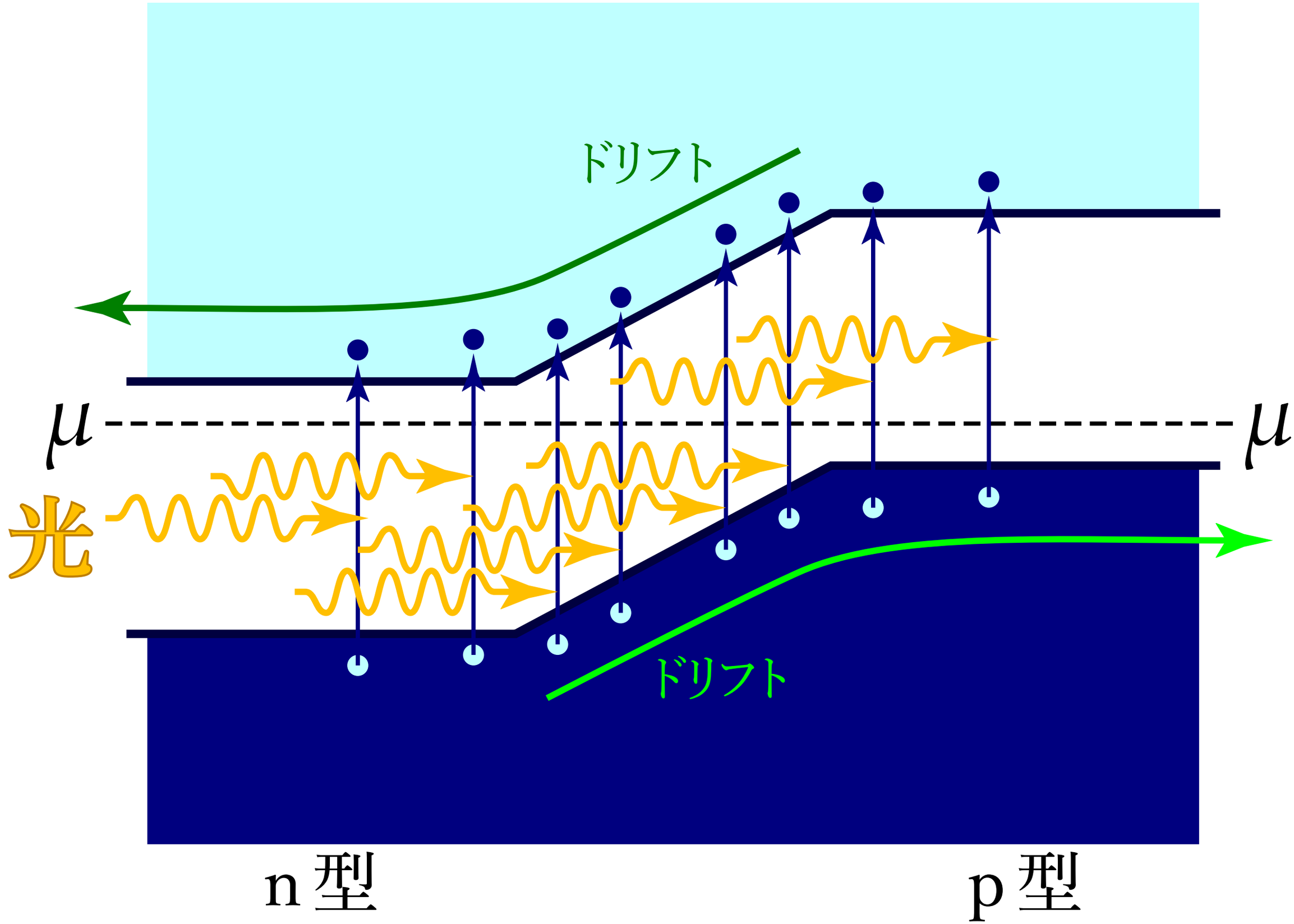
- 光による電子･ホール対生成を、電流に変換
- LEDの逆過程



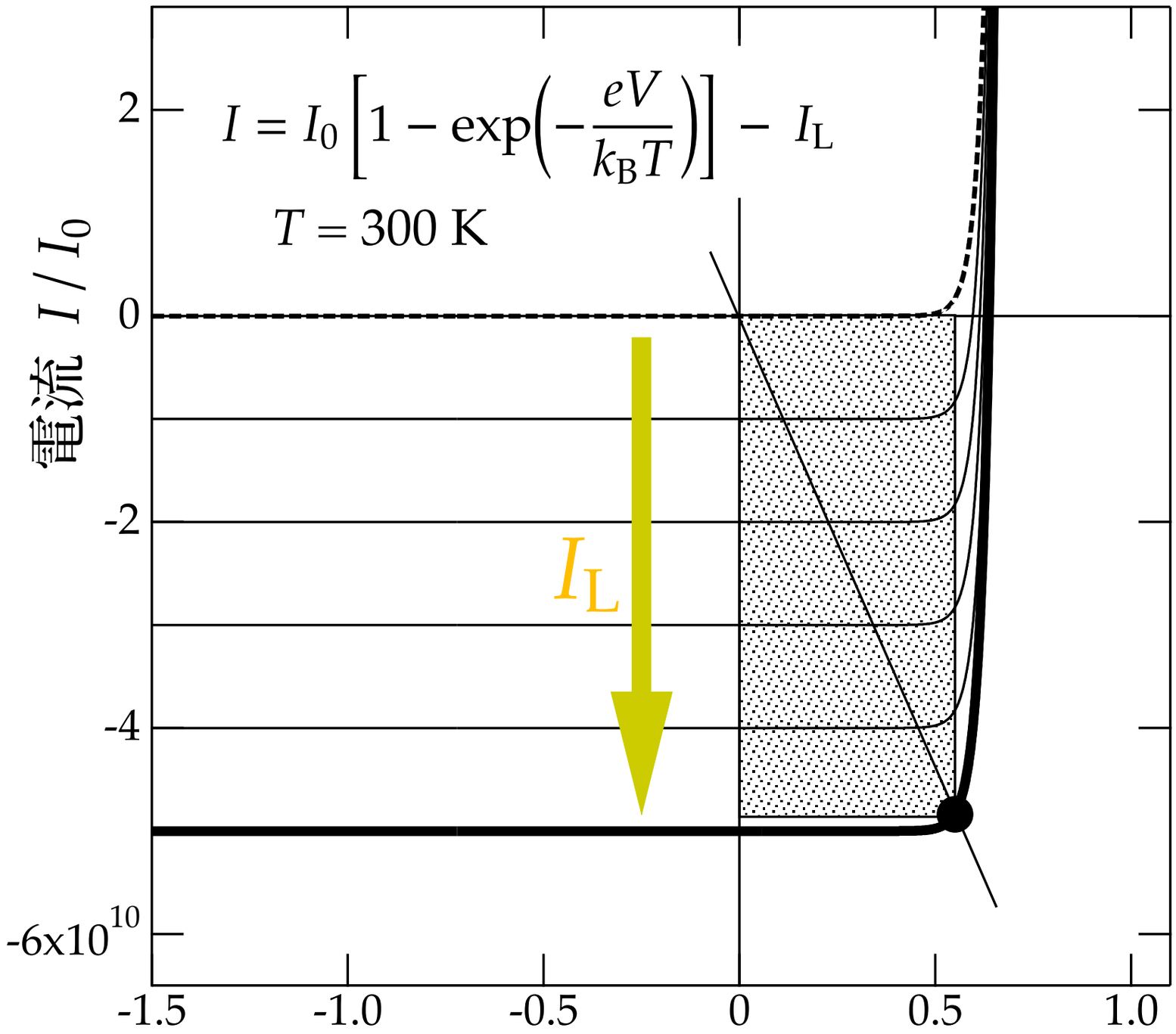
単結晶シリコン型
太陽電池

画像引用
wikipedia

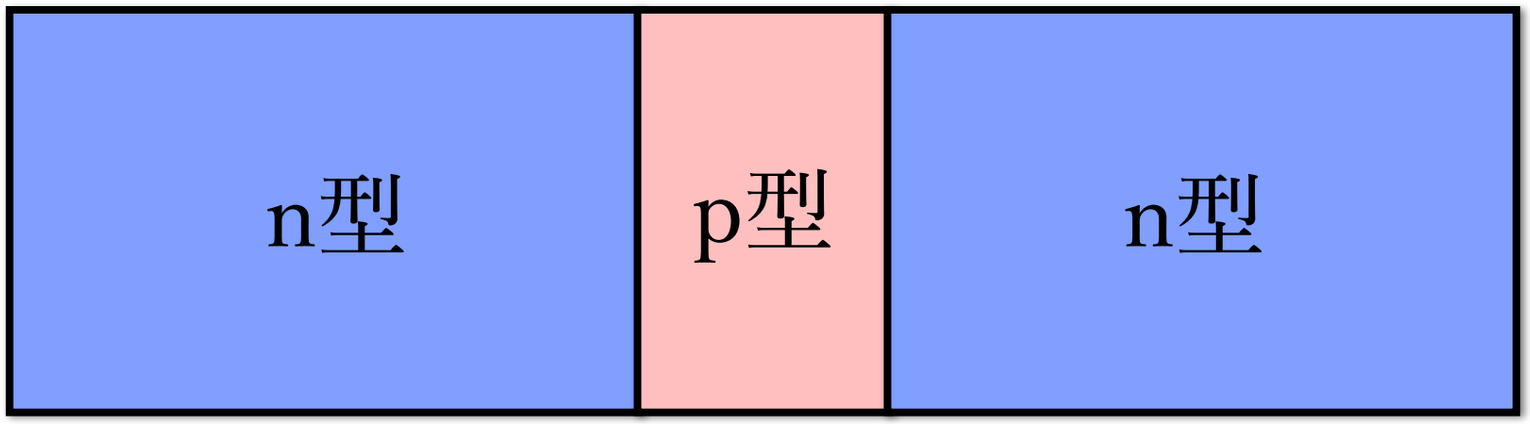
太陽電池

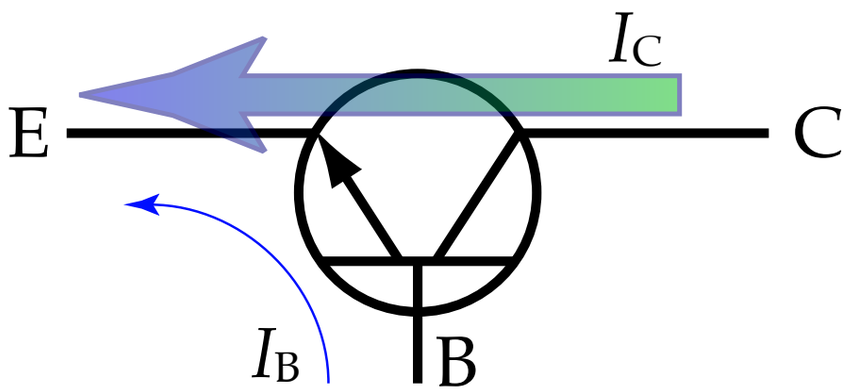


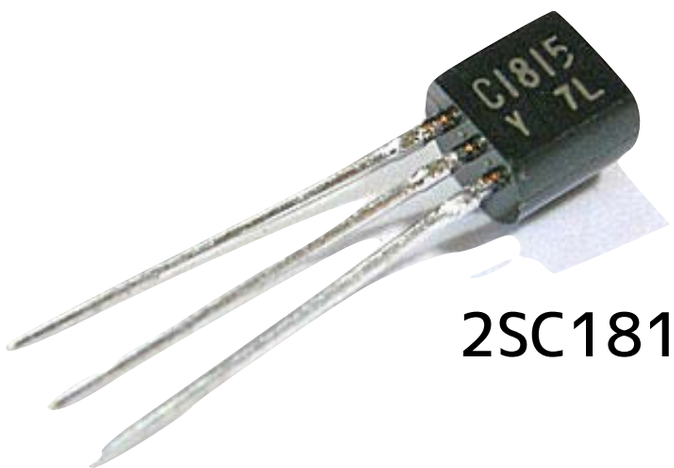
太陽電池の電流電圧特性



npn接合





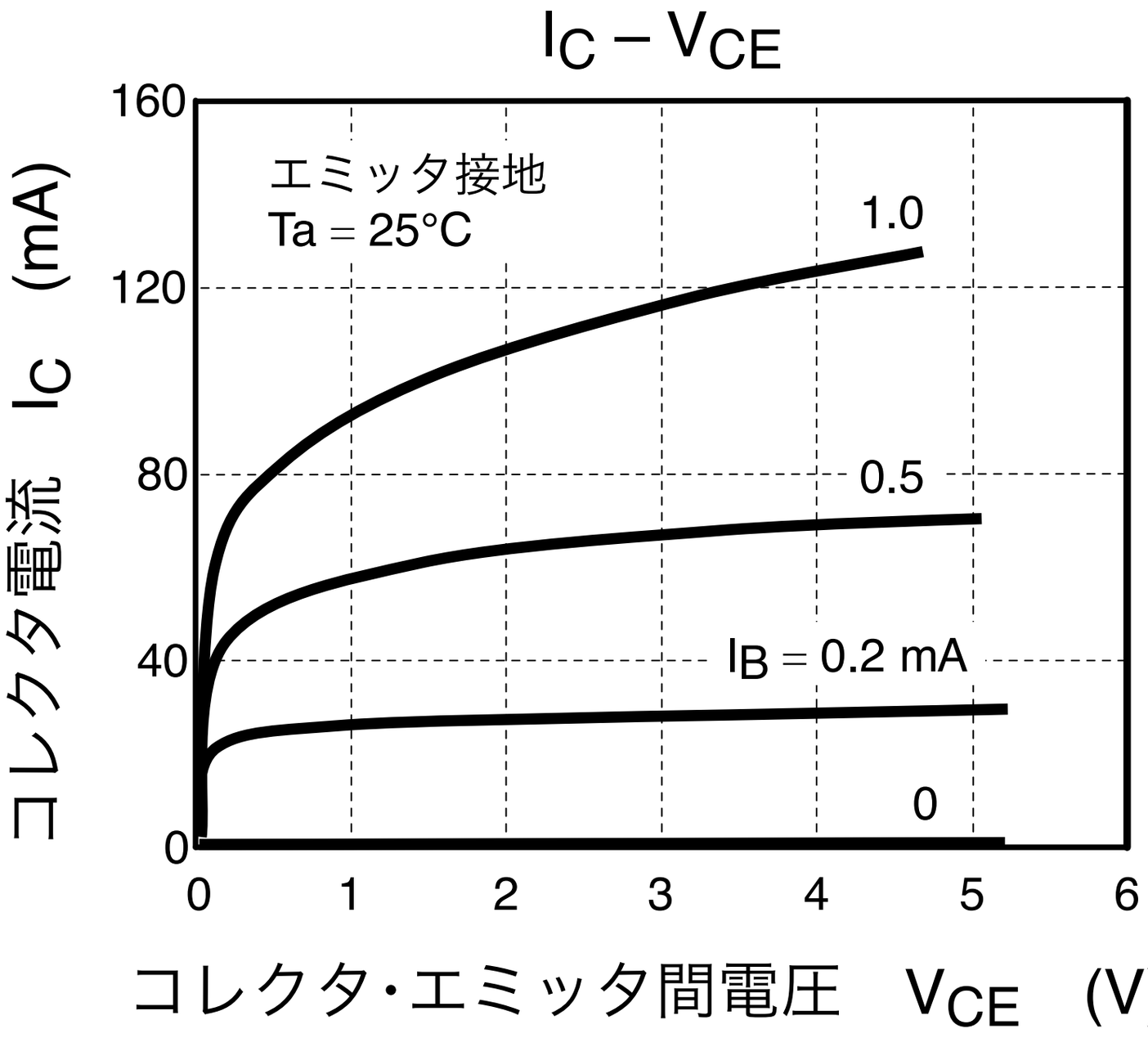


2SC1815

- バイポーラ･トランジスタ
- **電流で電流を制御**
- pn接合を背中合わせにして、少数キャリヤを流し込む

コレクタ C ― エミッタ E 間の特性

ツボQ3



2SC1815の
スペックシートより抜粋

定電流特性

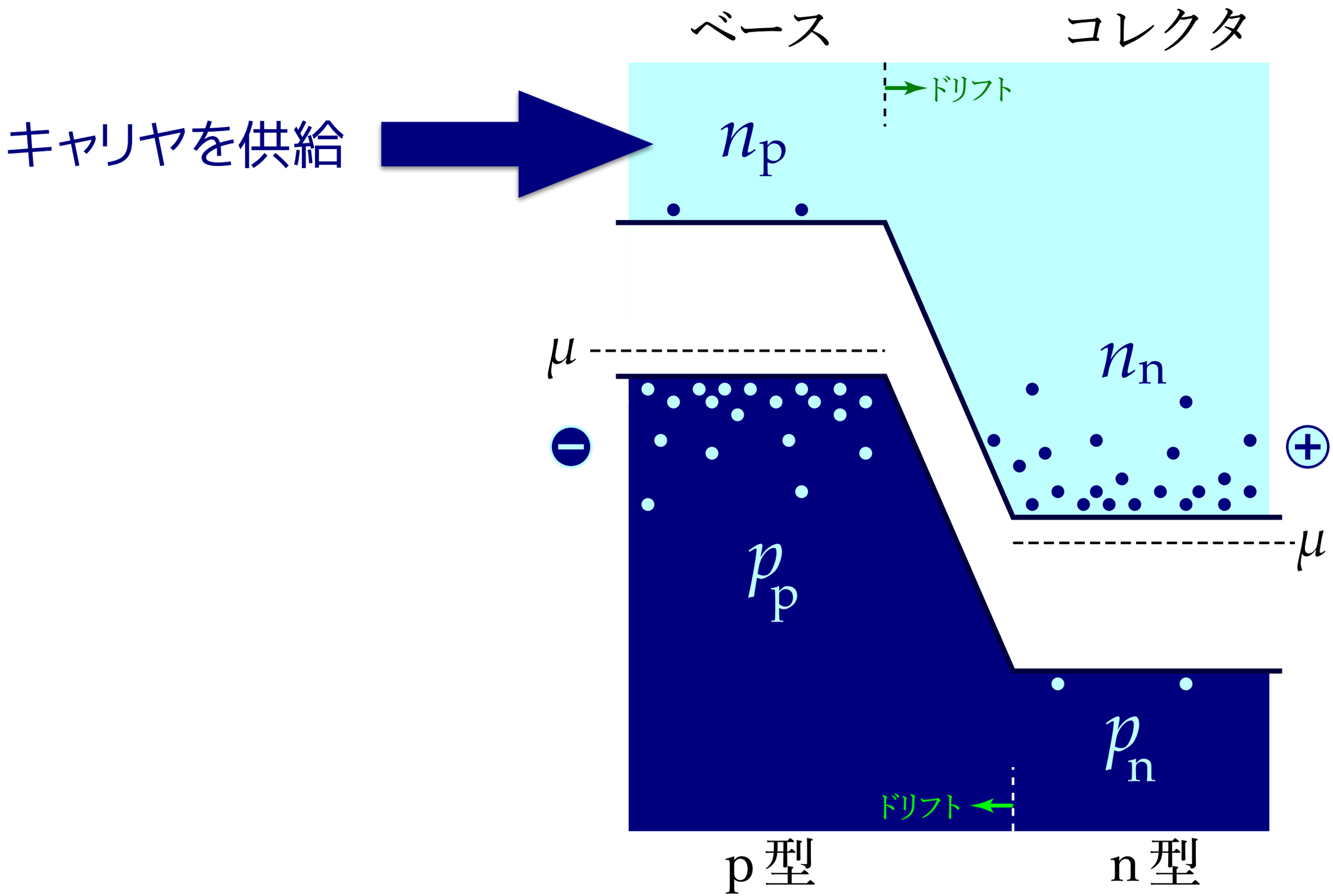
$$\frac{dI_C}{dV_{CE}} \simeq 0$$

I_C を決めても、
V_{CE} が定まらない。

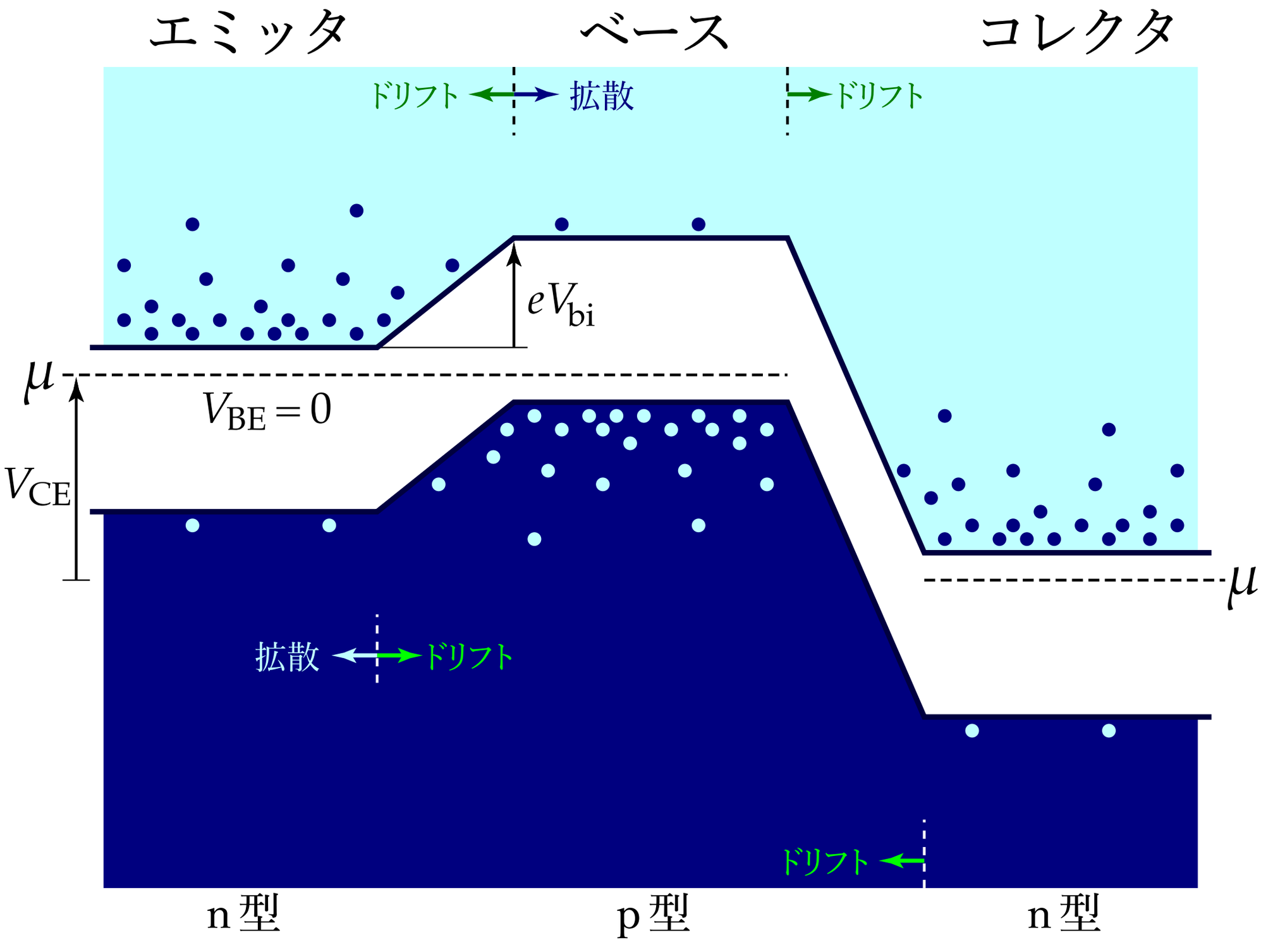
電流増幅　$I_C = h_{FE} I_B$

逆には流れないはずだが……

$I_{\mathrm{e}}^{\mathrm{dt}} = C_{\mathrm{e}}\, n_{\mathrm{p}}$ 少数キャリヤ密度で決まる

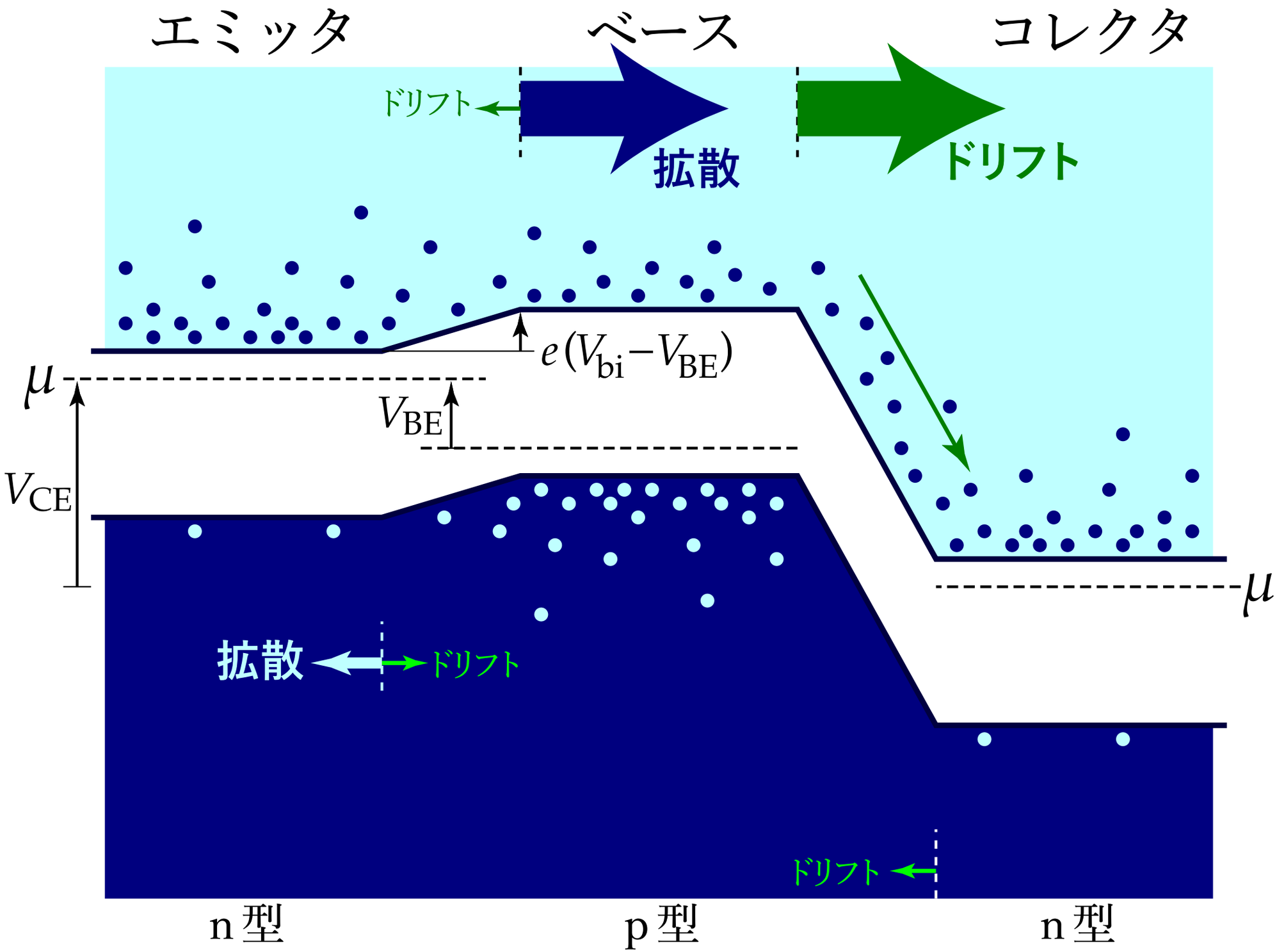


ベース電流 $I_{\mathrm{B}} = 0$ のとき

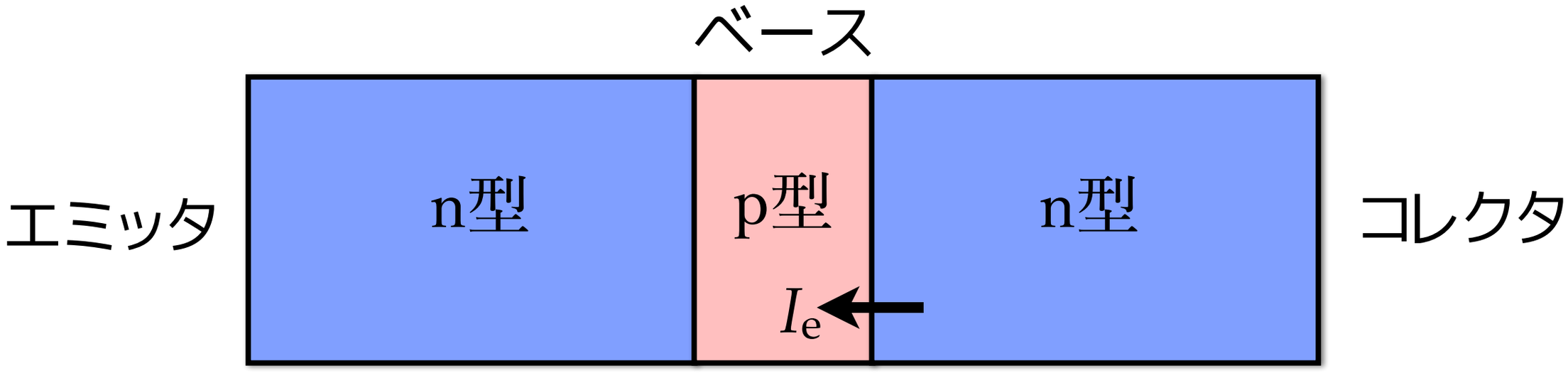


ベース電流 $I_{\mathrm{B}} > 0$ のとき

少数キャリヤ n_{p} が増大。



逆方向飽和電流 の 活用



pn接合において、電子が担う電流（逆バイアス）

$$-I_e(V) = C_e n_p \left[1 - \exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right)\right]$$

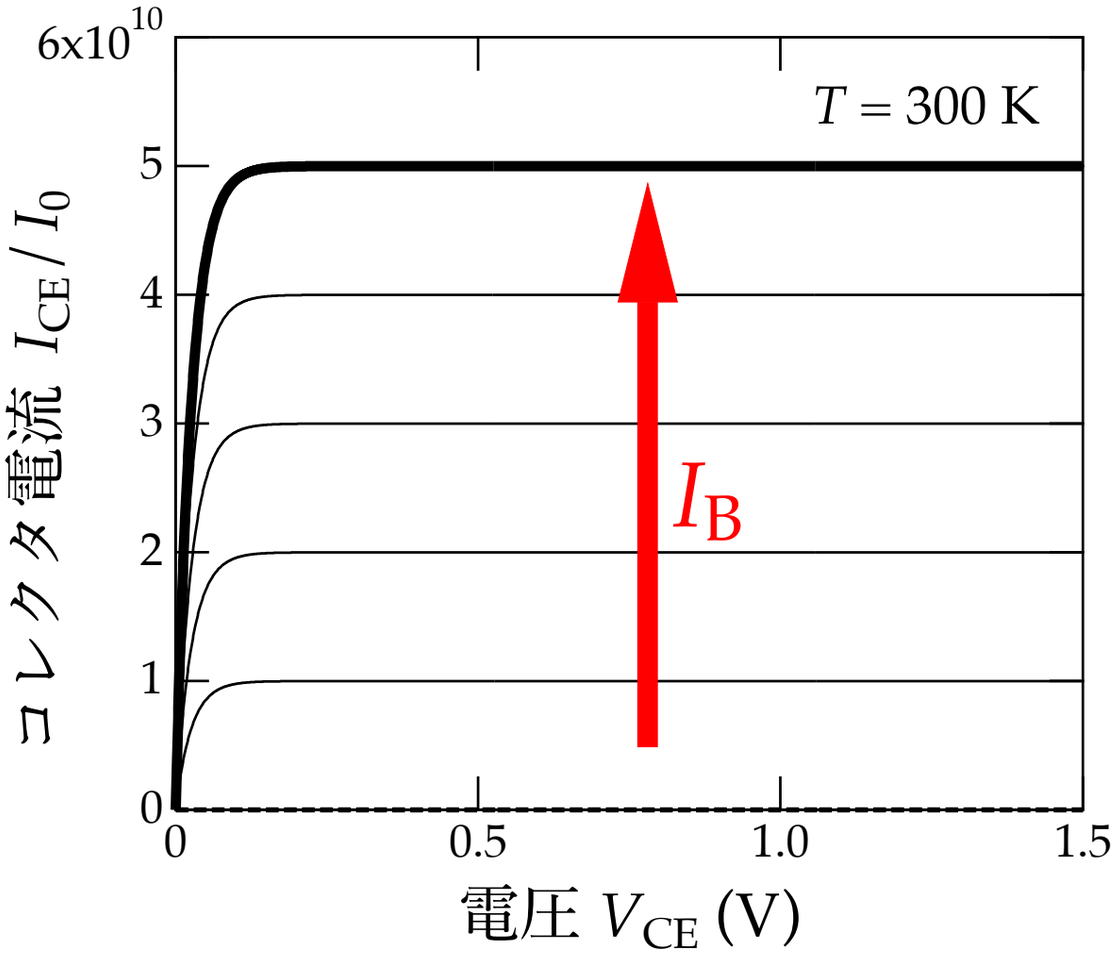
裏側のpn接合で、少数キャリヤ n_p を流し込む（ベース電流 I_B）

$$I_{CE} = \left(h_{FE} I_B + I_0\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{eV_{CE}}{k_B T}\right)\right]$$

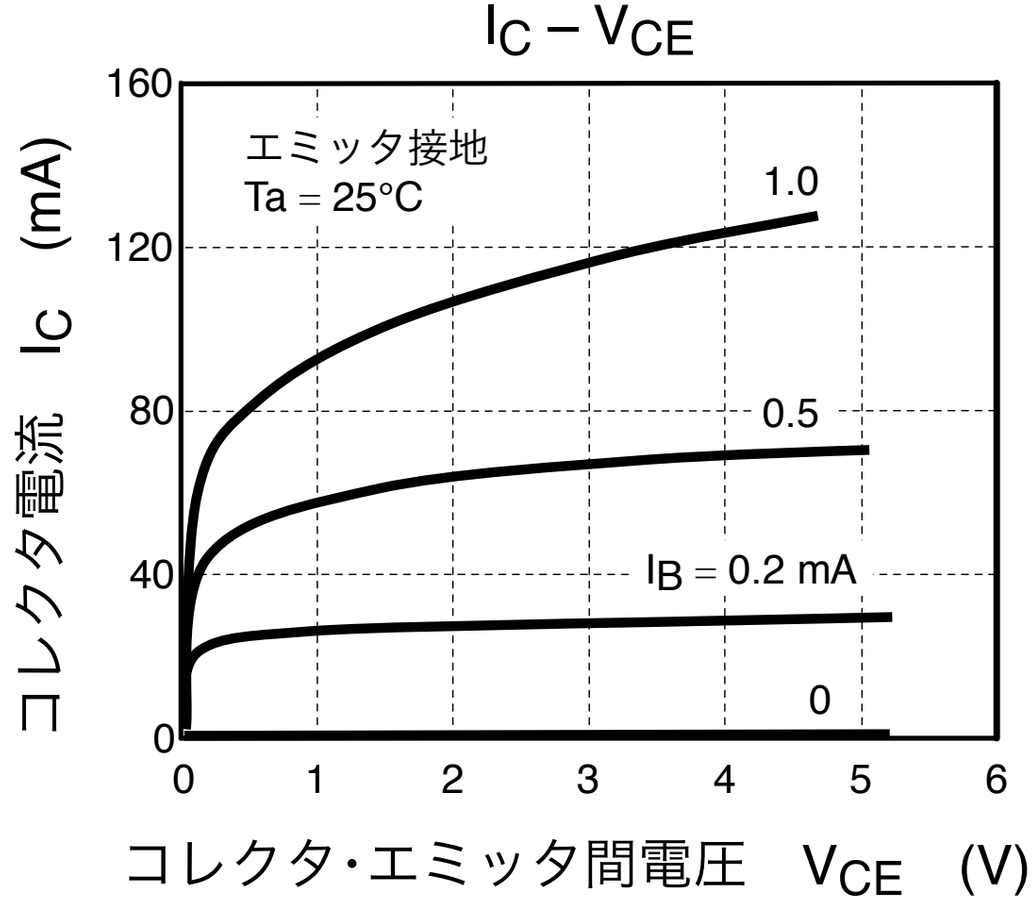
トランジスタの電流電圧特性

$$I_{\mathrm{CE}} = \left(h_{\mathrm{FE}} I_{\mathrm{B}} + I_0\right)\left[1 - \exp\left(-\frac{eV_{\mathrm{CE}}}{k_{\mathrm{B}}T}\right)\right]$$

理論曲線



2SC1815のスペックシートより



電流増幅 と **定電流特性** を再現

デジタル計算器

コンピューター

あらゆる計算

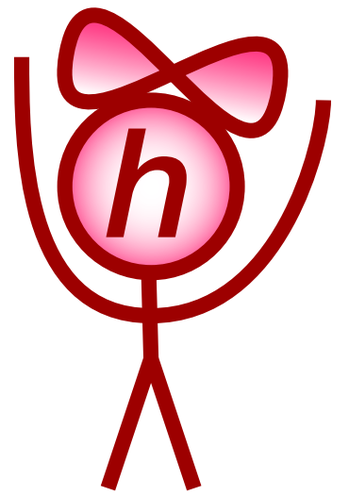
デジタル論理ゲート (AND, OR, NOT)

増幅回路、スイッチング回路

トランジスタ

まとめ

~~ 非線形素子 ~~

p型 と n型 を接合して、非線形素子を作り、様々な機能を実現する

- 整流方程式 $I(V) = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{k_B T}\right) - 1 \right]$
- バリキャップ
- 発光ダイオード (LED)
- 太陽電池
- バイポーラ･トランジスタ