



i-PERC

電気通信大学

基礎電子工学CH-11

曾我部 東馬

電気通信大学

i-パワーエネルギーシステム研究センター(i-PERC)

概要:

- PN接合
- J-V関係
- PN接合とコンデンサの関係

光照射しないで不均一過剰少数キャリアを生成する

P型半導体

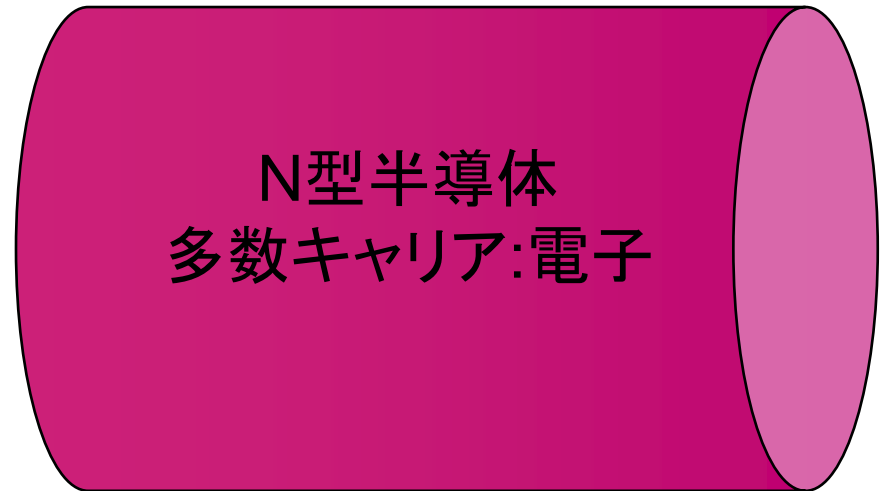
多数キャリア:ホール

過剰少数キャリア:電子

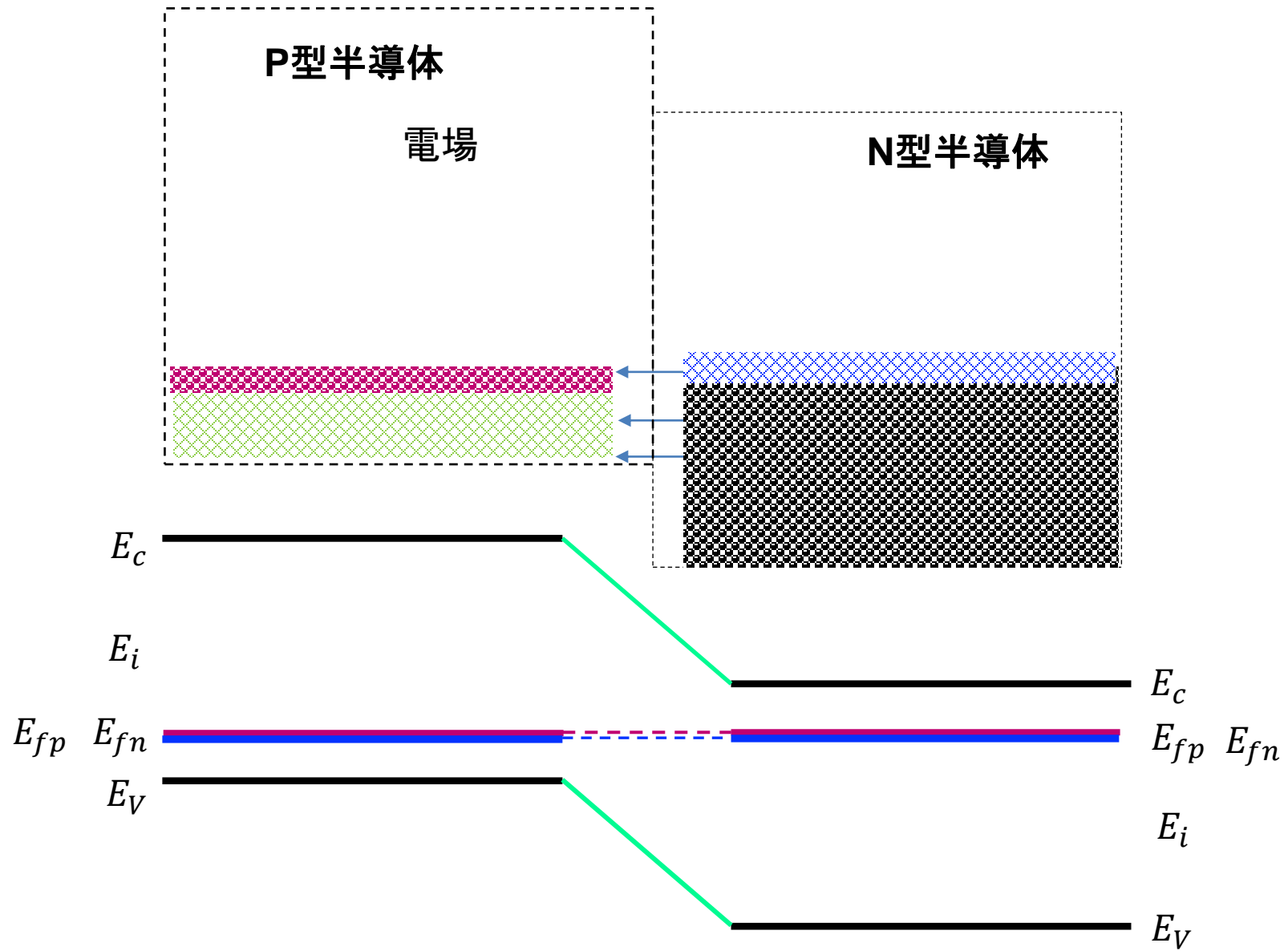


N型半導体

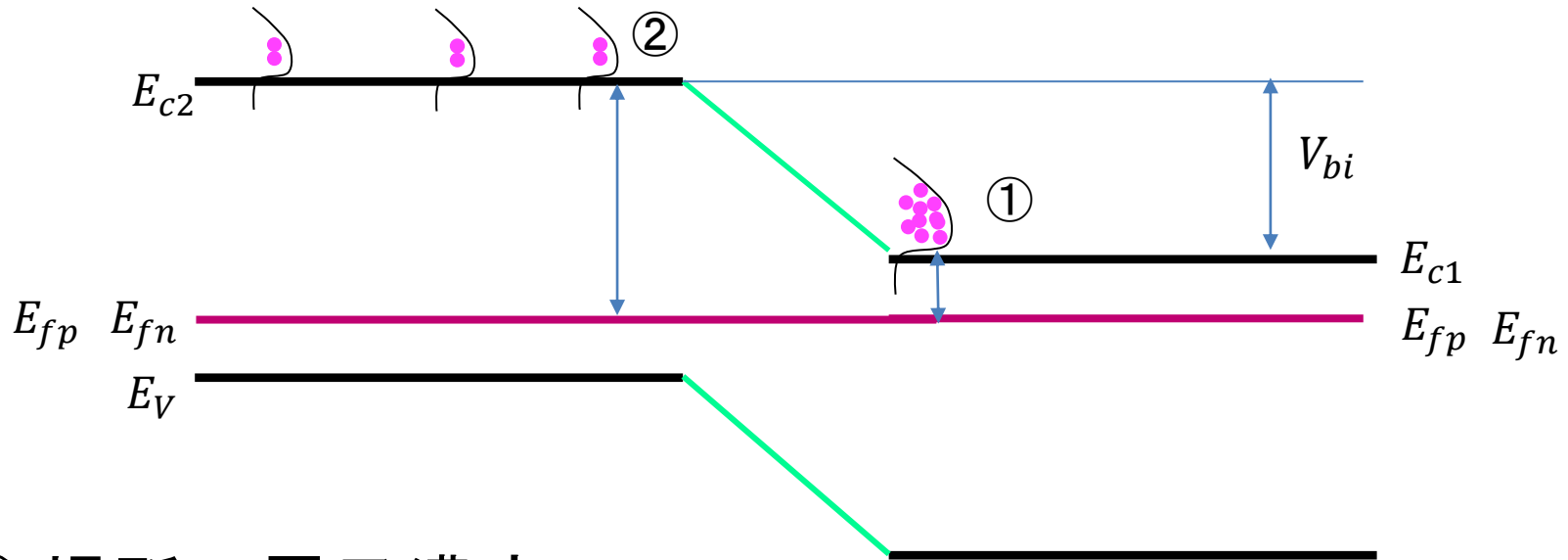
多数キャリア:電子



PN接合



過剰少数キャリアの生成:



① 場所の電子濃度

$$n_N = N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{c1}}{kT}\right)$$

② 場所の電子濃度

$$n_P = N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{c2}}{kT}\right)$$

$$E_{c2} = E_{c1} + V_{bi}$$

關係式1: Built-in Potential \rightarrow 內藏電場: V_{bi}

$$\textcircled{1} \quad n_N = N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{c1}}{kT}\right) = N_d$$

$$E_{c2} = E_{c1} + V_{bi}$$

$$\textcircled{2} \quad n_P = N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{c2}}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{p_P} = \frac{n_i^2}{N_a}$$

$$\frac{\textcircled{1}}{\textcircled{2}} = \exp\left(\frac{E_{c2} - E_{c1}}{kT}\right) = \exp\left(\frac{V_{bi}}{kT}\right) = \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

內藏電場: V_{bi}

$$\exp\left(\frac{V_{bi}}{kT}\right) = \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

$$V_{bi} = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

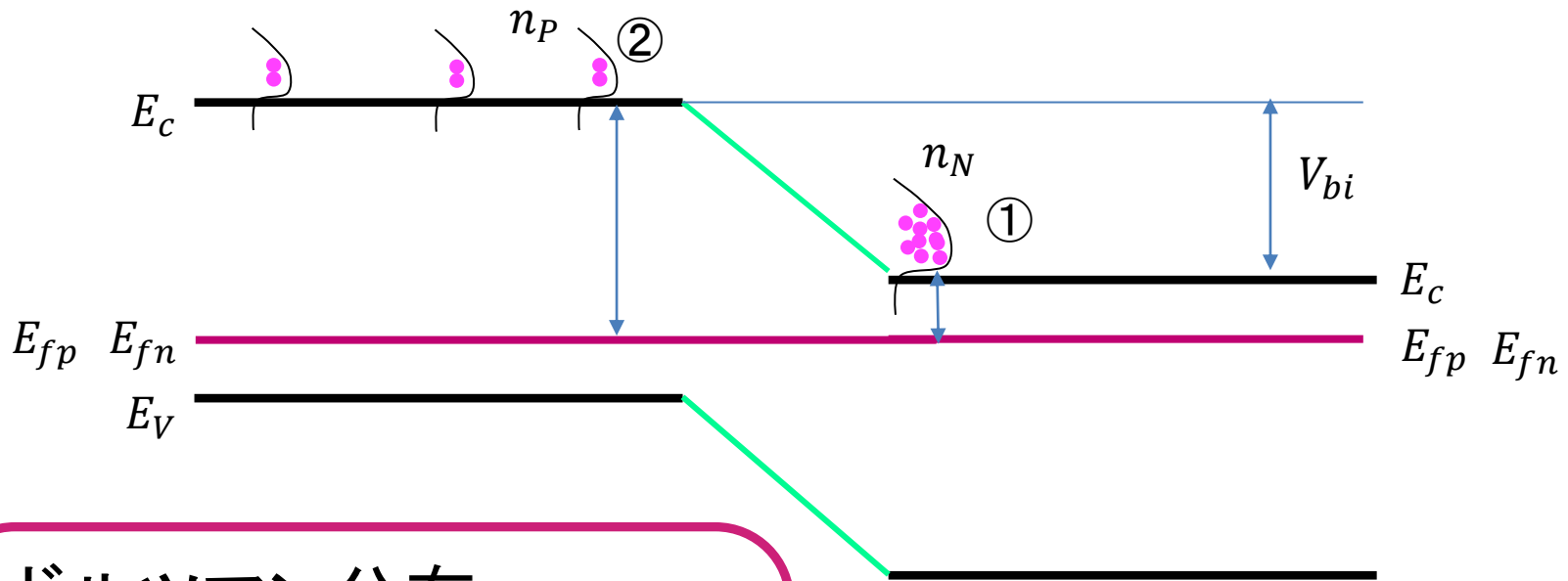
関係式2: 熱平衡時の少数キャリア濃度 n_p

$$n_p = N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - \overbrace{E_{c1} - V_{bi}}^{E_{c2}}}{kT}\right) \quad \text{cloud } E_{c2} = E_{c1} + V_{bi}$$

$$= \underbrace{N_c \exp\left(\frac{E_{fn} - E_{c1}}{kT}\right)}_{n_N} \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right)$$

$$= n_N \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right) = N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right)$$

キャリア存在確率のボルツマン分布と一致する:



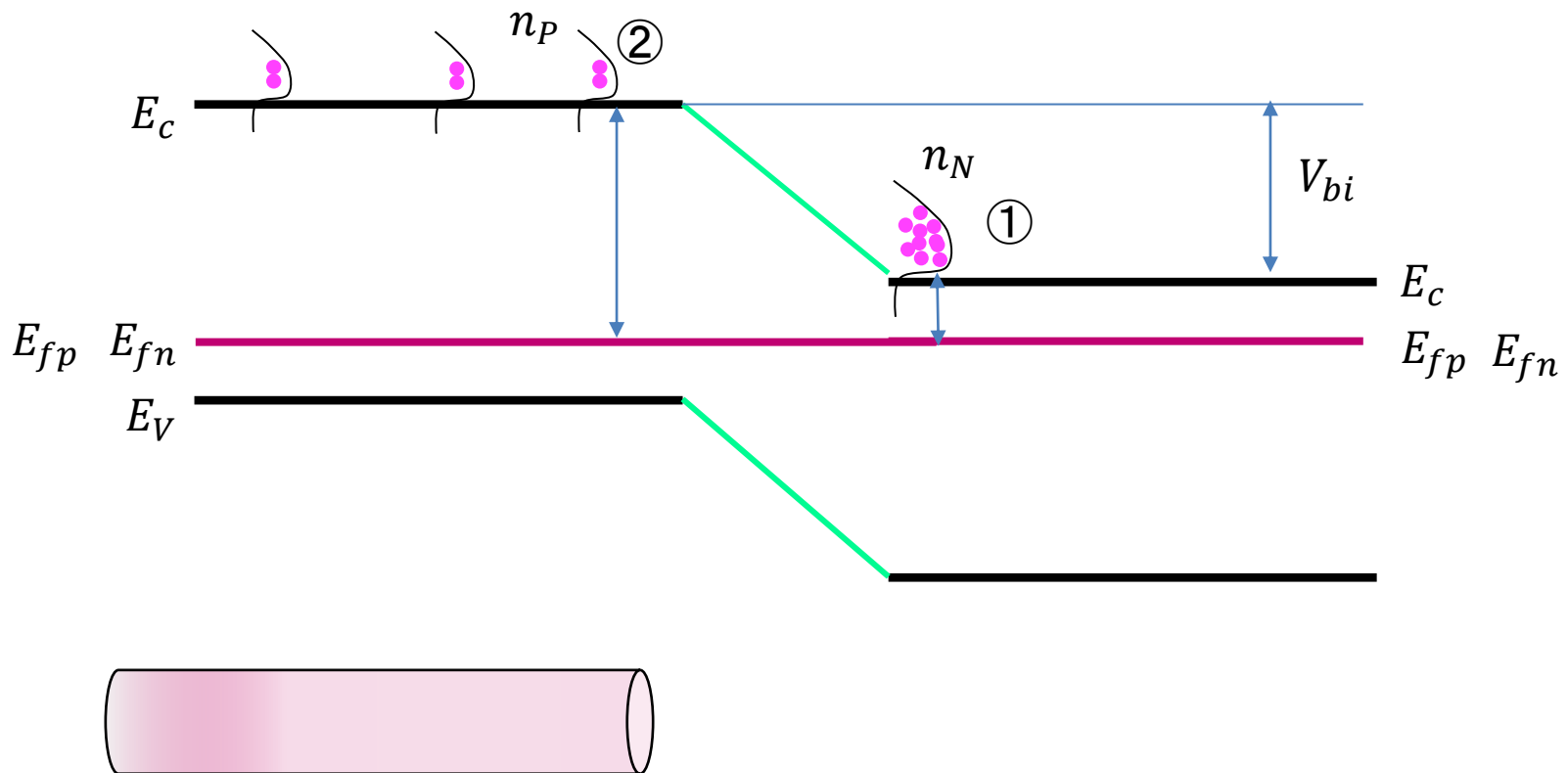
ボルツマン分布

$$p = \exp\left(\frac{-E}{kT}\right)$$



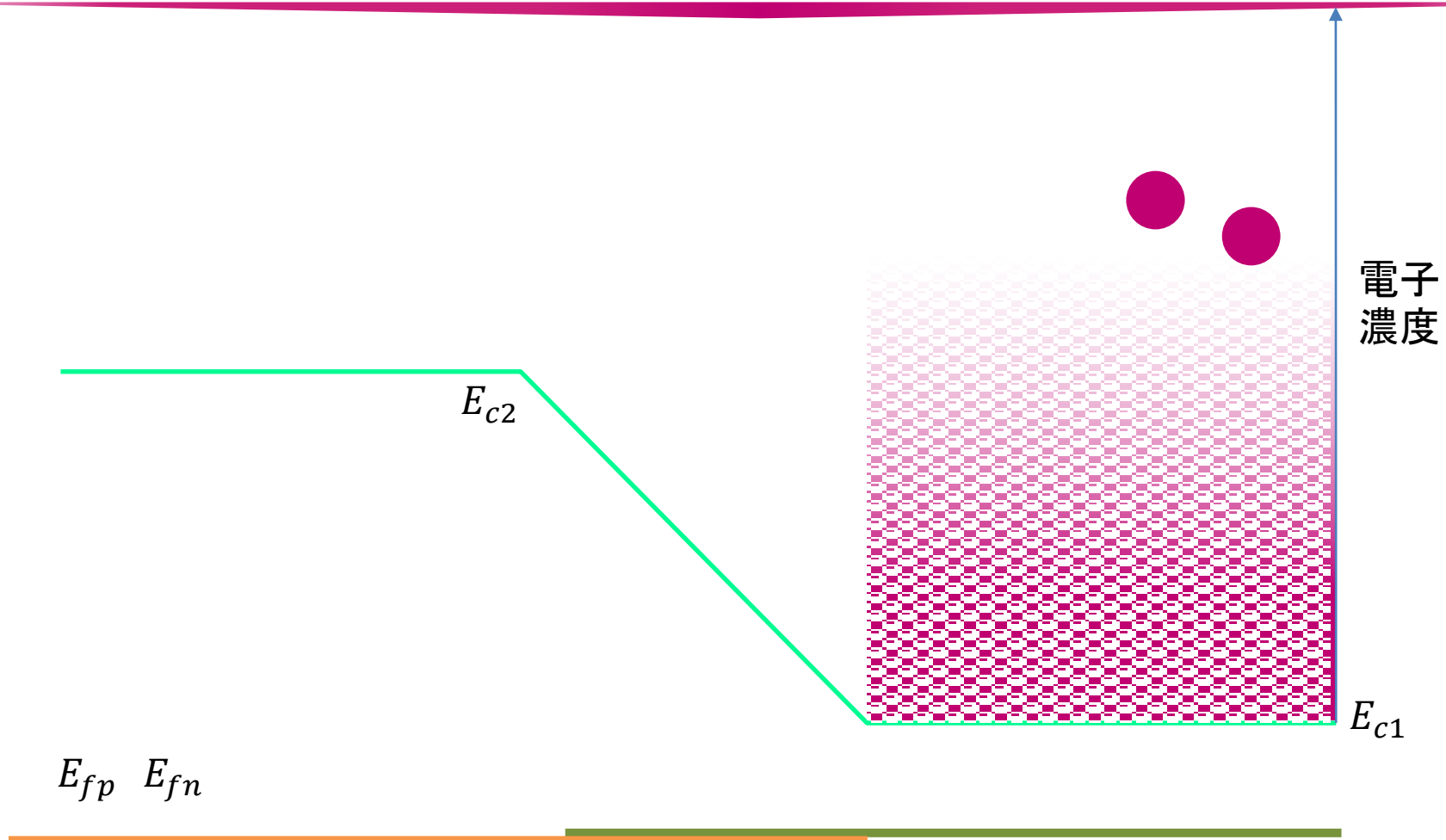
$$n_p = N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right)$$

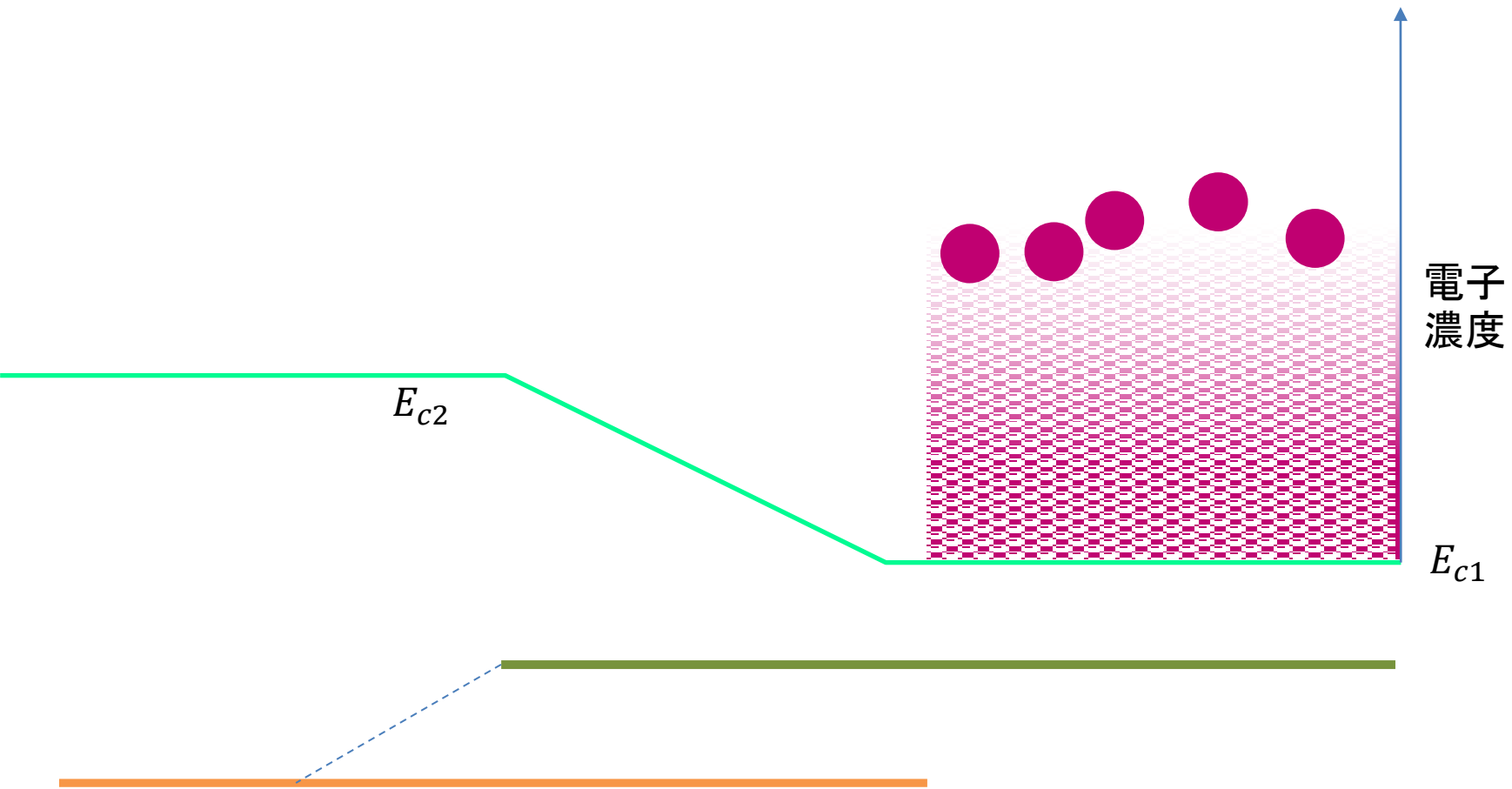
キャリア存在確率のボルツマン分布と一致する:



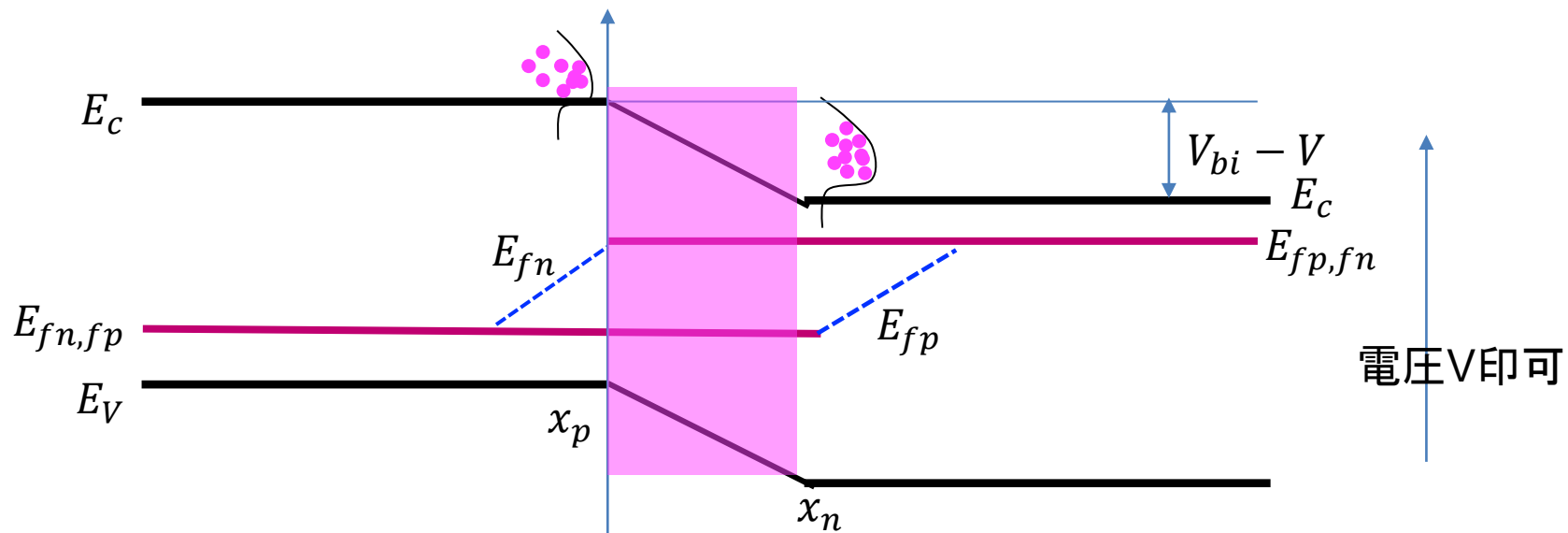
均一分布→拡散電流はない

PN接合





不均一過剰少数キャリアの生成: 順方向電圧V印可



熱平衡

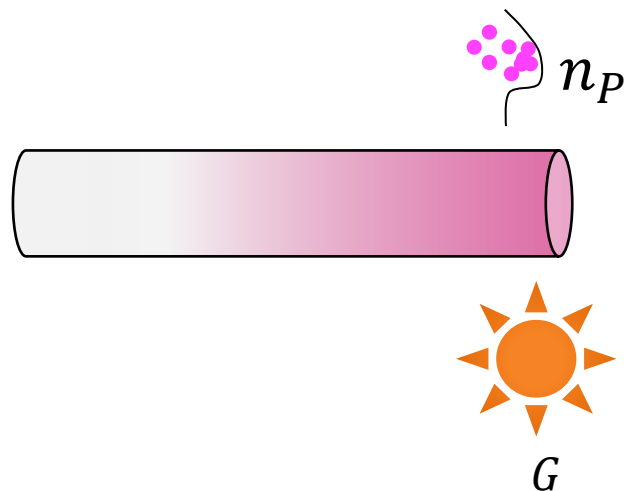
$$n_p(x = x_N) = N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right)$$

順方向電圧V印可:

$$n_p(x = x_N) = N_d \exp\left(\frac{-V_{bi} + V}{kT}\right)$$

少数キャリア→
電子濃度が増加

不均一過剰少数キャリアの生成：順方向電圧V印可

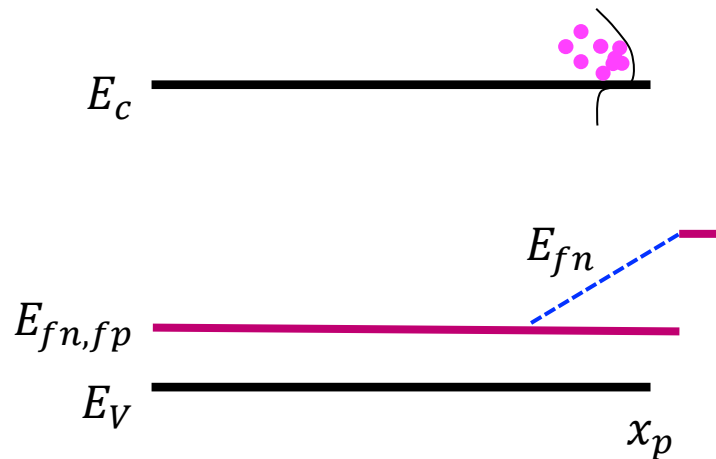


$$n_p = N_d \exp\left(\frac{V - V_{bi}}{kT}\right)$$

拡散電流式：

$$J_{n_diff} = -qD_n[n(x=0) - n_0] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x}{l_n}\right)$$

不均一過剰少数キャリアの生成：順方向電圧V印可



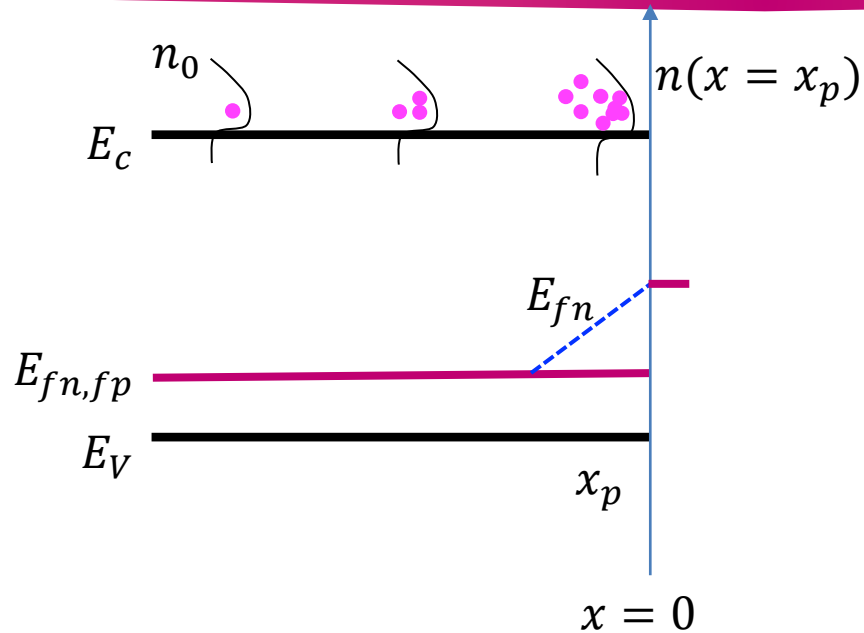
$$n_p(x = x_p) = N_d \exp\left(\frac{V - V_{bi}}{kT}\right)$$



拡散電流式

$$J_{n_diff} = -qD_n[n(x=0) - n_0] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x}{l_n}\right)$$

不均一過剰少数キャリアによる電流計算



拡散電流式：

$$J_{n_diff} = -qD_n [n(x=0) - n_0] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x}{l_n}\right)$$

Step1 : 座標を統一する

$$J_{n_diff} = -qD_n [n(x = x_p) - n_0] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x - x_p}{l_n}\right)$$

過剰少数キャリアの電流

Step2 : 初期値を決める

$$J_{n_diff} = -qD_n[n(x = x_p) - n_0] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x - x_p}{l_n}\right)$$

$$\textcircled{\circ} \quad n(x = x_p) = N_d \exp\left(\frac{V - V_{bi}}{kT}\right)$$

$$\textcircled{\circ} \quad n_0 = N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right)$$

熱平衡時の少数キャリア濃度 $n_p = n_0$

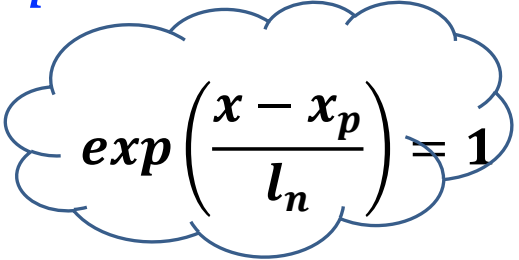
過剰少数キャリアの電流

Step3 : 代入

$$J_{n_diff} = qD_n \left[N_d \exp\left(\frac{V - V_{bi}}{kT}\right) - N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right) \right] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x - x_p}{l_n}\right)$$

$$J_{n_diff} = qD_n N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right] \frac{1}{l_n} \exp\left(\frac{x - x_p}{l_n}\right)$$

Step4: 過剰少数キャリアの電流 @ $x = x_p$



$$\exp\left(\frac{x - x_p}{l_n}\right) = 1$$

$$J_{n_diff} = q \frac{D_n}{l_n} N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

過剰少数キャリアの電流

Step5: V_{bi} を代入する

$$\exp\left(\frac{V_{bi}}{kT}\right) = \frac{N_d N_a}{n_i^2}$$

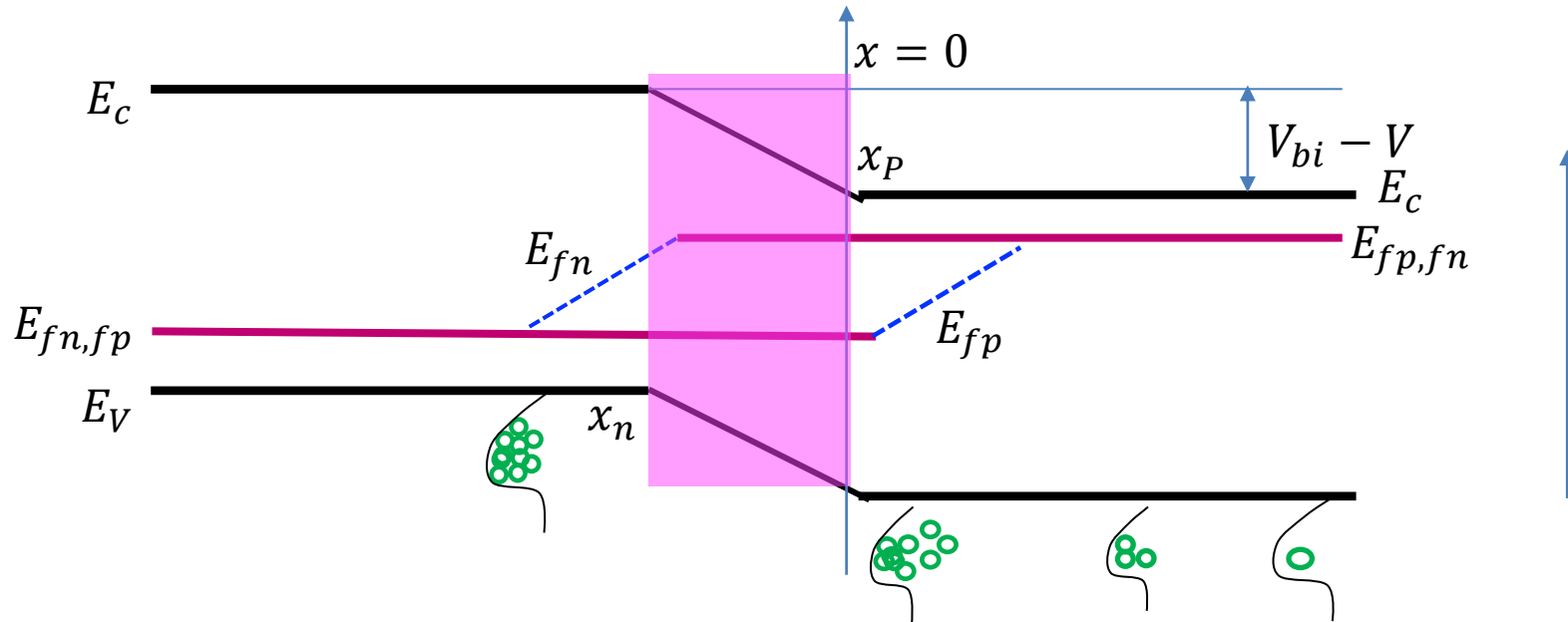
$$\exp\left(-\frac{V_{bi}}{kT}\right) = \frac{n_i^2}{N_d N_a}$$

$$\begin{aligned} J_{n_diff} \\ &= q \frac{D_n}{l_n} N_d \exp\left(\frac{-V_{bi}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right] \end{aligned}$$

$$J_{n_diff} = q n_i^2 \frac{D_n}{N_a l_n} \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

過剰少数キャリアの電流

Step5: J_{p_diff} を計算する



$$J_{p_diff} = qn_i^2 \frac{D_p}{N_d l_p} \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$

Step6: J_{p_diff} と J_{n_diff} の総和

$$J = qn_i^2 \left(\frac{D_n}{N_a l_n} + \frac{D_p}{N_d l_p} \right) \left[\exp \left(\frac{V}{kT} \right) - 1 \right]$$

Step7:飽和電流 J_s を導入する

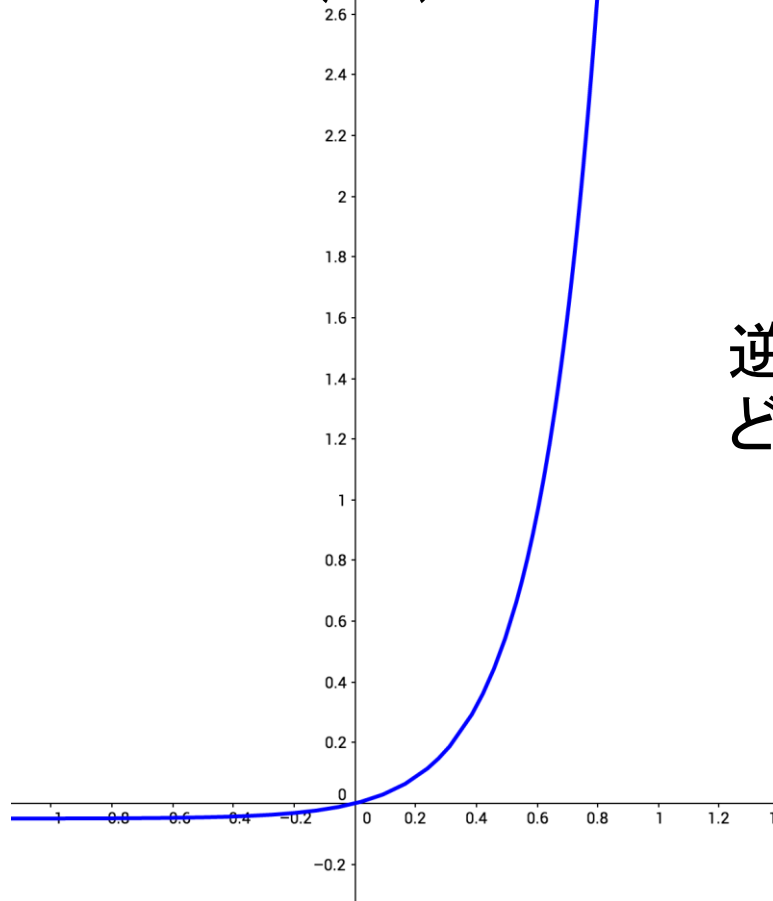
飽和電流を導入する:

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

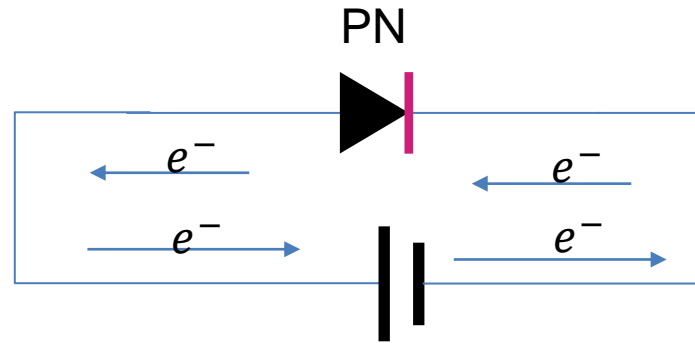
$$J = J_s \left[\exp \left(\frac{V}{kT} \right) - 1 \right]$$

整流特性：

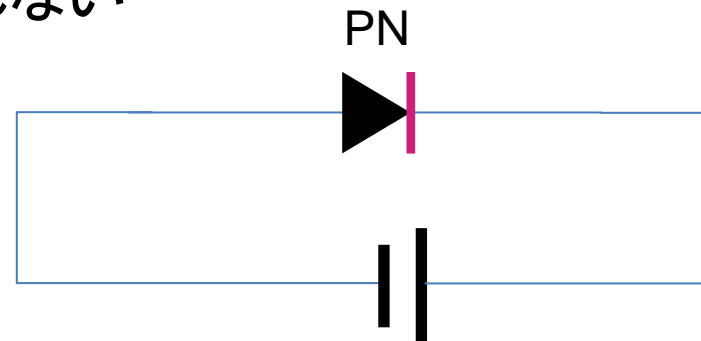
$$J = J_s \left[\exp\left(\frac{V}{kT}\right) - 1 \right]$$



順方向電圧を与えると、電流が流れる

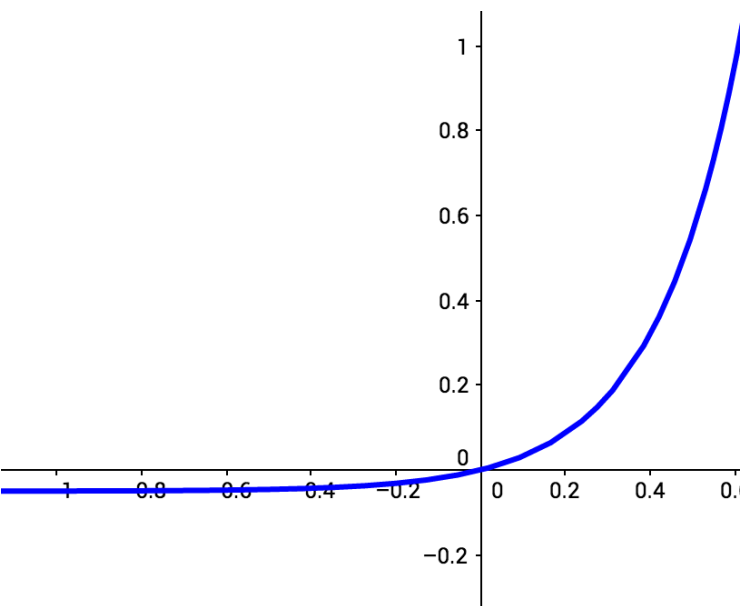
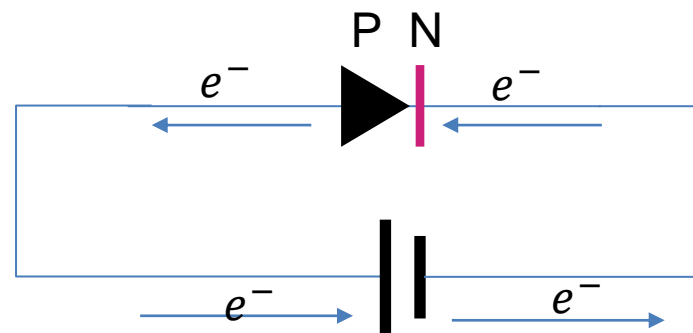


逆方向電圧を与えると、電流が殆ど流れない

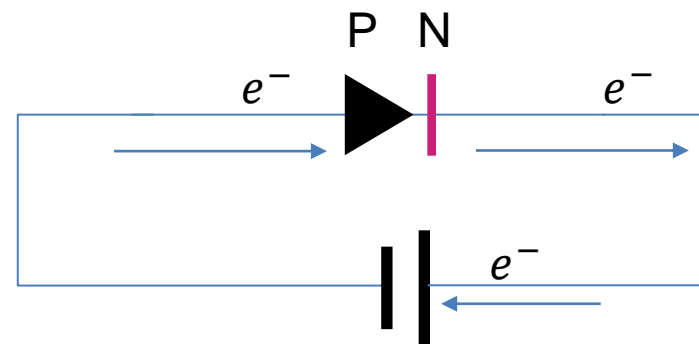


ダイオード、トランジスタ等の半導体デバイスに広く応用されている。

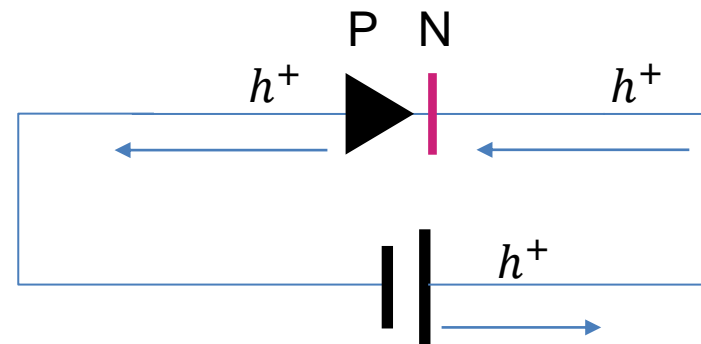
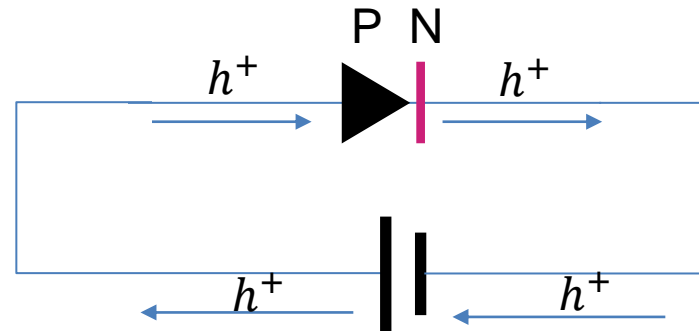
順方向電圧を与えると、電流が流れる



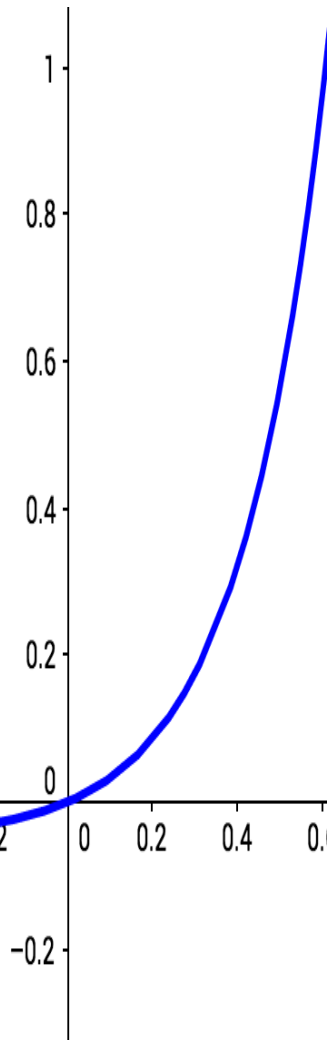
逆方向電圧を与えると、
電流が殆ど流れない



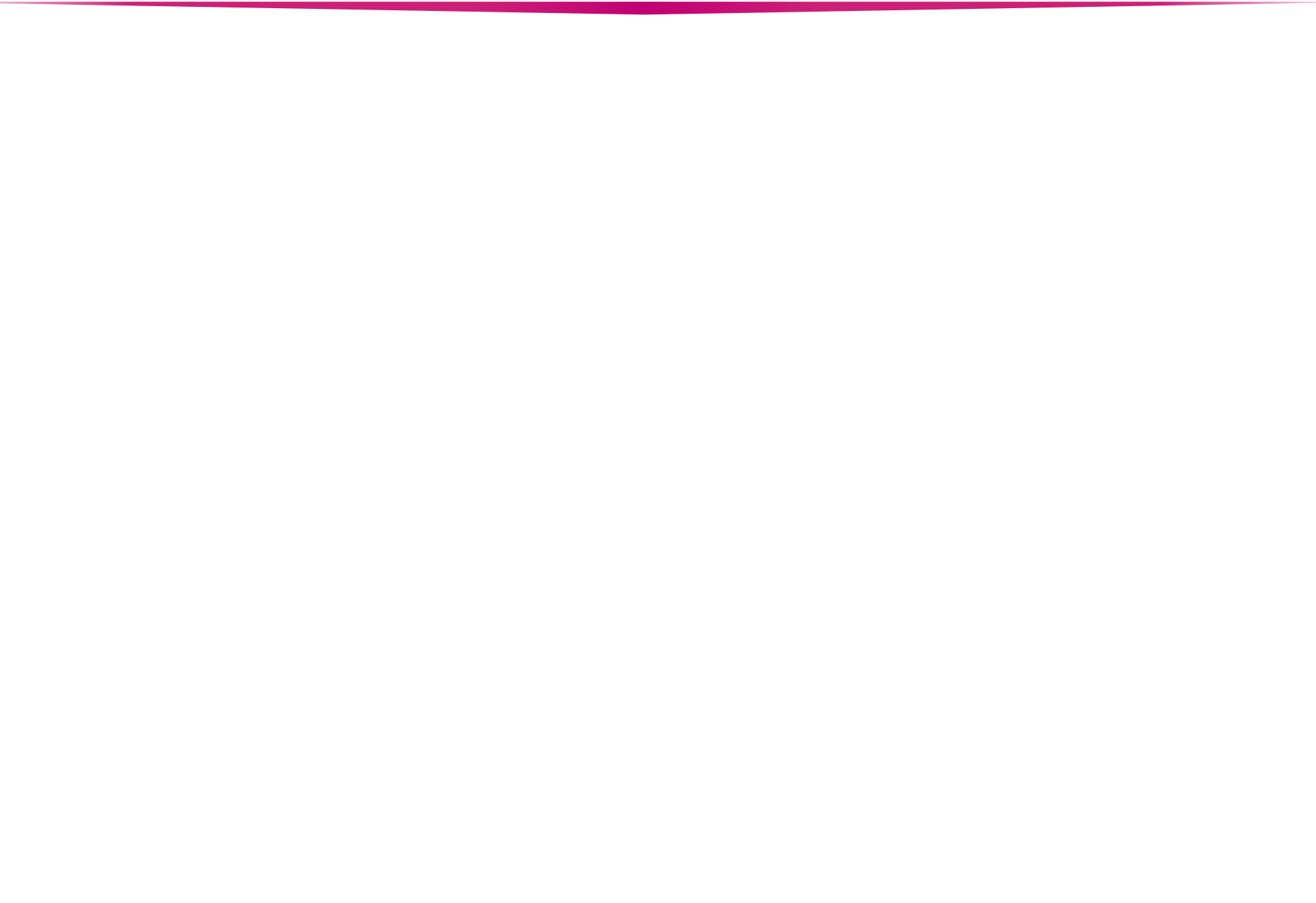
順方向電圧を与えると、電流が流れる



ダイオード、トランジスタ、太陽電池等の
半導体デバイスに広く応用されている。



逆方向電圧を与えると、
電流が殆ど流れない



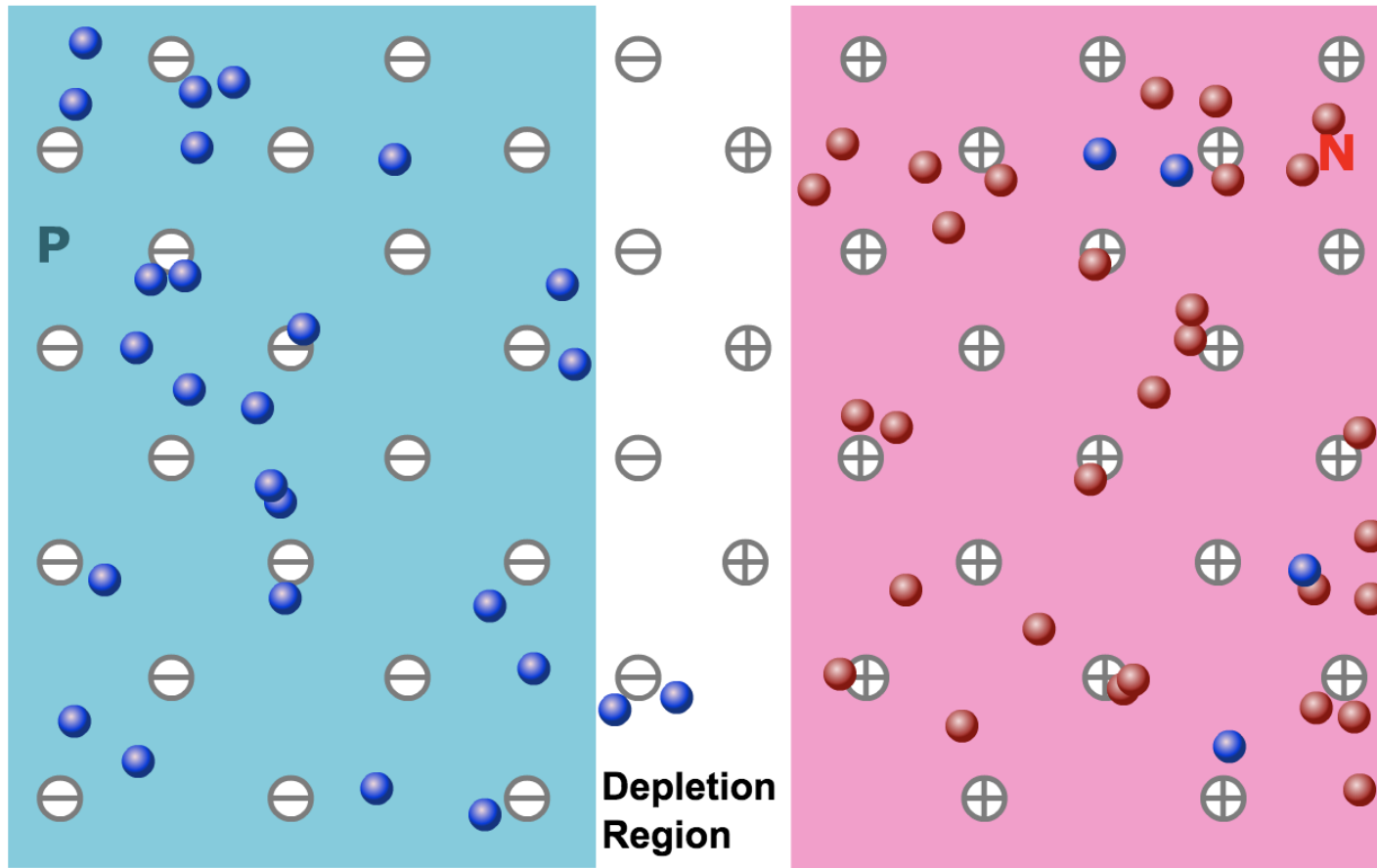
中学校レベルの知識で理解できる



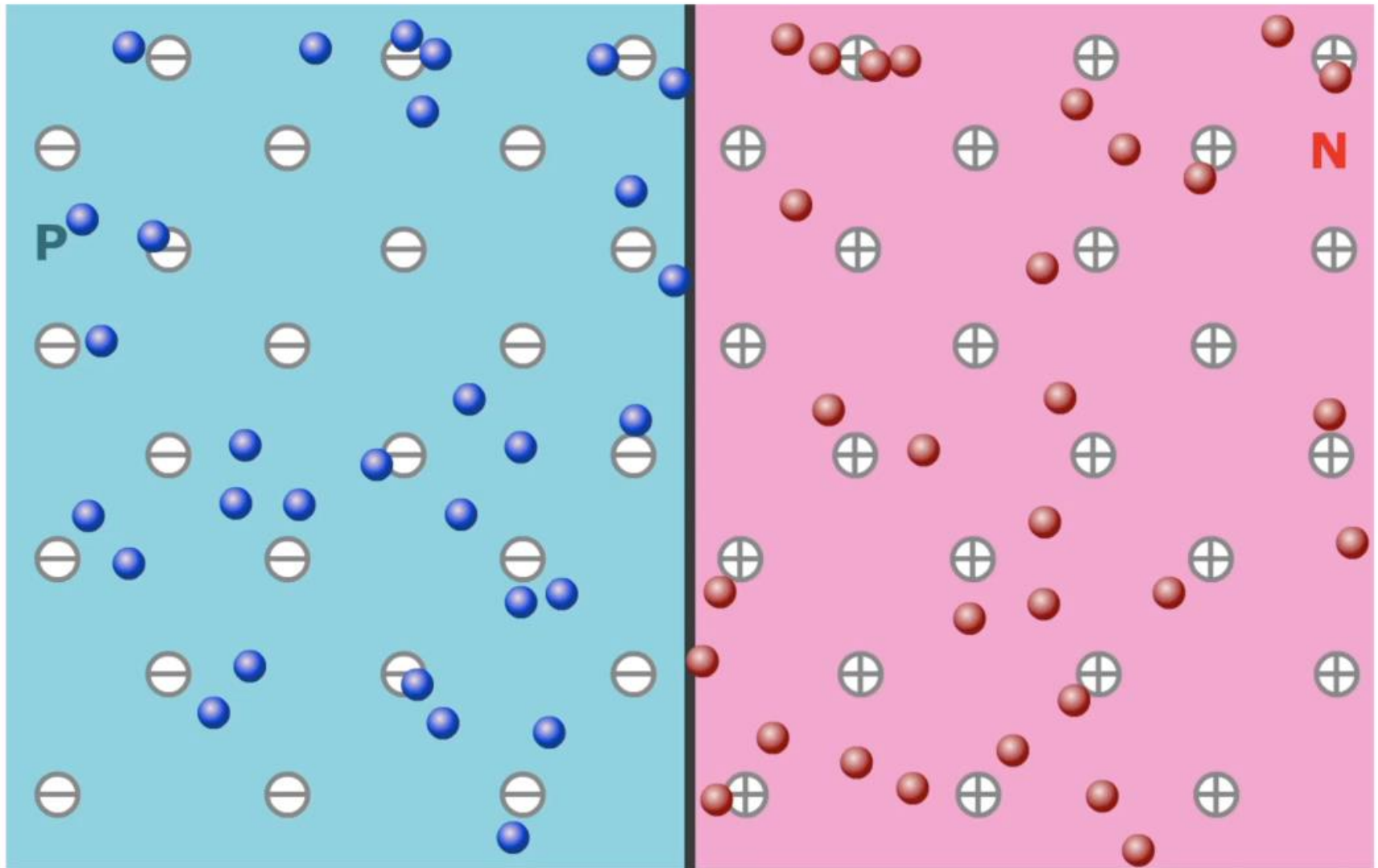
□ PN接合とコンデンサの関係

x_p と x_n の正体



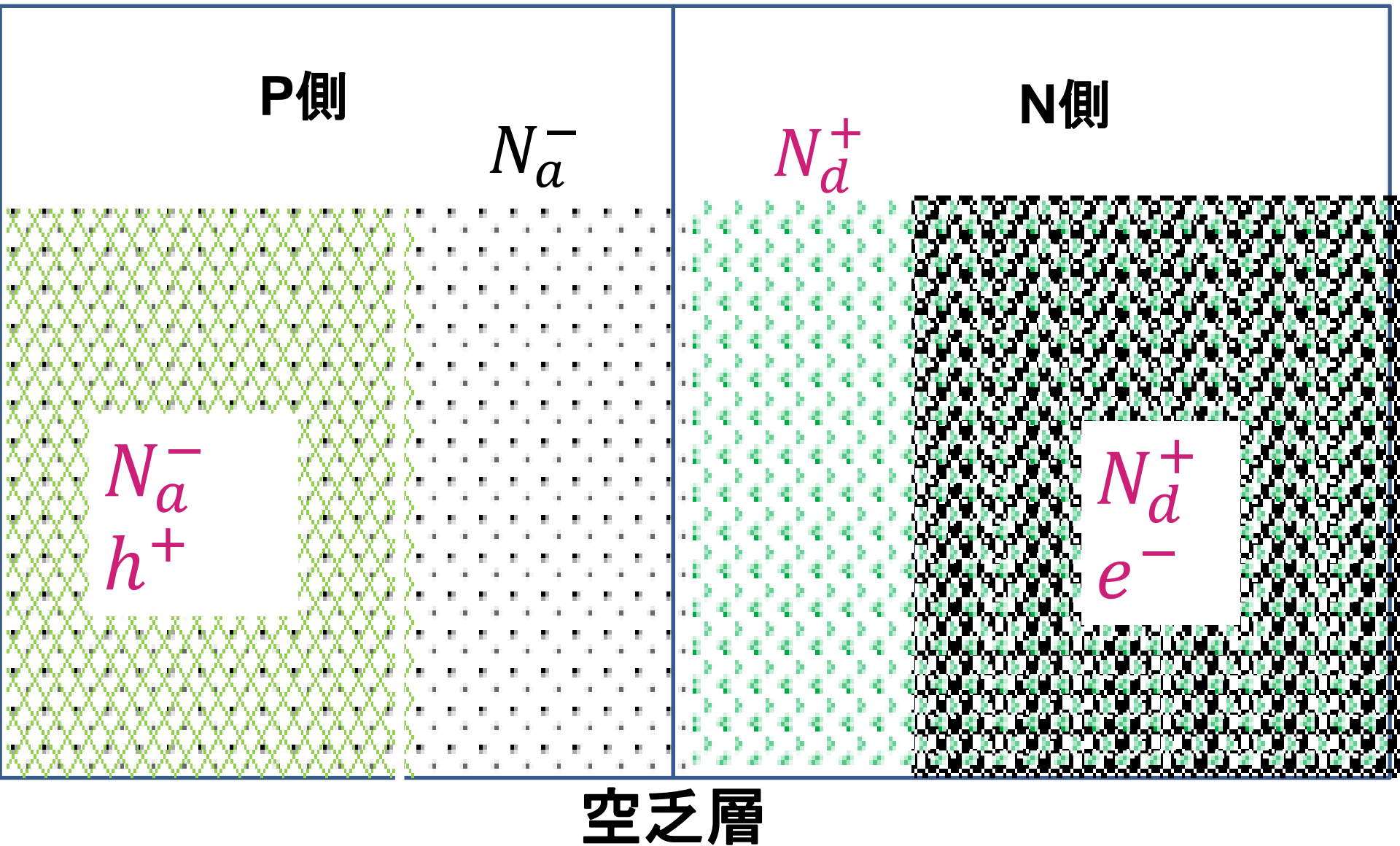


空乏層

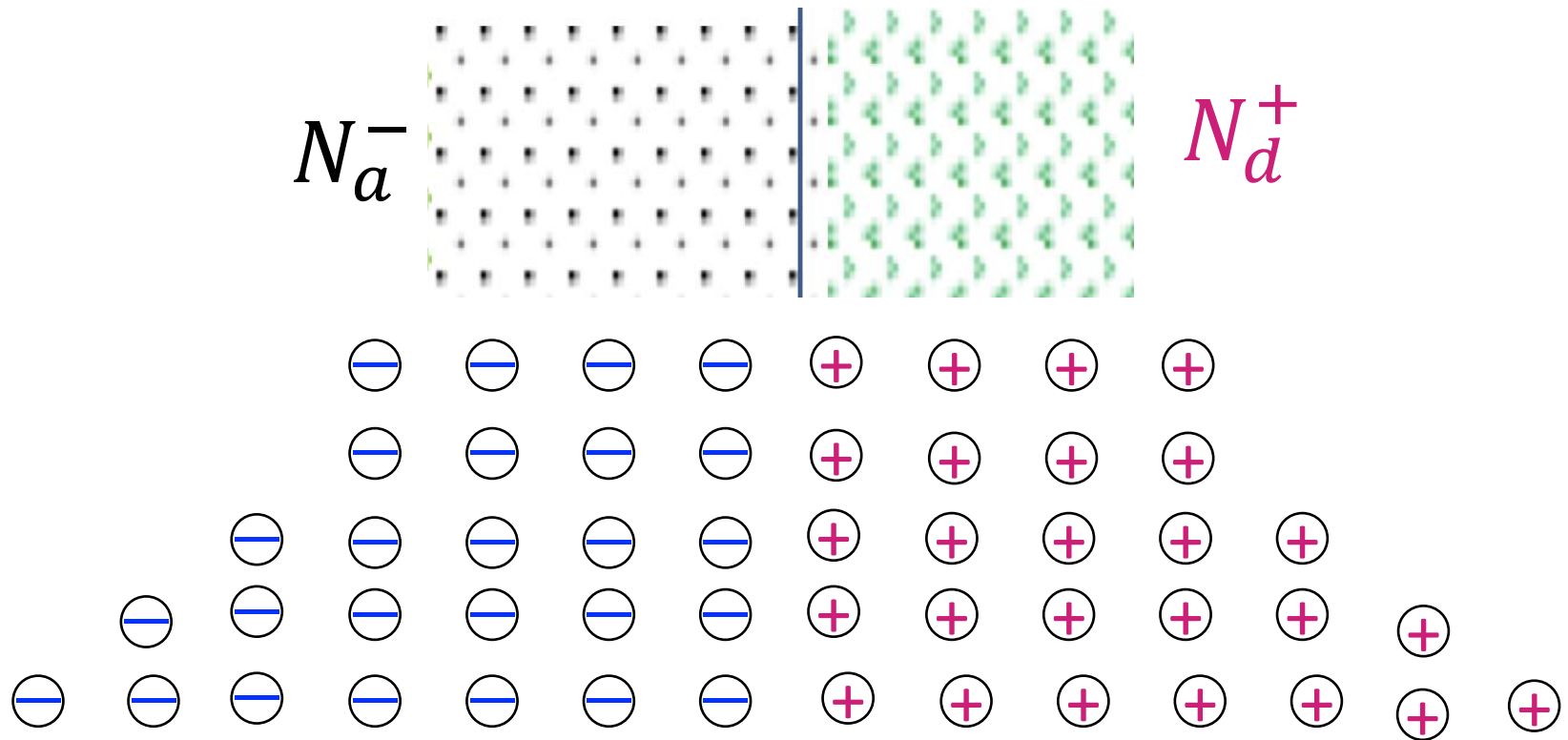


Imaginary Boundary

PN接合

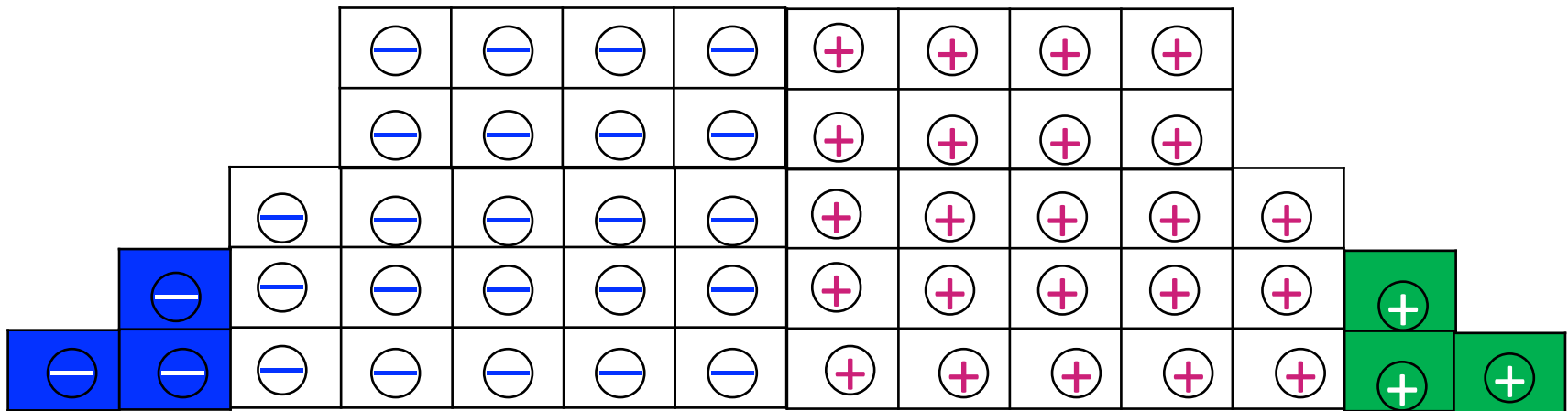


PN接合の空乏層:拡散のプロファイル



拡散のプロファイルは通常不均一である

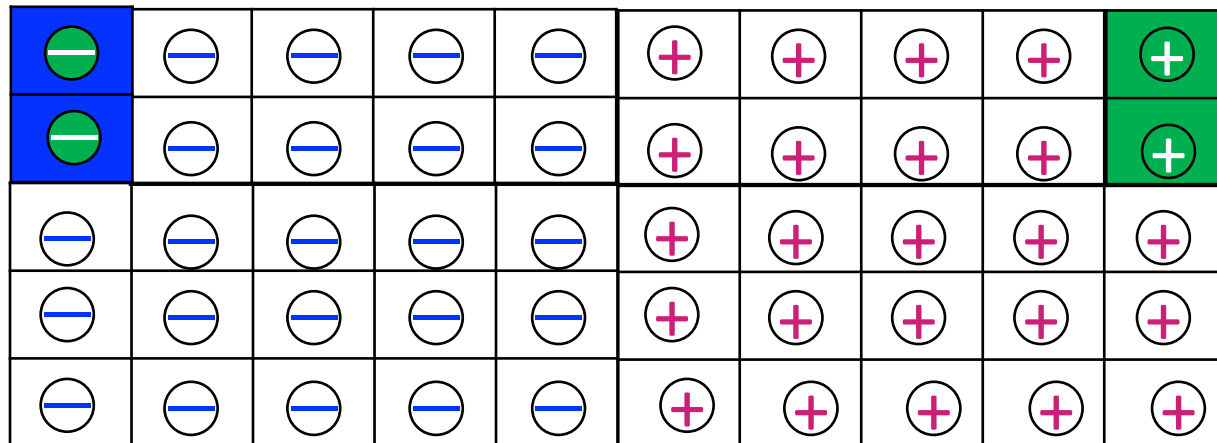
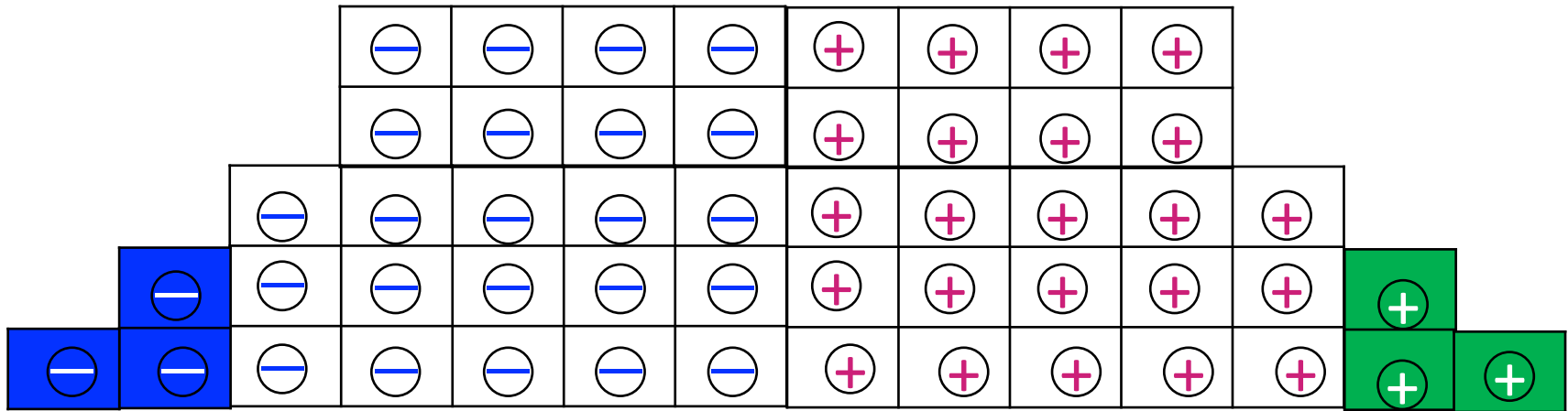
PN接合の空乏層:拡散のプロファイルの均一近似



拡散のプロファイルは通常不均一である

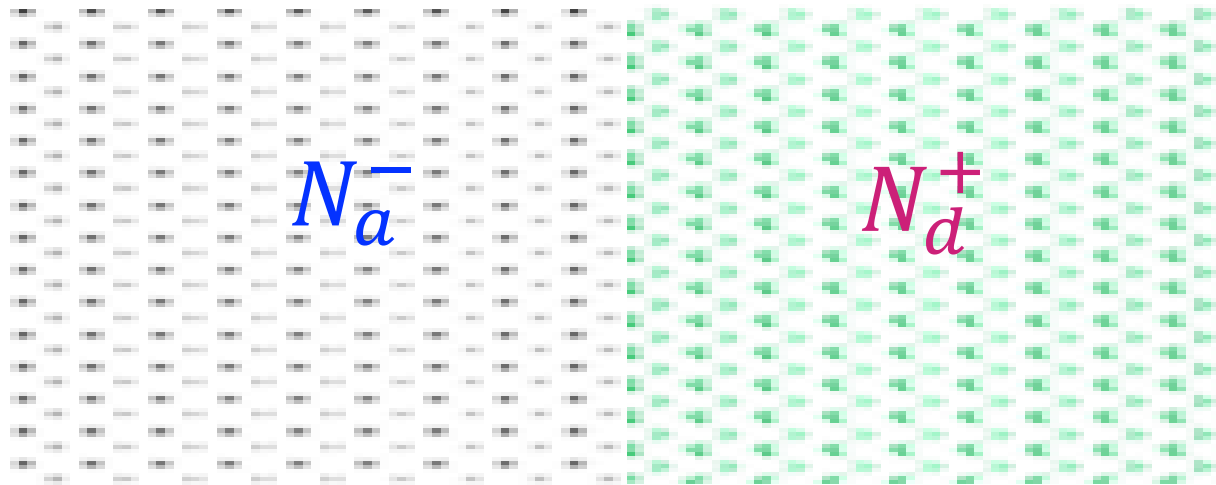
均一近似

PN接合の空乏層:拡散のプロファイルの均一近似



均一近似

PN接合の空乏層:コンデンサとの類似性

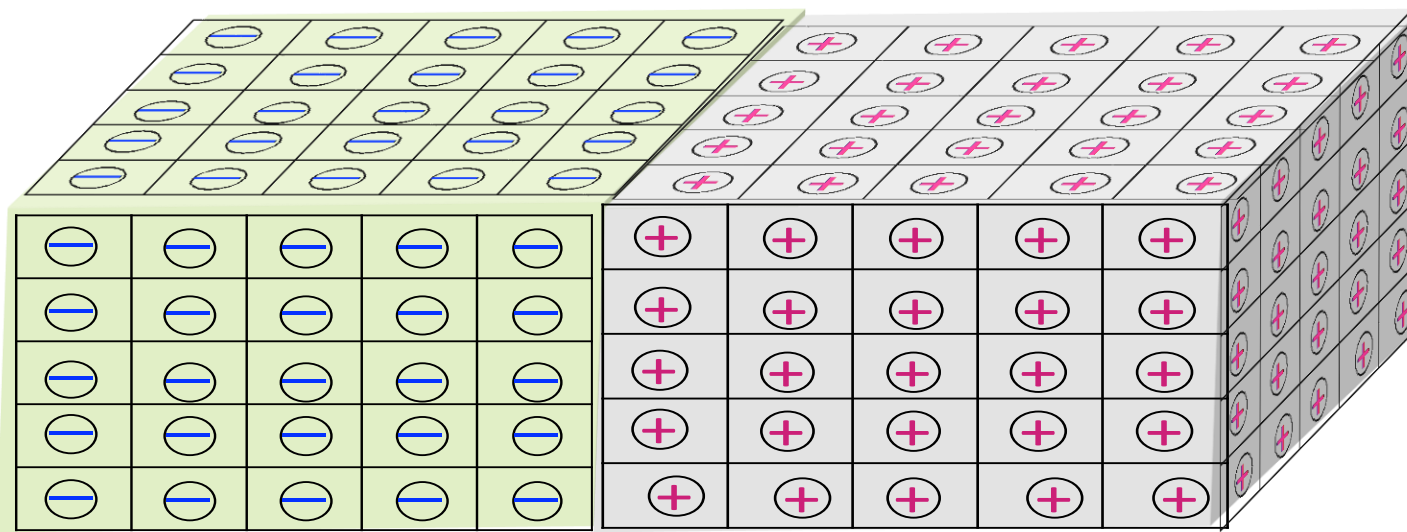


⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕
⊖	⊖	⊖	⊖	⊖	⊕	⊕	⊕	⊕	⊕

PN接合の空乏層:

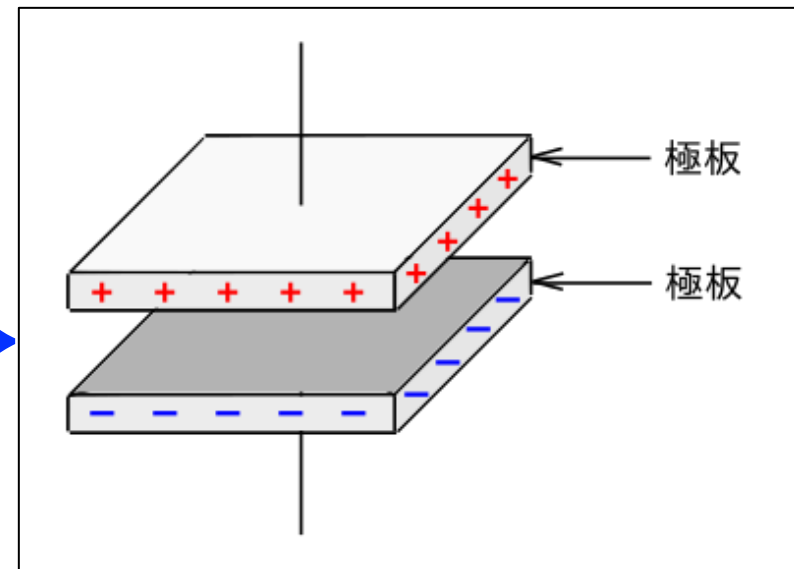
P側

N側

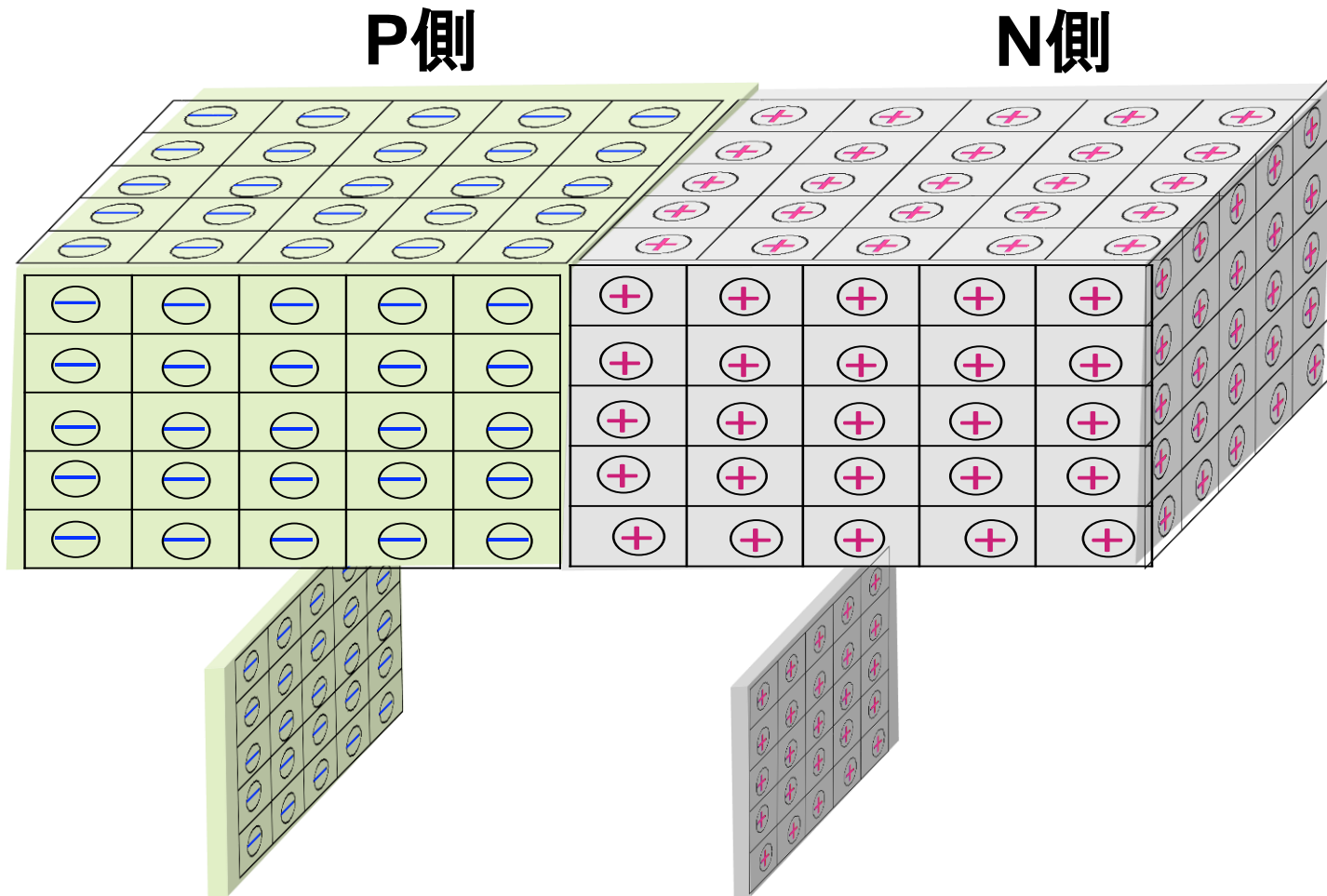


通常のコンデンサではない

通常のコンデンサ →



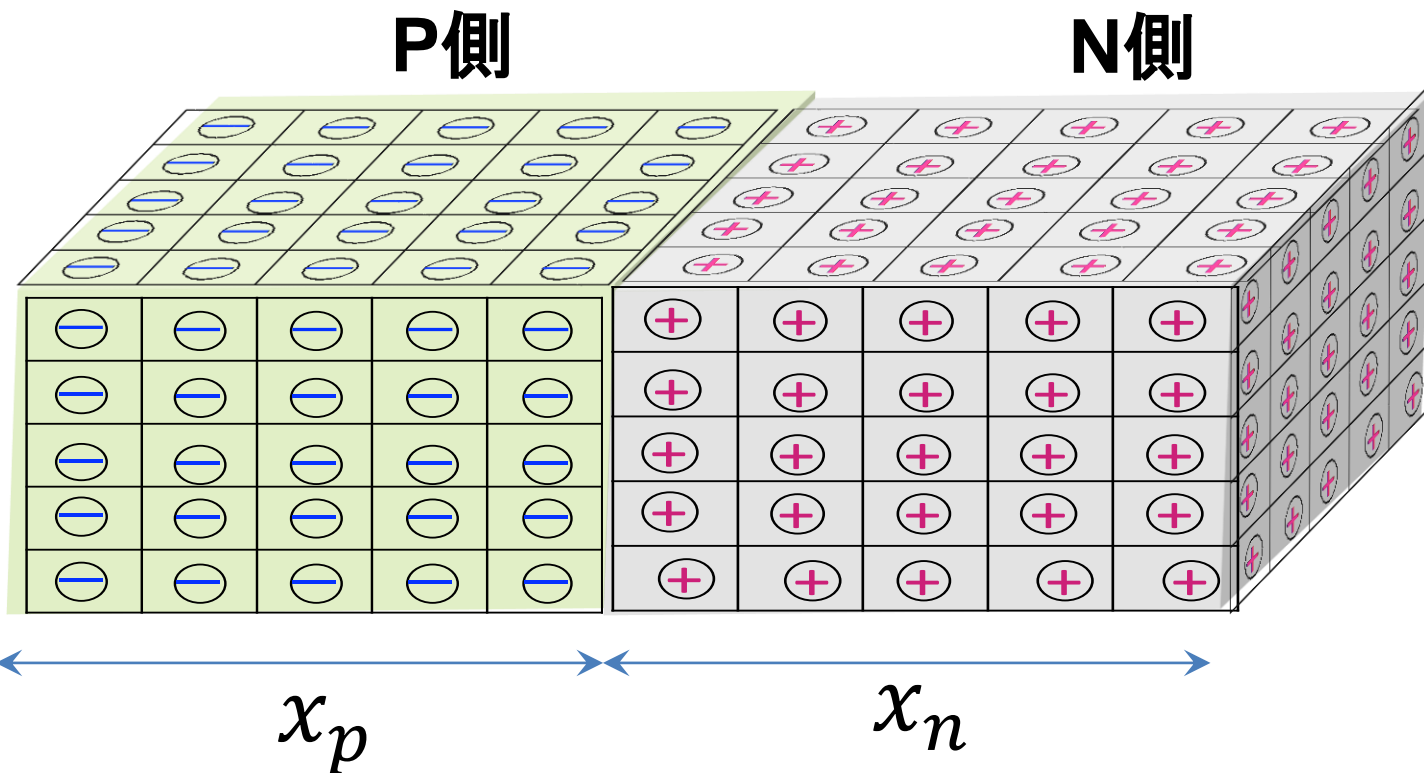
PN接合の空乏層を通常のコンデンサに変換する



P側の全ての電荷を
この板に集約する。

N側の全ての電荷を
この板に集約する。

PN接合を通常のコンデンサに変換する



N_a^- の単位: $/cm^3$)

P側の総電荷数

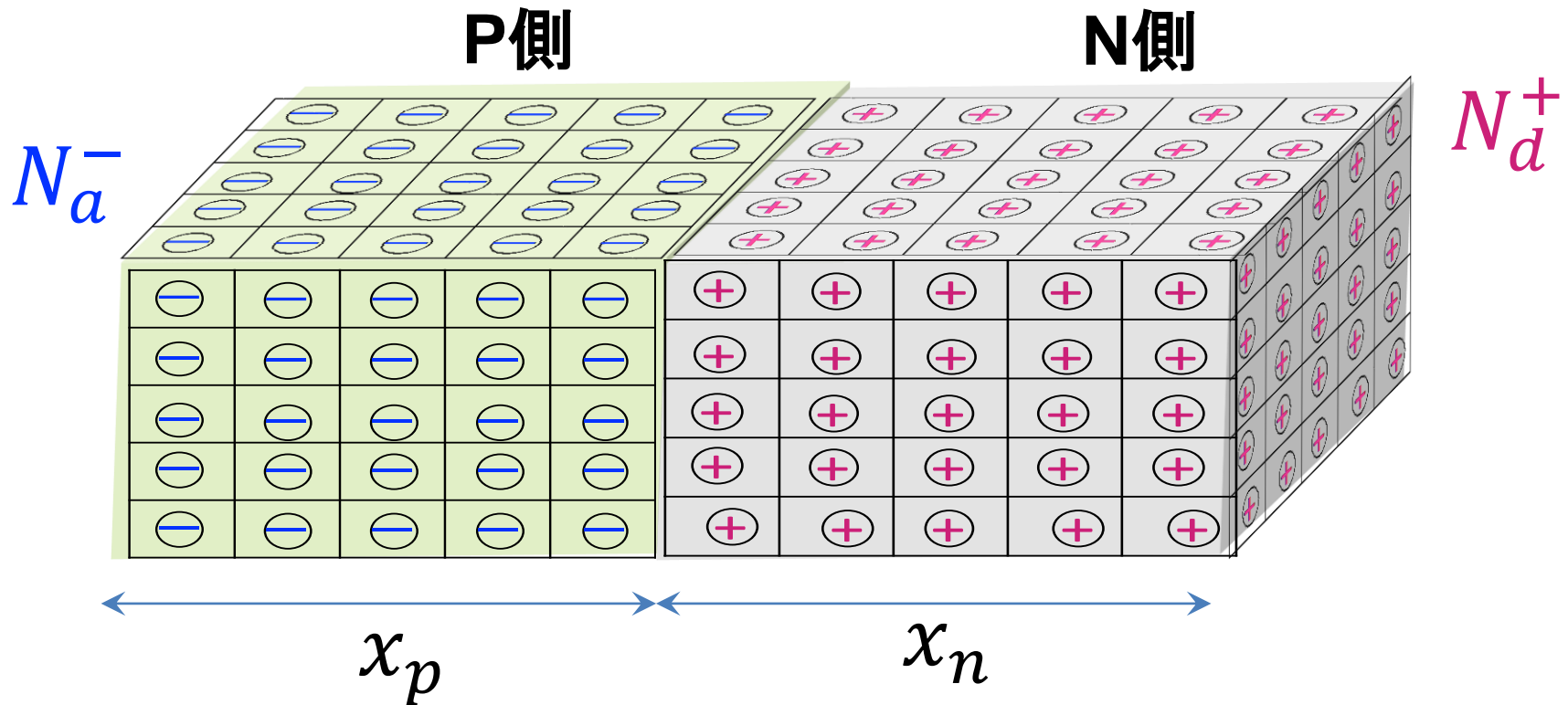
$$Q_p = N_a^- * x_p * A * e$$

N_d^+ の単位: $/cm^3$)

N側の総電荷数

$$Q_n = N_d^+ * x_n * A * e$$

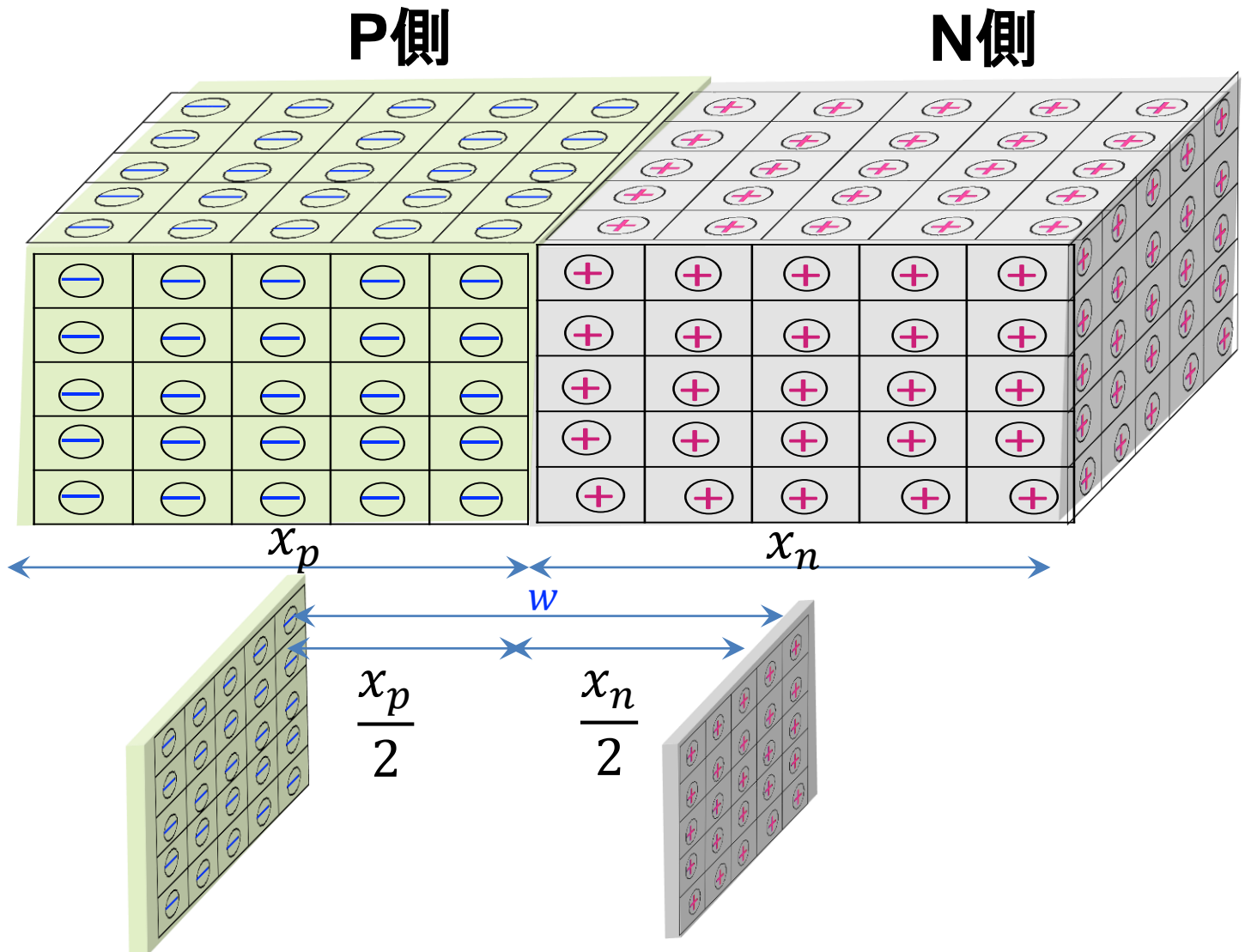
PN接合の空乏層が電気中性を保つために



$$N_a^- * x_p * A * e = N_d^+ * x_n * A * e$$

$$N_a^- * x_p = N_d^+ * x_n$$

PN接合PN接合の空乏層を通常のコンデンサに変換する



$$Q_p = N_a^- * x_p * A * e$$

$$Q_n = N_d^- * x_n * A * e$$

PN接合空乏層を解析する目標:

P側の空乏層幅: x_p

N側の空乏層幅: x_n

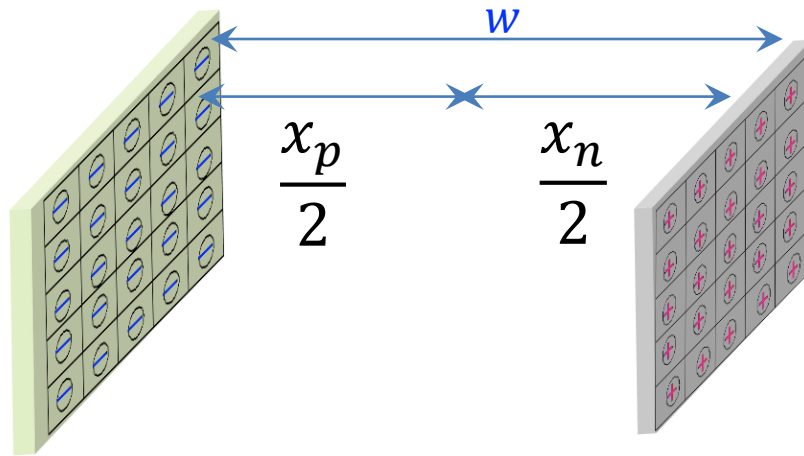
空乏層全幅: $w = x_p + x_n$

空乏層内の電圧依存性: $V(x)$

PN接合の空乏層を通常のコンデンサに変換する

中学校

$$C = \epsilon \frac{A}{d}$$

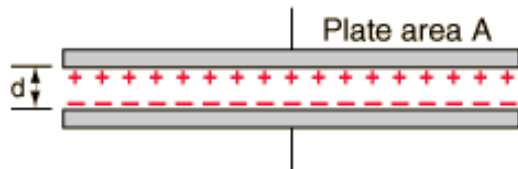


$$C = \epsilon \frac{A}{w}$$

$$Q_p = N_a^- * x_p * A * e$$

$$Q_n = N_d^+ * x_n * A * e$$

$$Q_n = Q_p$$



$$C = \epsilon \frac{A}{w} = \epsilon \frac{A}{\frac{x_n}{2}} + \epsilon \frac{A}{\frac{x_p}{2}} = \epsilon \frac{2A}{x_n} + \epsilon \frac{2A}{x_p}$$

P側とN側の静電容量を計算する

$$C = \varepsilon \frac{2A}{x_n} + \varepsilon \frac{2A}{x_p} = C_n + C_p$$



$$C_n = \frac{Q_n}{V_n} = \frac{N_d^+ * x_n * A * e}{V_n} = \varepsilon \frac{2A}{x_n}$$

$$C = \frac{Q}{V}$$

$$C_p = \frac{Q_p}{V_p} = \frac{N_a^- * x_p * A * e}{V_p} = \varepsilon \frac{2A}{x_p}$$

P側とN側の静電容量からコンデンサ電圧を計算する

$$\frac{N_a^- * x_p * A * e}{V_p} = \epsilon \frac{2A}{x_p}$$

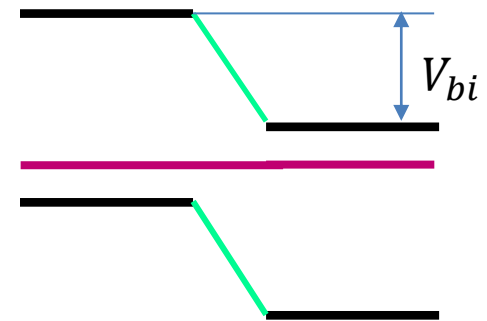
$$V_p = N_a^- * x_p * A * e * \frac{x_p}{\epsilon * 2A}$$

$$= \frac{N_a^- e}{2\epsilon} x_p^2$$

$$V_n = N_d^+ * x_n * A * e * \frac{x_n}{\epsilon * 2A}$$

$$= \frac{N_d^+ e}{2\epsilon} x_n^2$$

中学校レベルの知識で
計算できる



$$V_p + V_n = V_{bi}$$

P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する

$$N_a^- * x_p = N_d^+ * x_n \iff N_a * x_p = N_d * x_n$$

$$V_n = \frac{N_d^+ e}{2\varepsilon} x_n^2 = \frac{N_d e}{2\varepsilon} x_n^2 \iff V_p = \frac{N_a^- e}{2\varepsilon} x_p^2 = \frac{N_a e}{2\varepsilon} x_p^2$$

$$V_p + V_n = V_{bi} \iff V_{bi} = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_d e}{2\varepsilon} x_n^2 + \frac{N_a e}{2\varepsilon} x_p^2 = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \\ N_a * x_p = N_d * x_n \end{array} \right.$$



P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する



$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N_d e}{2\varepsilon} x_n^2 + \frac{N_a e}{2\varepsilon} x_p^2 = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right) \\ N_a * x_p = N_d * x_n \end{array} \right.$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a} x_n \quad x_p^2 = \frac{N_d^2}{N_a^2} x_n^2$$

$$\frac{N_d e}{2\varepsilon} x_n^2 + \frac{N_a e}{2\varepsilon} * \frac{N_d^2}{N_a^2} x_n^2 = kT \ln\left(\frac{N_d N_a}{n_i^2}\right)$$

P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する



$$\frac{N_d e}{2\epsilon} x_n^2 + \frac{N_a e}{2\epsilon} * \frac{N_d^2}{N_a^2} x_n^2 = V_{bi}$$

$$\frac{N_d e}{2\epsilon} x_n^2 + \frac{e}{2\epsilon} * \frac{N_d^2}{N_a} x_n^2 = V_{bi}$$

$$\left(N_d + \frac{N_d^2}{N_a}\right) \frac{e}{2\epsilon} x_n^2 = V_{bi}$$

$$x_n = \sqrt{\frac{2\epsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}}$$

P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する



$$x_p = \frac{N_d}{N_a} x_n$$

$$x_p = \frac{N_d}{N_a} \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{1}{(N_a + N_d)} \cdot \frac{N_d}{N_a}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}$$

P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する



$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}} \quad x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}$$

$$W = x_p + x_n$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{1}{(N_a + N_d)}} \left\{ \sqrt{\frac{N_a}{N_d}} + \sqrt{\frac{N_d}{N_a}} \right\}$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{1}{(N_a + N_d)} \left\{ \frac{N_d + N_a}{\sqrt{N_d N_a}} \right\}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a}}$$

P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する



$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a}}$$

P側とN側の電圧から空乏層の幅を計算する

$$x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_a}{N_d(N_a + N_d)}}$$

$$x_p = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{N_d}{N_a(N_a + N_d)}}$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_{bi}}{e} \cdot \left(\frac{1}{N_d} + \frac{1}{N_a} \right)}$$

PN接合の電圧一静電容量

$$C = \varepsilon \frac{A}{w}$$

単位面積仮定： $A = 1$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_s$$

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_s \frac{1}{w}$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_s V_{bi}}{e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a}}$$

$$w = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_s (V_{bi} - V)}{e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a}}$$

$$\frac{1}{w} = \sqrt{\frac{e}{2\varepsilon_0 \varepsilon_s (V_{bi} - V)} \cdot \frac{N_d N_a}{(N_a + N_d)}}$$



PN接合の電圧一静電容量

$$C = \epsilon_0 \epsilon_s \frac{1}{W}$$

$$C = \epsilon_0 \epsilon_s \sqrt{\frac{e}{2\epsilon_0 \epsilon_s (V_{bi} - V)} \cdot \frac{N_d N_a}{(N_a + N_d)}}$$

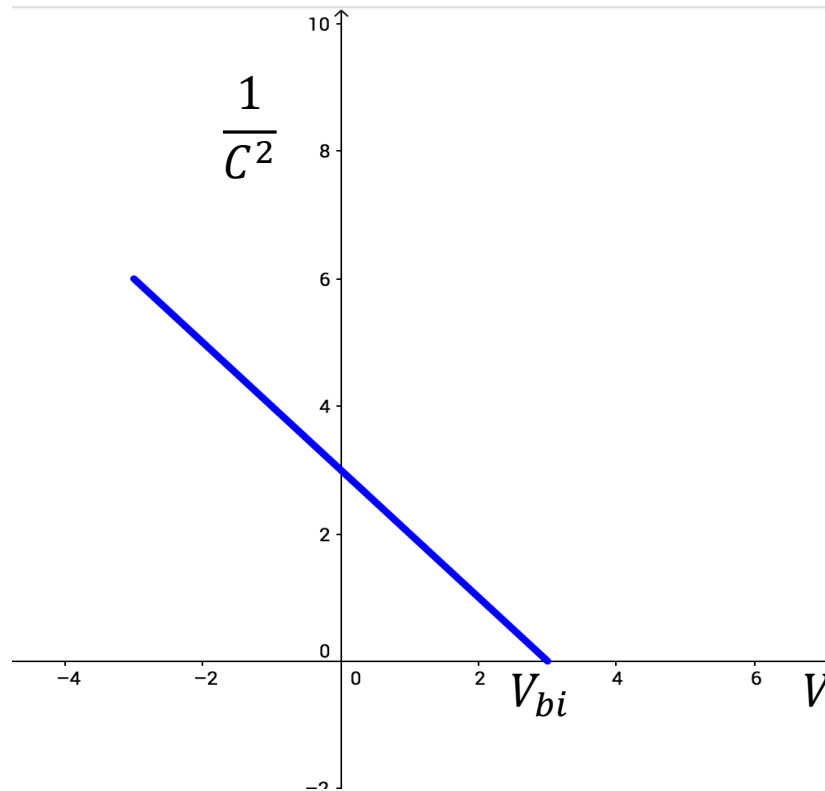
$$C = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_s e}{2} \cdot \frac{N_d N_a}{(N_a + N_d)} \cdot \frac{1}{\sqrt{(V_{bi} - V)}}$$

$$C^2 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s e}{2} \cdot \frac{N_d N_a}{(N_a + N_d)} \cdot \frac{1}{V_{bi} - V}$$

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a} \cdot (V_{bi} - V)$$

PN接合の電圧一静電容量

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s e} \cdot \frac{(N_a + N_d)}{N_d N_a} \cdot (V_{bi} - V)$$



PN接合の電圧一静電容量を測定することによって内蔵電位 V_{bi} を実験で求めることができる。

PN接合空乏層を解析する目標:

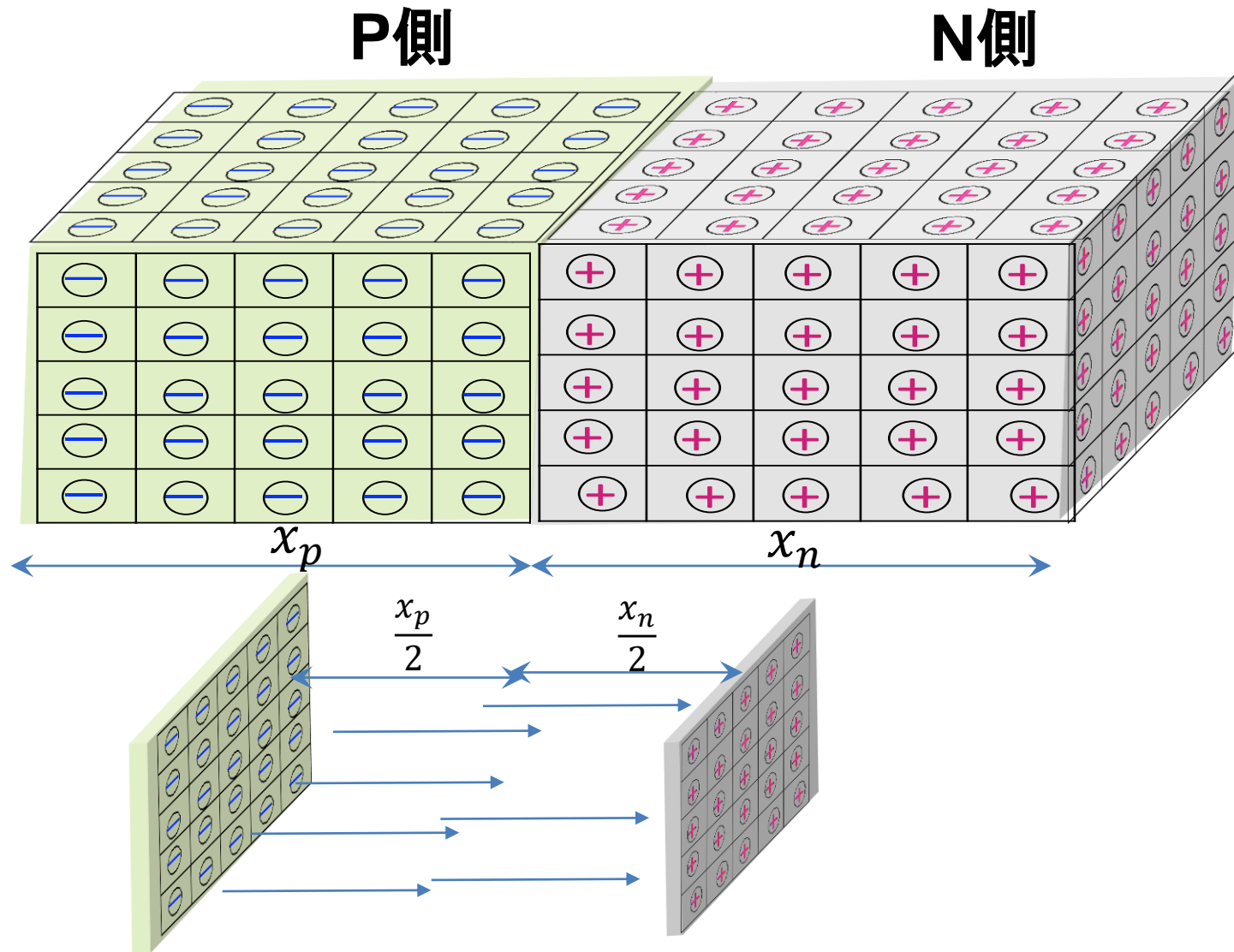
P側の空乏層幅: x_p

N側の空乏層幅: x_n

空乏層全幅: $w = x_p + x_n$

空乏層内の電圧依存性: $V(x)$

PN接合の空乏層：電圧の位置依存性

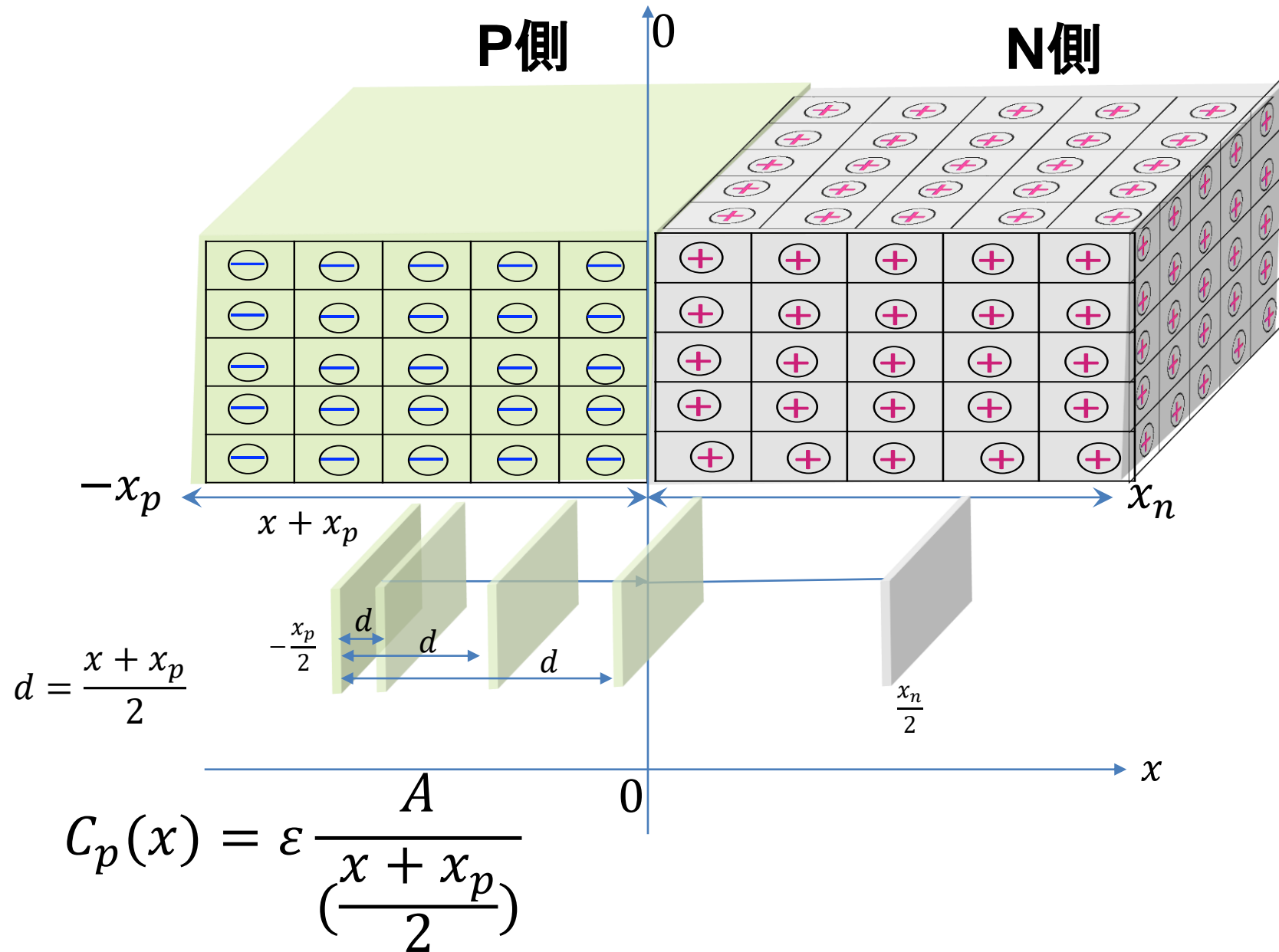


境界条件

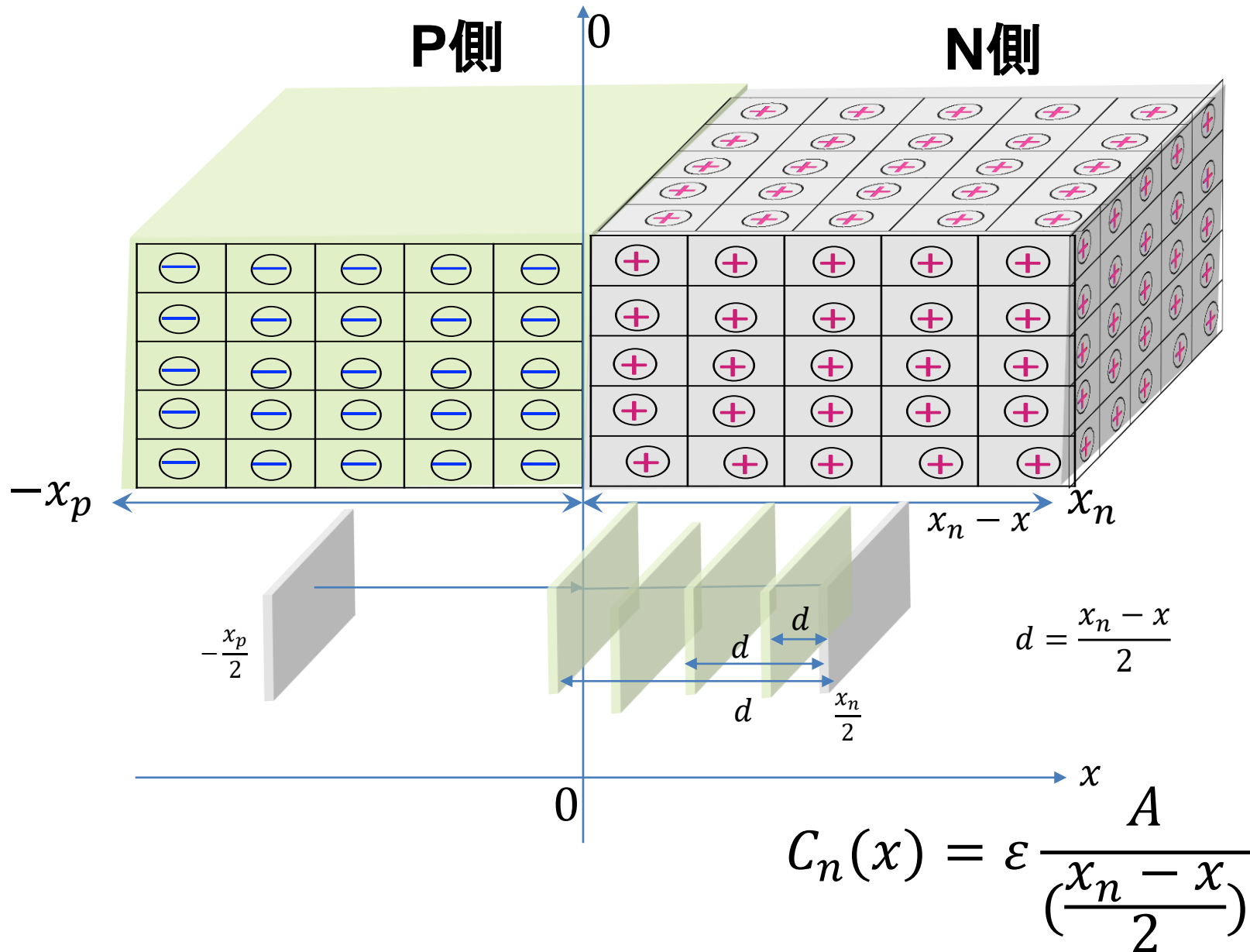
$$V_{x_p} = 0$$

$$V_{x_n} = V_{bi}$$

PN接合空乏層：座標を統一する



PN接合空乏層：座標を統一する



PN接合空乏層：電圧の位置依存性 $V_p(x)$

$$V_p = N_a^- * x_p * A * e * \frac{x_p}{\epsilon * 2A}$$

$$C_p = \epsilon \frac{2A}{x_p}$$

$$V_p = N_a^- * x_p * e * \frac{x_p}{2} \frac{1}{\epsilon}$$

$$C_p(x) = \epsilon \frac{A}{\left(\frac{x + x_p}{2}\right)}$$

$$V_p(x) = N_a^- * (x + x_p) * e * \left(\frac{x + x_p}{2}\right) \frac{1}{\epsilon} + C \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

$$V_p(x) = \frac{N_a^- e}{\epsilon} (x + x_p) * \left(\frac{x + x_p}{2}\right) + C \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

$$V_p(x) = \frac{N_a^- e}{2\epsilon} (x + x_p)^2 + C \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

PN接合空乏層：電圧の位置依存性 $V_p(x)$

境界条件 $x = -x_p$ の $V = 0$

$$V_p(x) = \frac{N_a^- e}{2\varepsilon} (x + x_p)^2 + C \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

$$V_p(x = -x_p) = \frac{N_a^- e}{2\varepsilon} (-x_p + x_p)^2 + C = 0$$

$$C = 0$$

$$V_p(x) = \frac{N_a^- e}{2\varepsilon} (x + x_p)^2$$

PN接合空乏層：電圧の位置依存性 $V_n(x)$

$$V_n(x) = -\frac{N_d^+ e}{2\epsilon} (x_n - x)^2 + C$$

境界条件 $x = x_n$ の $V = V_{bld-in}$

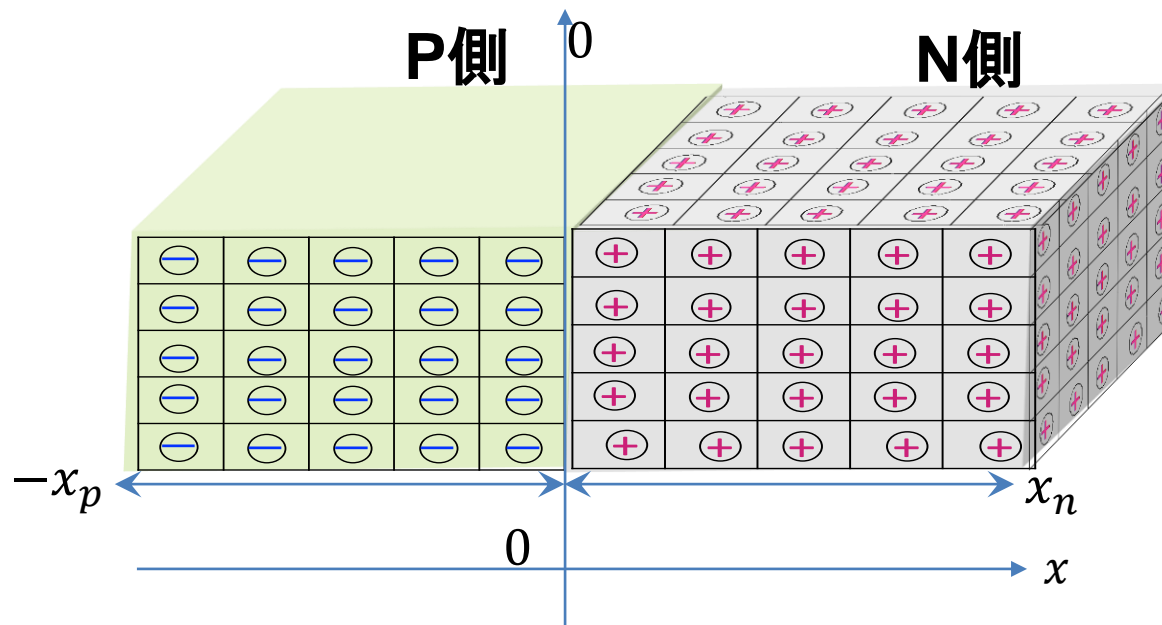
$$V_n(x = x_n) = V_{bld-in} - \frac{N_d e}{2\epsilon} (x_n - x_n)^2 + C = V_{bld-in}$$

$$C = V_{bld-in}$$

$$V_n(x) = V_{bld-in} - \frac{N_d e}{2\epsilon} (x_n - x)^2 \quad \left(0 \leq x \leq \frac{x_n}{2}\right)$$

$$V_p(0) = V_n(0)$$

境界条件

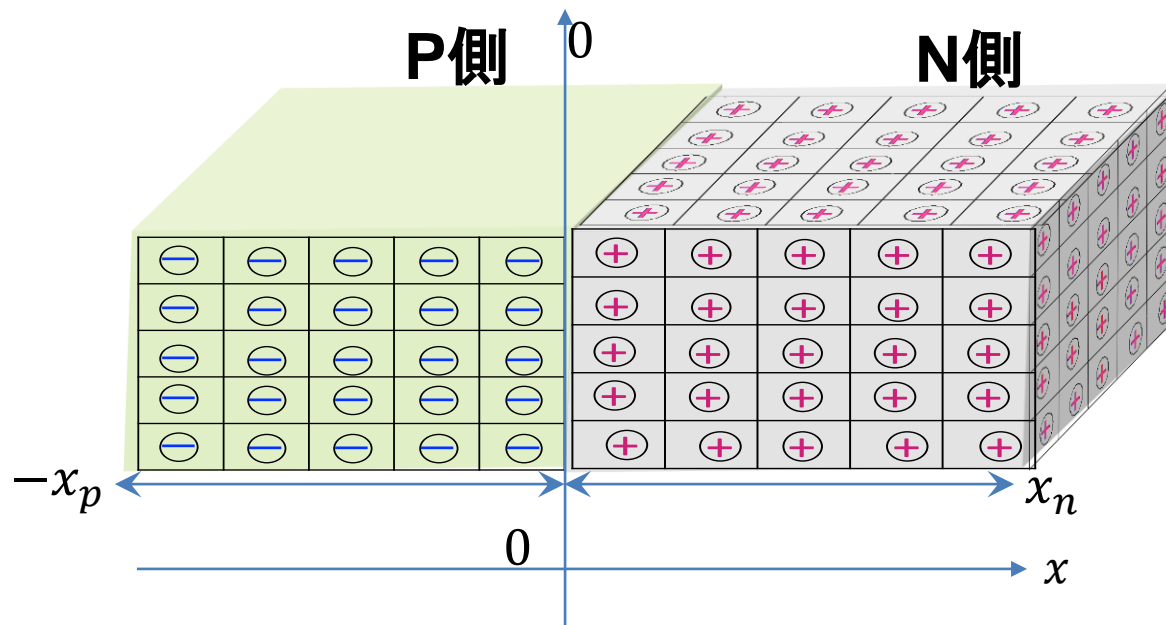


境界条件 $x = -x_p$ の $V = 0$

$$V_p(x) = \frac{N_a^- e}{2\epsilon} (x + x_p)^2 \quad (-x_p \leq x \leq 0)$$

$$V_p(x = -x_p) = \frac{N_a^- e}{2\epsilon} (-x_p + x_p)^2 = 0$$

境界条件



境界条件 $x = x_n$ の $V = V_{bld-in}$

$$\begin{aligned}
 V_n(x = x_n) &= V_{bld-in} - \frac{N_d e}{2\epsilon} (x_n - x_n)^2 \\
 &= V_{bld-in}
 \end{aligned}$$

連続条件 @ $x = 0$

$$V_p(x) = \frac{N_a^- e}{2\varepsilon} (x + x_p)^2$$

$$V_n(x) = V_{bld-in} - \frac{N_d e}{2\varepsilon} (x_n - x)^2$$

$$\frac{dV_p(x)}{dx} = \frac{N_a^- e}{\varepsilon} (x + x_p)$$

$$\frac{dV_n(x)}{dx} = \frac{N_d e}{\varepsilon} (x_n - x)$$

連続条件 @ $x = 0$

$$\frac{dV_p(x)}{dx} = \frac{N_a^- e}{\varepsilon} (x_p)$$

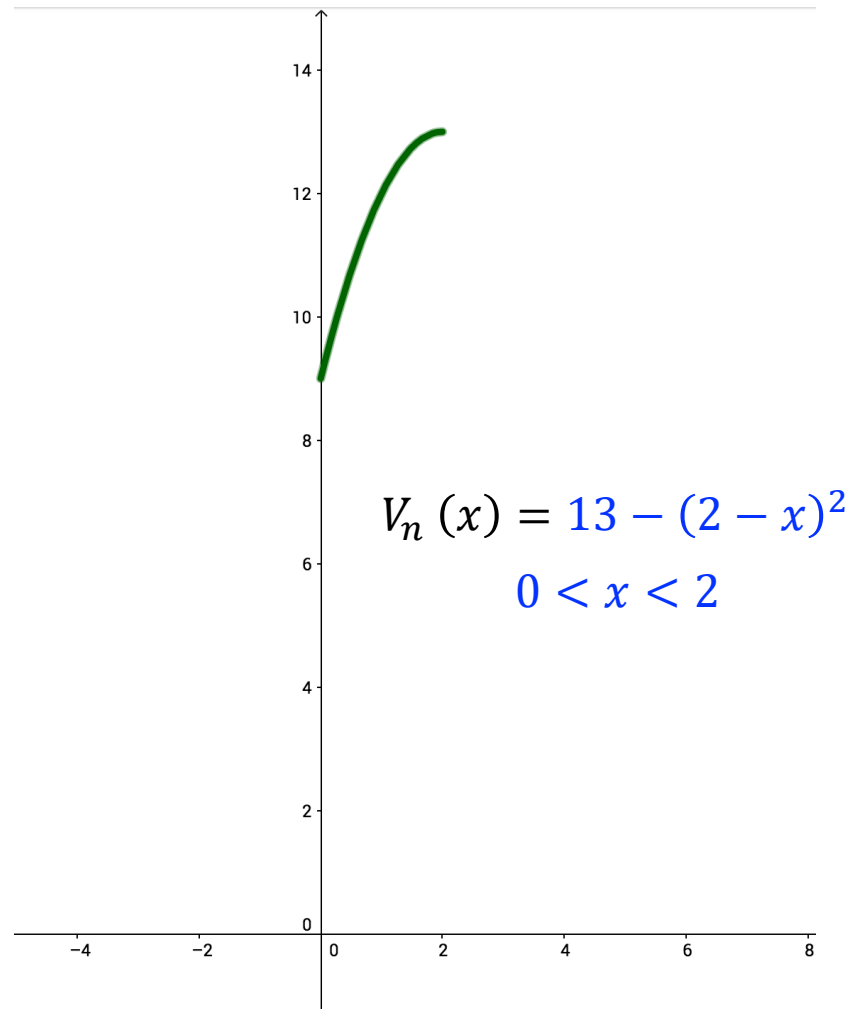
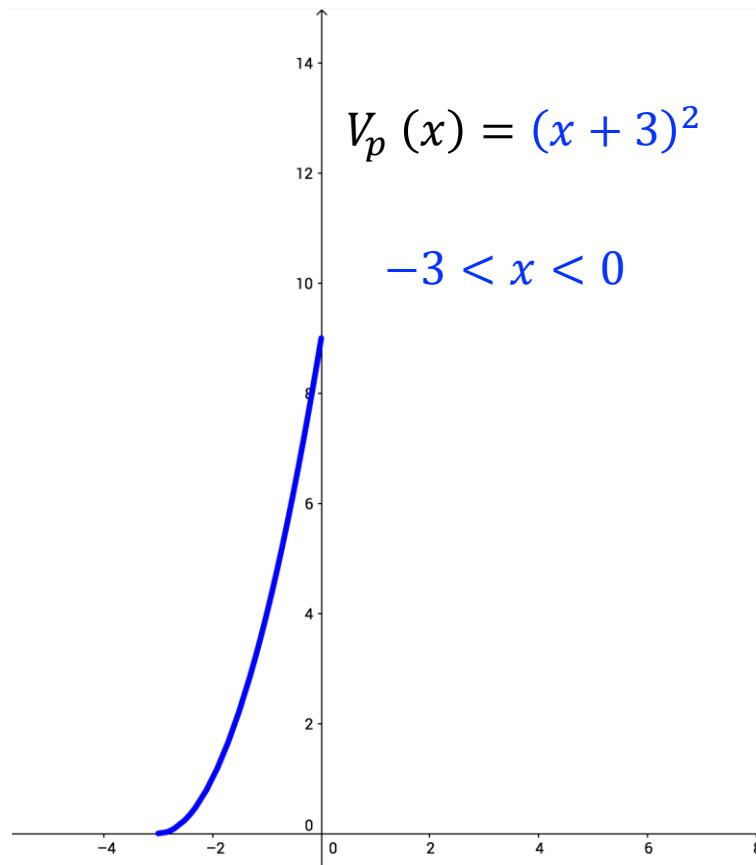
$$\frac{dV_n(x)}{dx} = \frac{N_d e}{\varepsilon} (x_n)$$

$$\frac{dV_n(x)}{dx} \approx \frac{dV_p(x)}{dx}$$

電圧位置依存性: 図示する

$$V_p(x) = \frac{N_a * e}{2\epsilon} (x + x_p)^2$$

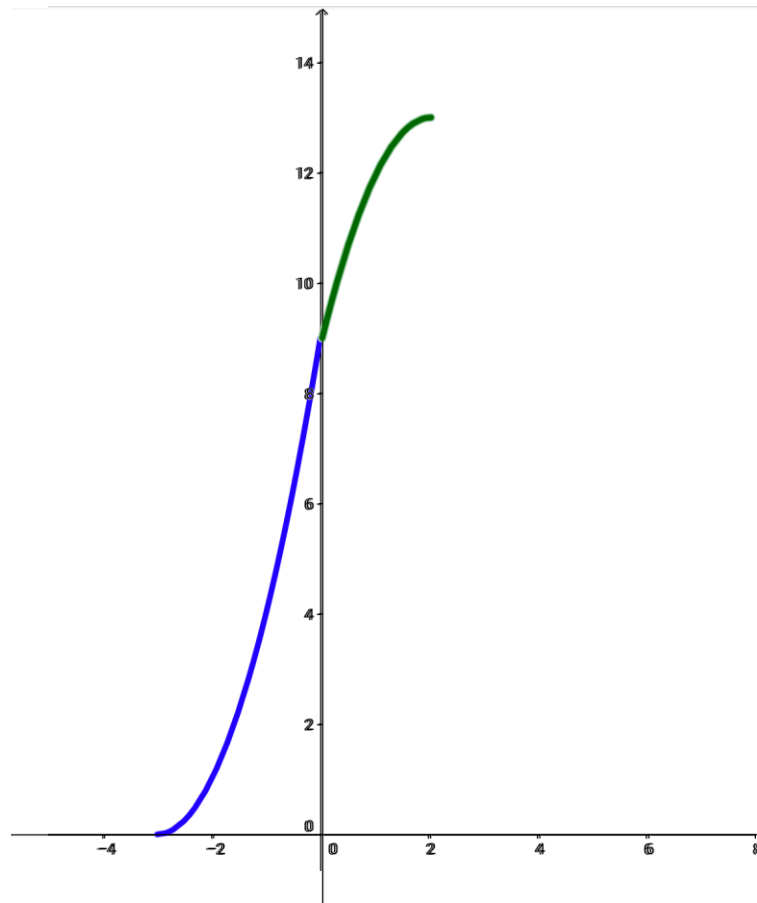
$$V_n(x) = V_{bi} - \frac{N_d * (x_n - x)^2 * (e)}{2\epsilon}$$



電圧位置依存性: 図示する

$$V_p(x) = \frac{N_a * e}{2\epsilon} (x + x_p)^2$$

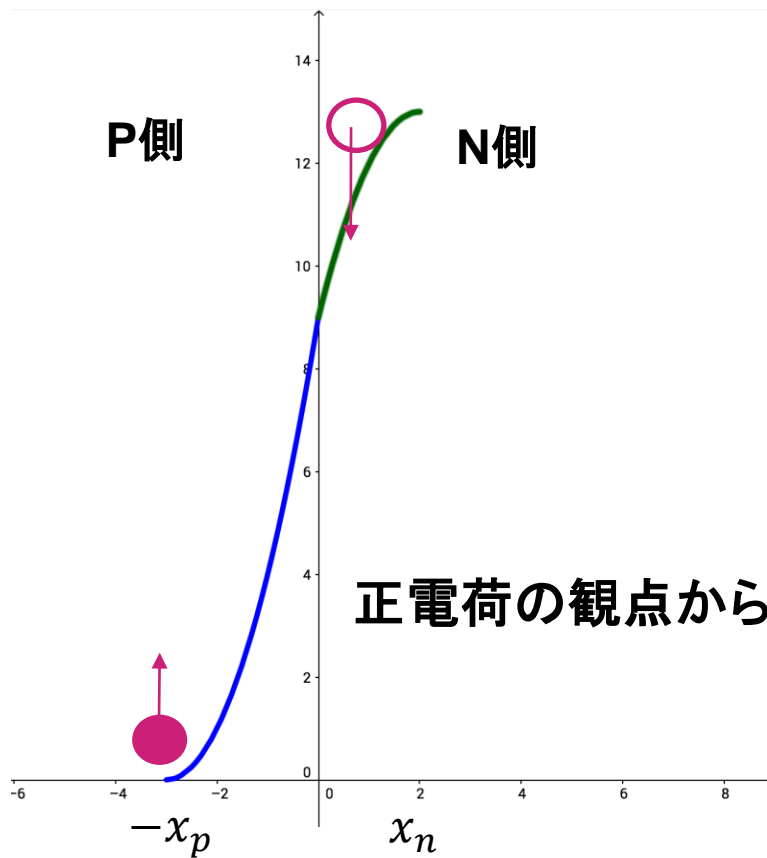
$$V_n(x) = V_{bi} - \frac{N_d * (x_n - x)^2 * (e)}{2\epsilon}$$



電圧位置依存性: 図示する

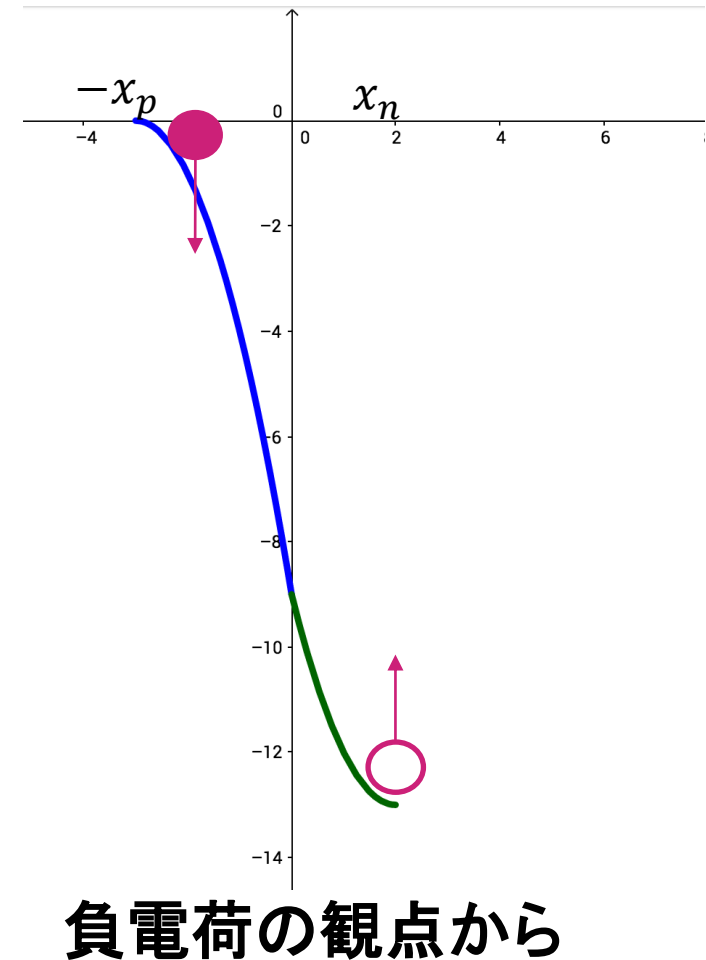
$$V_p(x) = \frac{N_a * e}{2\epsilon} (x + x_p)^2$$

$$V_n(x) = V_{bi} - \frac{N_d * (x_n - x)^2 * (e)}{2\epsilon}$$

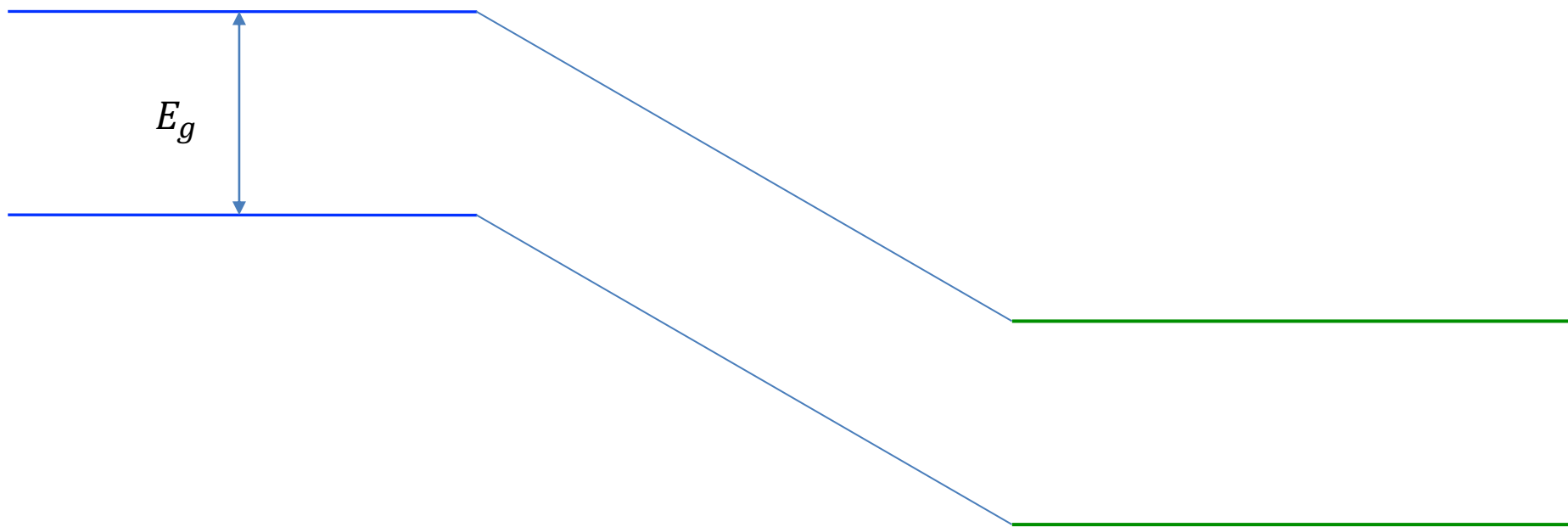
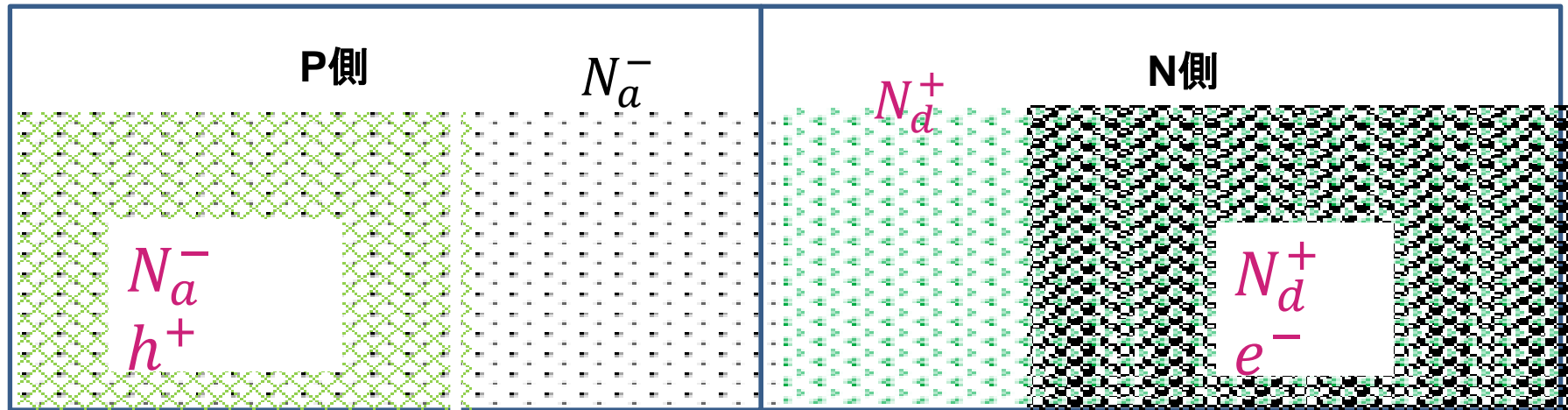


$$-V_p(x) = -\frac{N_a * e}{2\epsilon} (x + x_p)^2$$

$$-V_n(x) = -V_{bi} + \frac{N_d * (x_n - x)^2 * (e)}{2\epsilon}$$



PN接合の空乏層領域:



PN接合の空乏層領域:

