平成26年度前期東京工業大学学部講義

電子デバイス

Electron Devices

資料（３）　Presentation

Kazuya Masu
Director, ICE Cube Center
Solutions Research Laboratory
Precision and Intelligence Laboratory
Dept. Electronics and Applied Physics

益　一　哉
異種機能集積研究センター
ソリューション研究機構
精密工学研究所
大学院・物理電子システム創造専攻

Tel & Fax: 045-924-5022 Email: masu@ieee.org,
http://masu-www.pi.titech.ac.jp/~masu/index-j.html

Green ICE Tokyo Tech Information Communication Energy
Semiconductor Solution Research

TOKYO TECH Pursuing Excellence

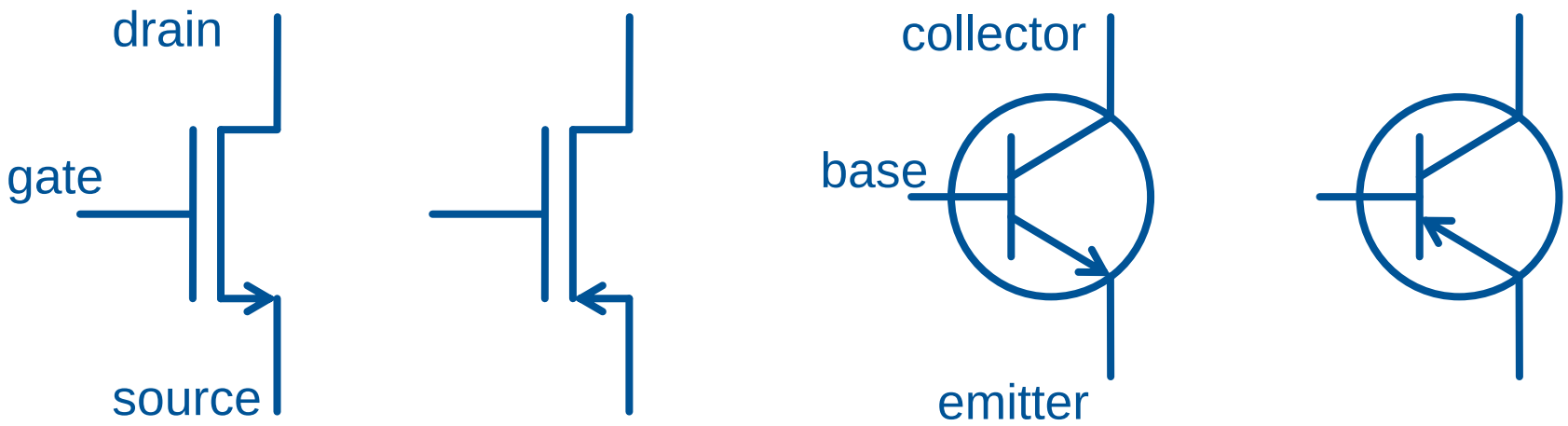
Today's purpose

- Qualitative understand of the origin of bipolar transistor action
- 定性的にトランジスタ動作の原理を理解する。
- The base width should be small. This is origin of transistor action.
- ベース幅が小さいことが本質である。

Bipolar Transistor

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

Unipolar	Bipolar
単極性	両極性
電子（または正孔）	電子と正孔
MOSFET MISFET J-FET（Junction FET）	Bipolar Tr HBT（Hetero Bipolar Tr）



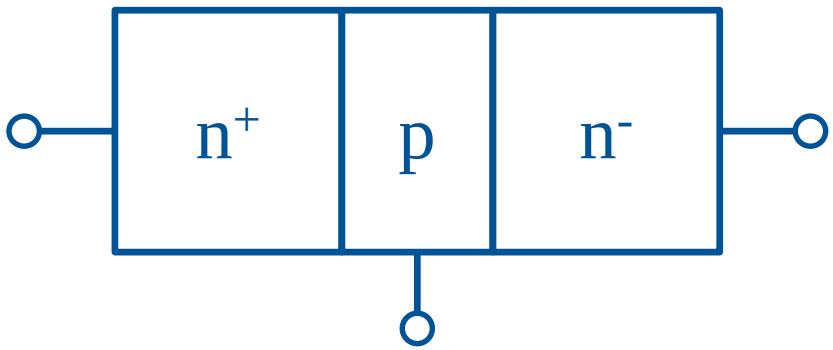
nMOSFET pMOSFET npn Bp pnp Bp

Tatsuya Masu

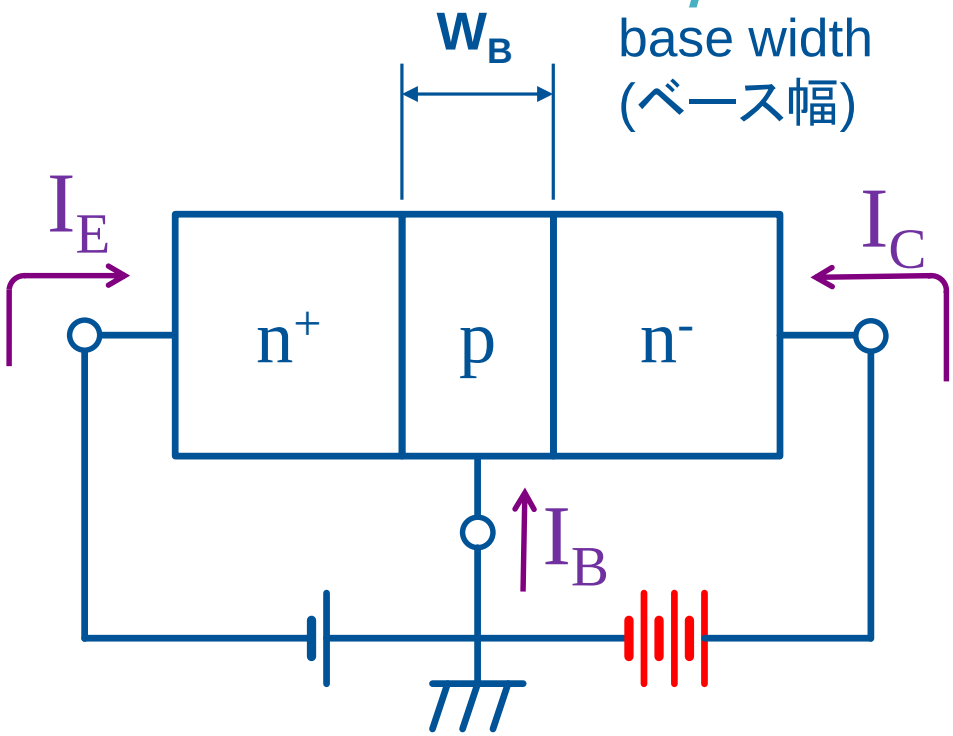
Bipolar Transistor

TOKYO TECH
Pursuing Excellence

emitter base collector

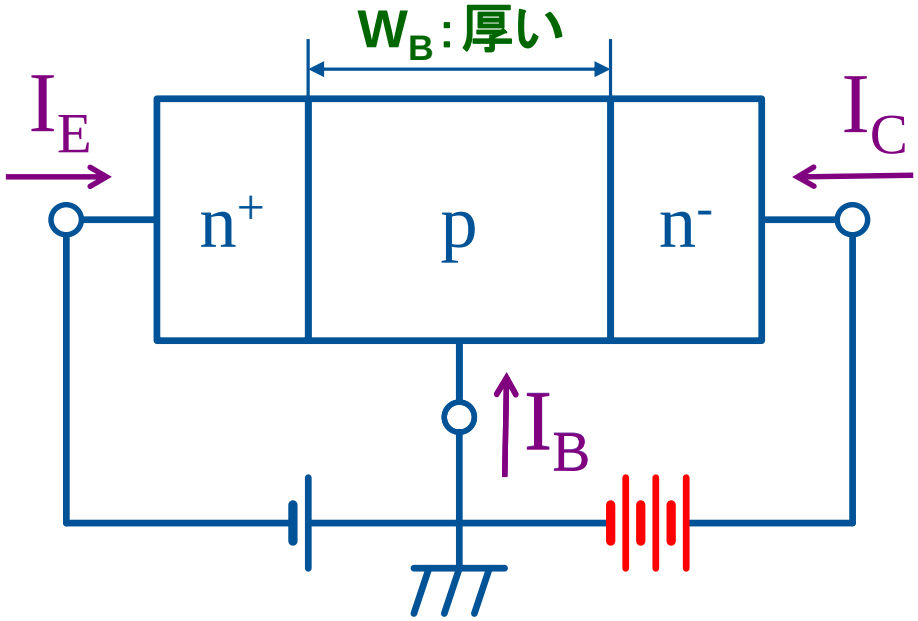


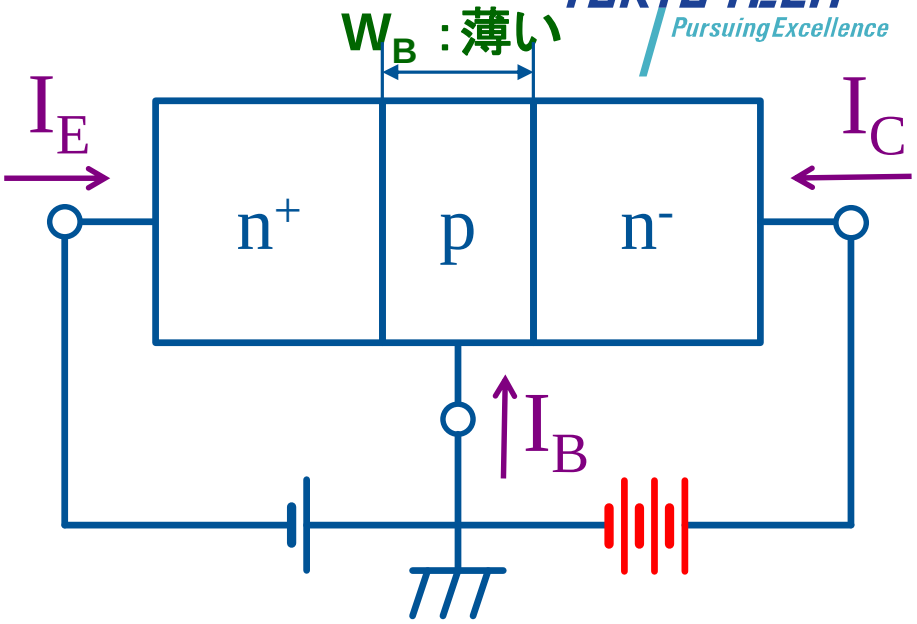
10^{20}-10^{21} cm^{-3} 10^{16} cm^{-3} 10^{13}-10^{14} cm^{-3}

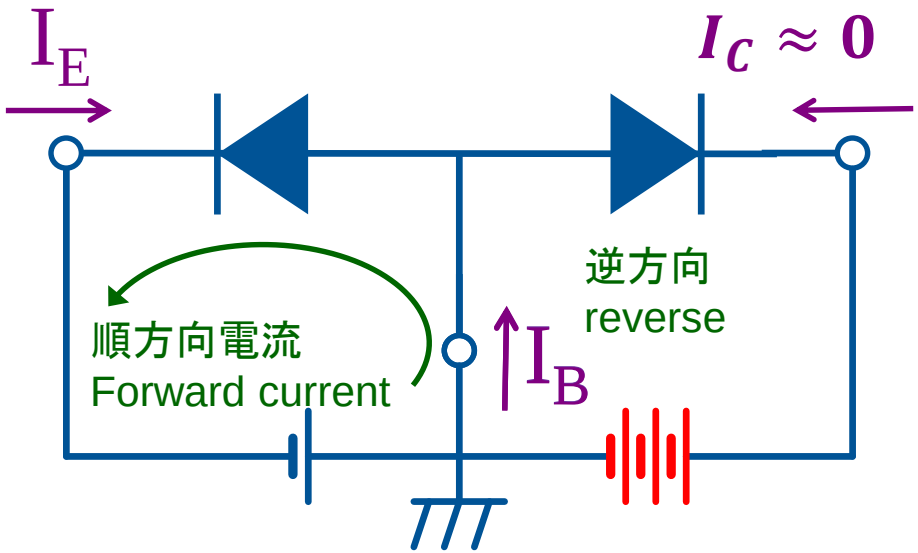


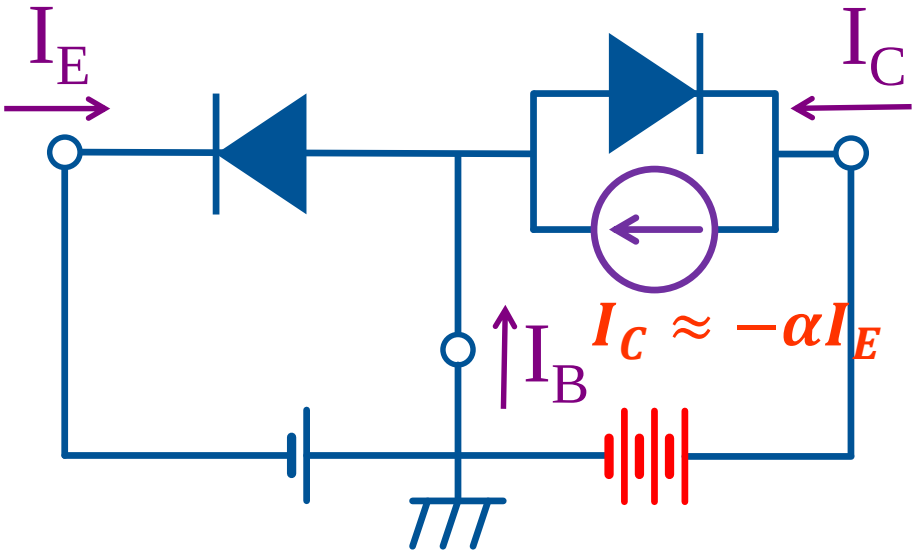
Bipolar Transistor

TOKYO TECH
Pursuing Excellence









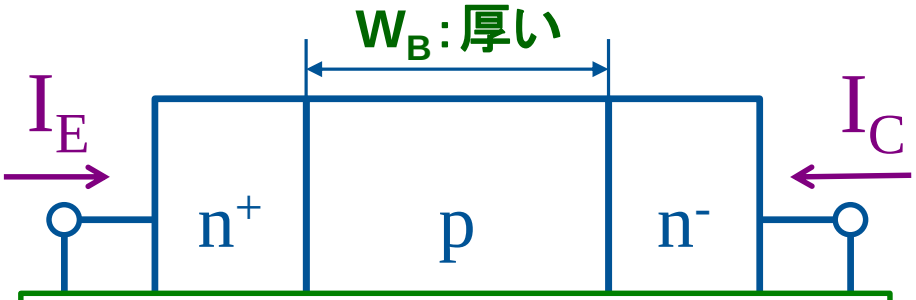
I_EとI_Cは独立。単なるダイオードの接続。

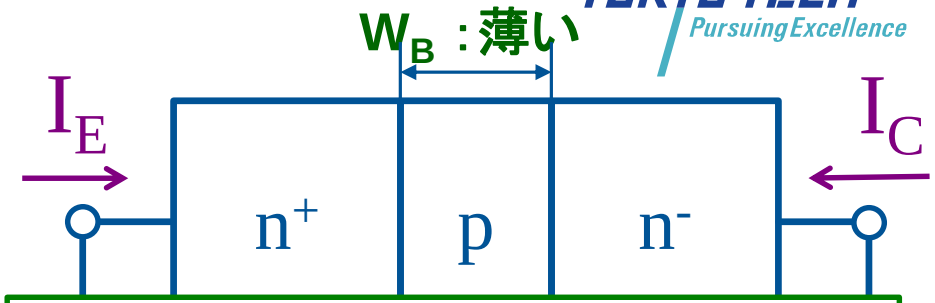
何故、こうなるか理解する。

Kazuya Masu

Bipolar Transistor

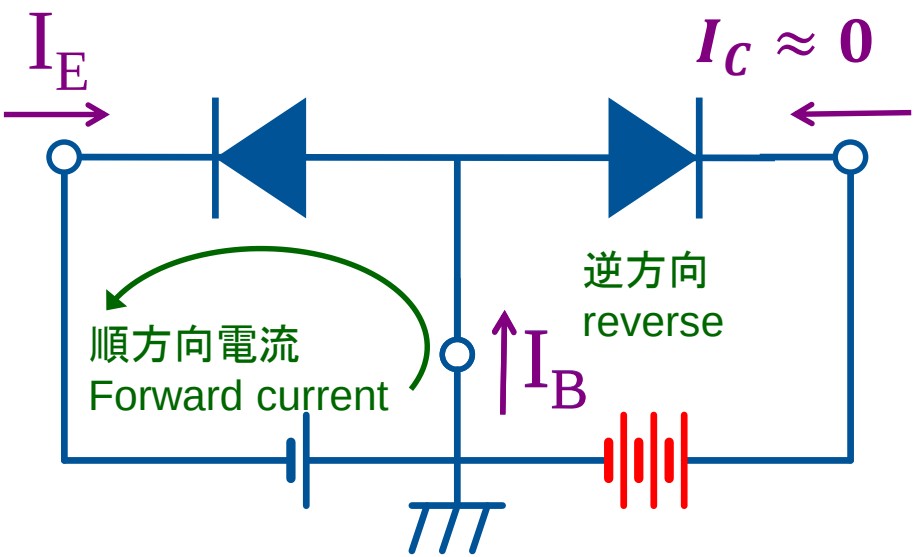
TOKYO TECH
Pursuing Excellence

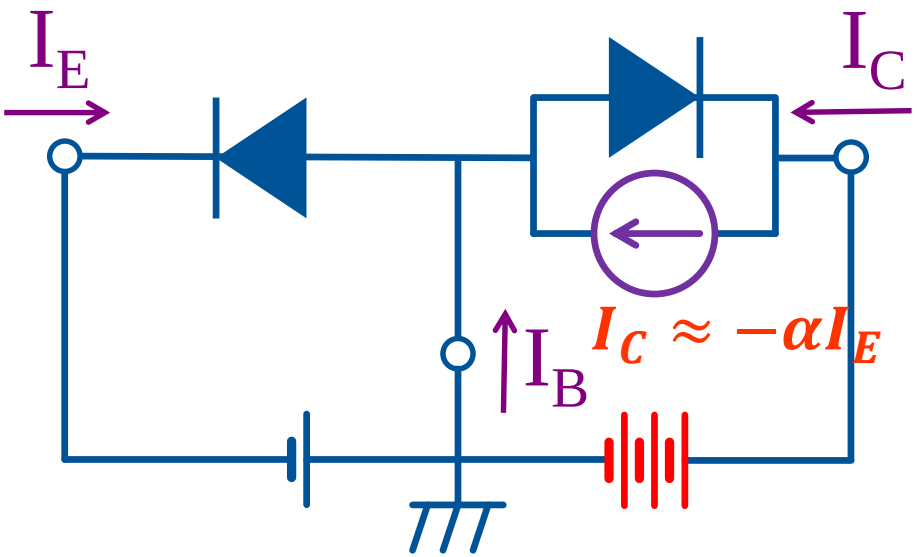




I_E and I_C are independent. Just a reverse connection of two diodes

Why does the current source appears in the equivalent circuit?

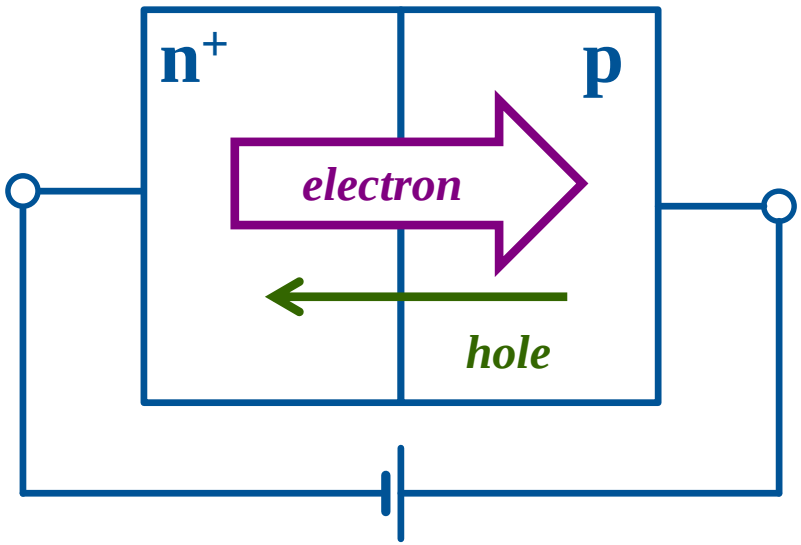




Review: n^+p junction (1)

Jpn and Eng

TOKYO TECH
Pursuing Excellence



- $J = J_o \left\{ exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right\}$
- $J_o = J_{electron} + J_{hole}$

$$= q\frac{D_e n_{po}}{L_e} + q\frac{D_h p_{no}}{L_h}$$

- $\gamma = \frac{electron\ current}{hole\ current}$

$$= \left(\frac{D_e}{L_e}\frac{L_h}{D_h}\right)\frac{n_{po}}{p_{no}}$$

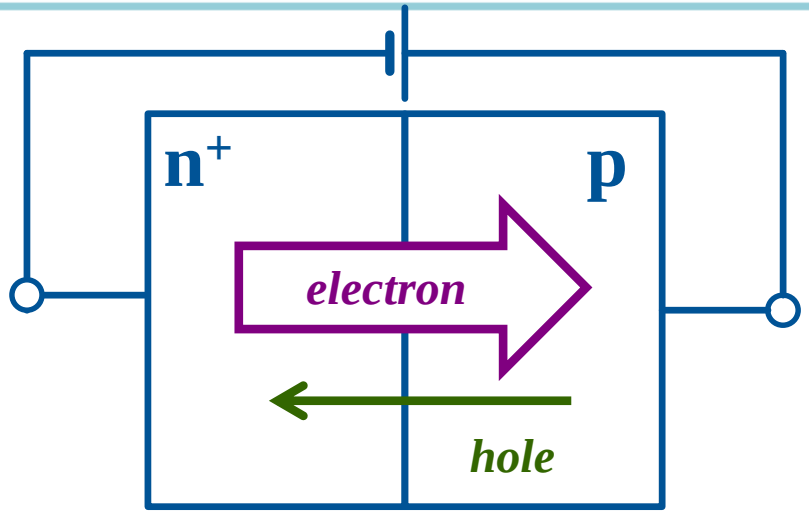
- $n_{po}N_A = {n_i}^2, p_{no}N_D = {n_i}^2$より、
- $\gamma = \left(\frac{D_e}{L_e}\frac{L_h}{D_h}\right)\frac{N_D}{N_A} \propto \frac{N_D}{N_A} \gg 1$
- Electron current >> hole current

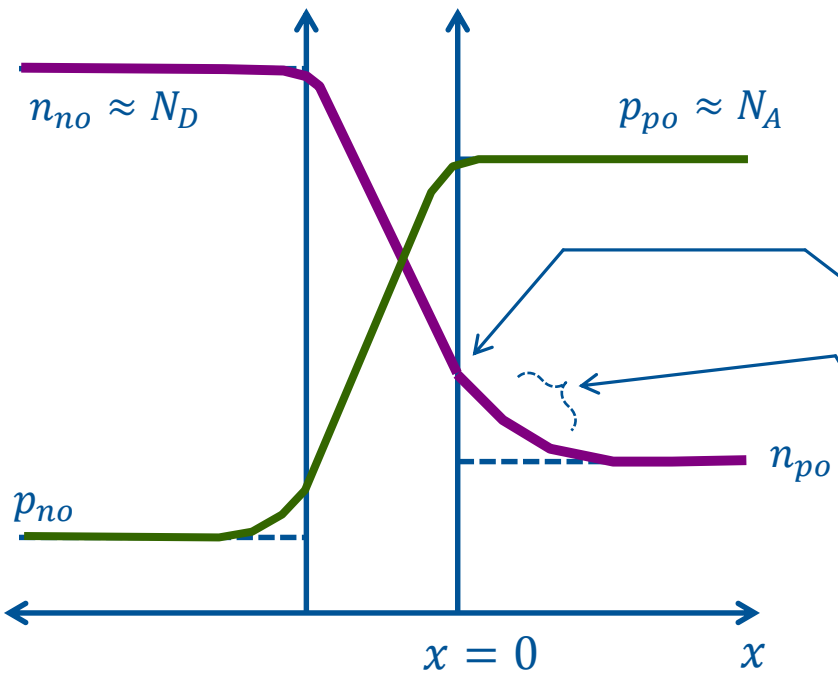
電子電流 >> 正孔電流

Review: n⁺p junction (2)

Eng

TOKYO TECH
Pursuing Excellence





- Electrons are injected from n^+ region to p-type base thru the depletion layer.
- The injected electrons diffuse to $+x$ direction; diffusion current. The decreasing rate of electron concentration is proportional to 1/(diffusion length).
- If the width of p-type layer reduces below diffusion length L_e, how does the electron concentration change?
- See the analysis of n^+pp^+ junction in the appropriated text book.

$$n_{po} e^{qV/kT}$$

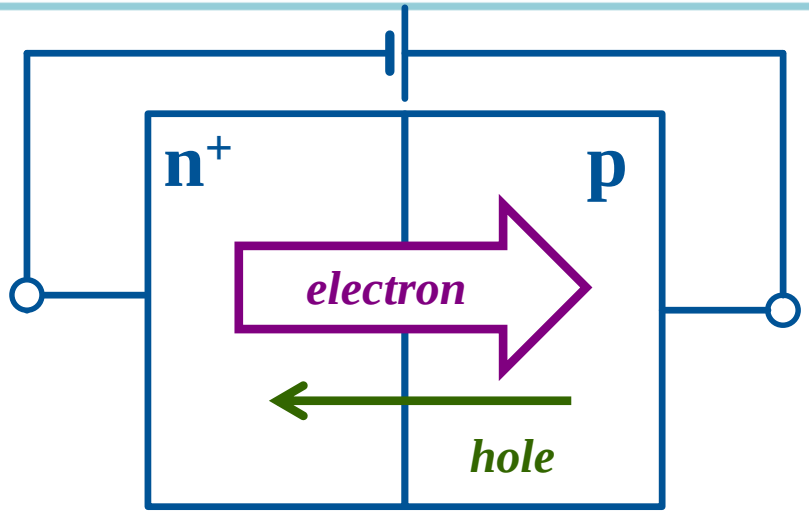
$$n_{po}\left(e^{qV/kT} - 1\right)e^{-x/L_e}$$

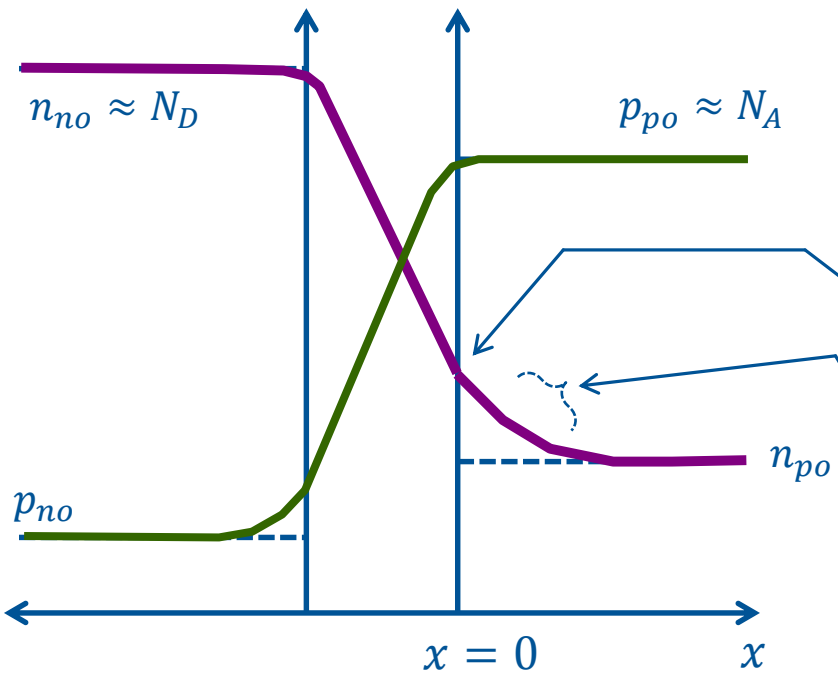
Kazuya Masu

Review: n+p junction (2)

Jpn

TOKYO TECH
Pursuing Excellence





- N+から空乏層を介して、p形中性領域に電子が注入される。
- 注入された電子は、$+x$ 方向に拡散する（拡散電流）。傾きは拡散長さ（L_e）
- これは、p形層が十分厚いとき。もし、p形厚さが拡散長さより十分小さくなったら？

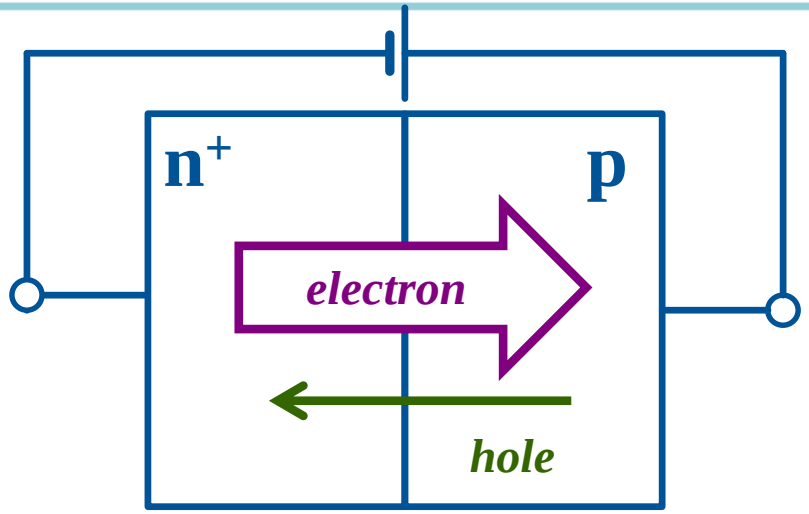
$$n_{po}e^{qV/kT}$$

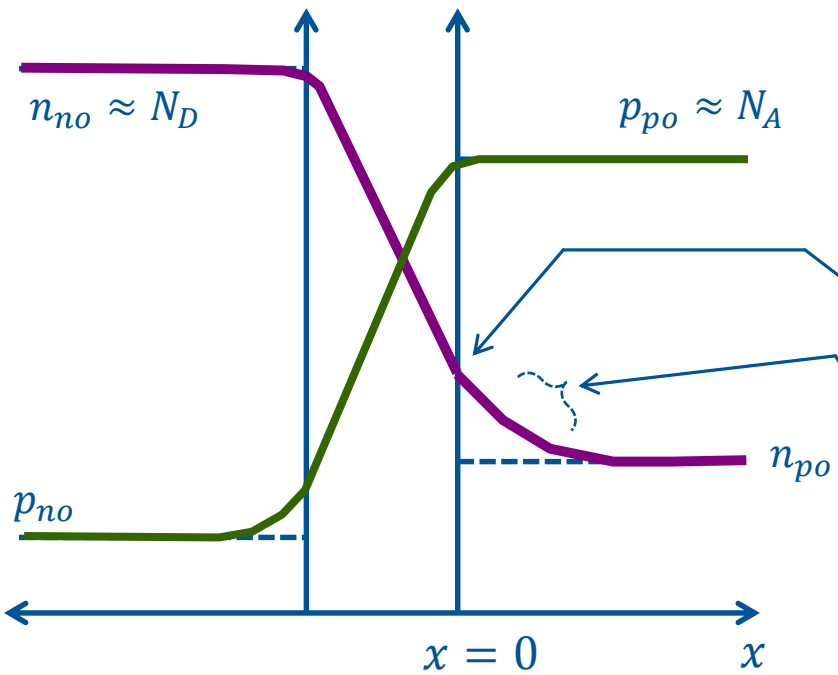
$$n_{po}\left(e^{qV/kT}-1\right)e^{-x/L_e}$$

Review: n⁺p junction (2)

Jpn and Eng

TOKYO TECH
Pursuing Excellence





- Electrons are injected from n⁺ region to p-type base thru the depletion layer.
- N+から空乏層を介して、p形中性領域に電子が注入される。
- The injected electrons diffuse to $+x$ direction; diffusion current. The decreasing rate of electron concentration is proportional to 1/(diffusion length).
- 注入された電子は、$+x$ 方向に拡散する（拡散電流）。傾きは拡散長さ（L_e）
- If the width of p-type layer reduces below diffusion length Le, how does the electron concentration change?
- P型層の厚さが拡散長より短くなったら、電子濃度はどのように変化するだろうか？
- See the analysis of n⁺pp⁺ junction in the appropriated text book.
- この問題は、適当な教科書でのn⁺pp⁺ 接合の解析を参考にせよ。

$$n_{po} e^{qV/kT}$$

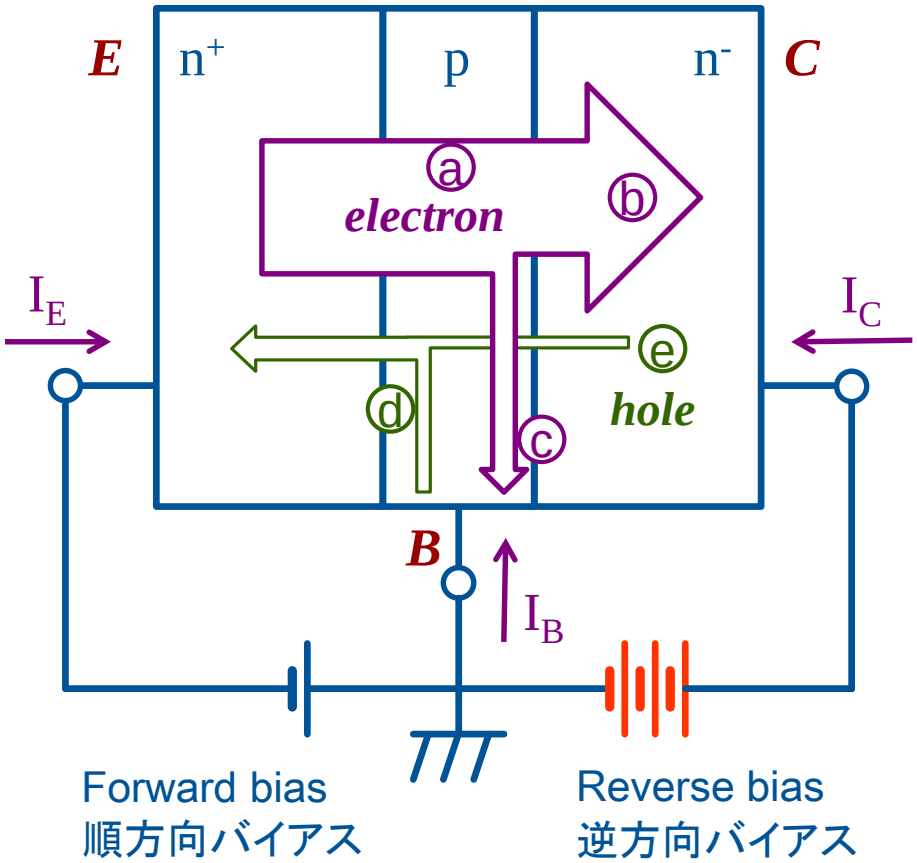
$$n_{po}\left(e^{qV/kT} - 1\right)e^{-x/L_e}$$

Kazuya Masu

Bipolar Transistor -1

Eng &Jpn

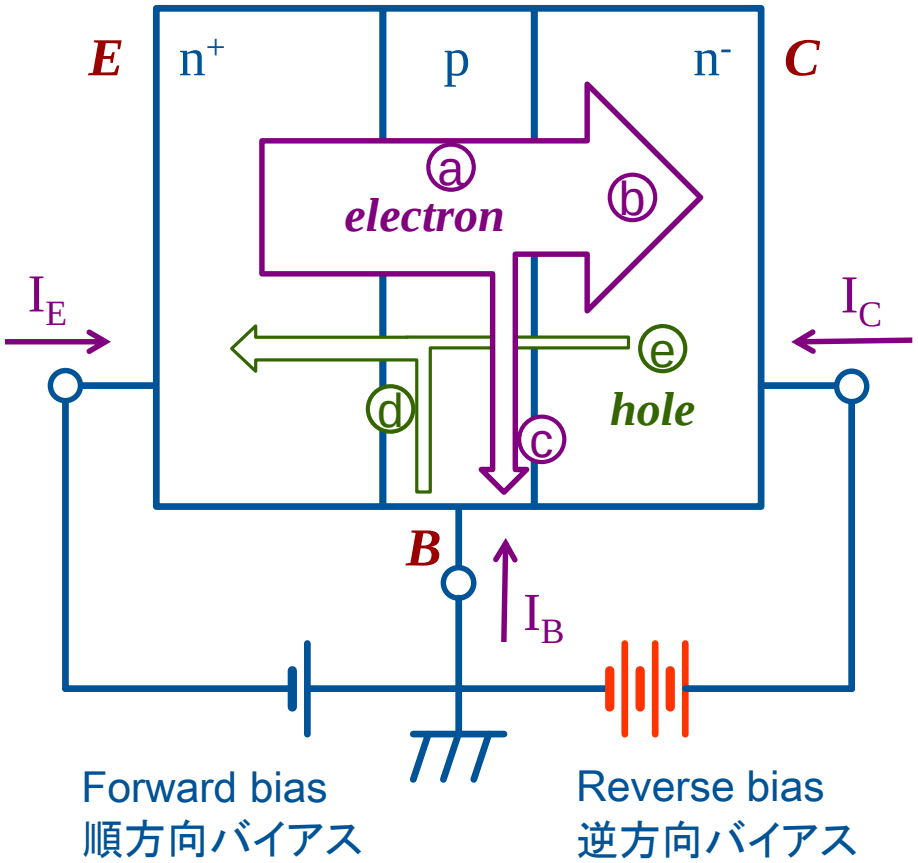
TOKYO TECH
Pursuing Excellence



- Electrons are injected from the emitter to base by the E-B forward bias (a)
- B-E間順方向バイアスにより、エミッタからベースに電子が注入される(a)
- Because the base width is less than the electron diffusion length, the injected electrons speed thru the base region, and the electrons that reach the depletion region edge are attracted to collector by the large electric field between base and collector.(b)
- ベース層厚さが拡散長さに比較して小さので、エミッタからベースに注入された電子、その大部分がベースを突っ切って、コレクタに流れ込む(b)。

Bipolar Transistor -2

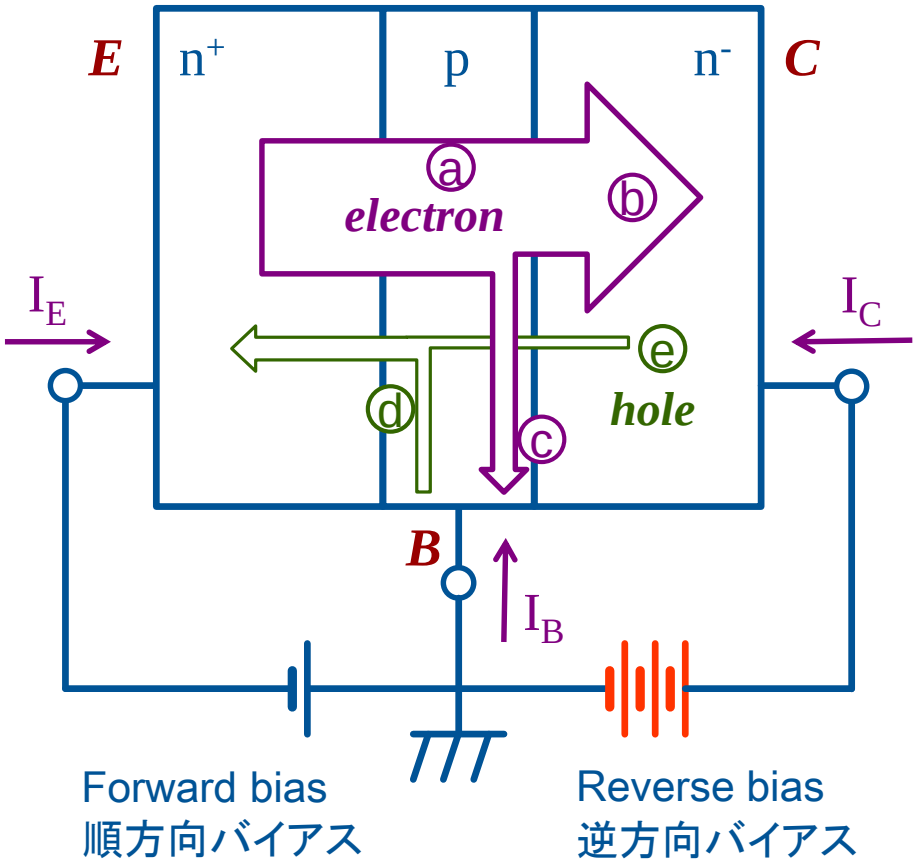
Eng &Jpn



- A part of injected electrons are flowing to the base terminal. (c).
- 一部はベースに流れる(c)。
- The small amount of hole is injected from base to emmiter. (d).
- B-E間順方向バイアスにより、ベースからエミッタへ正孔が注入される(d)。
- Very small amount hole current flows by the reverse bias between base and collector (e).
- B-C間逆方向バイアスによる電流が流れる。(e)

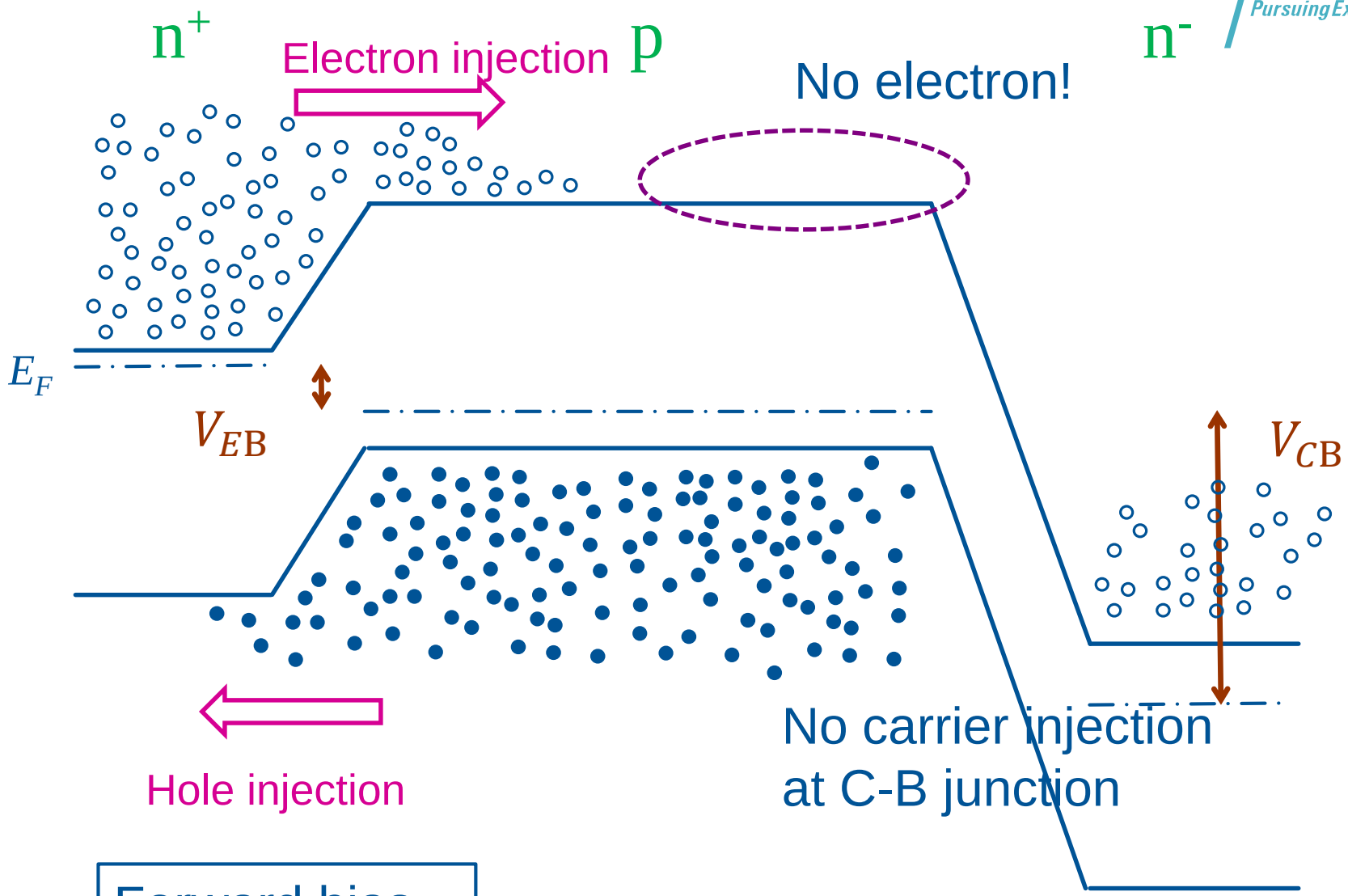
Bipolar Transistor

Jpn



- B-E間順方向バイアスにより、エミッタからベースに電子が注入される(a)
- ベース層厚さが拡散長さに比較して小さので、エミッタからベースに注入された電子、その大部分がベースを突っ切って、コレクタに流れ込む(b)。
- 一部はベースに流れる(c)。
- B-E間順方向バイアスにより、ベースからエミッタへ正孔が注入される（d）。
- B-C間逆方向バイアスによる電流が流れる。（e）

Carrier injection: wide base width

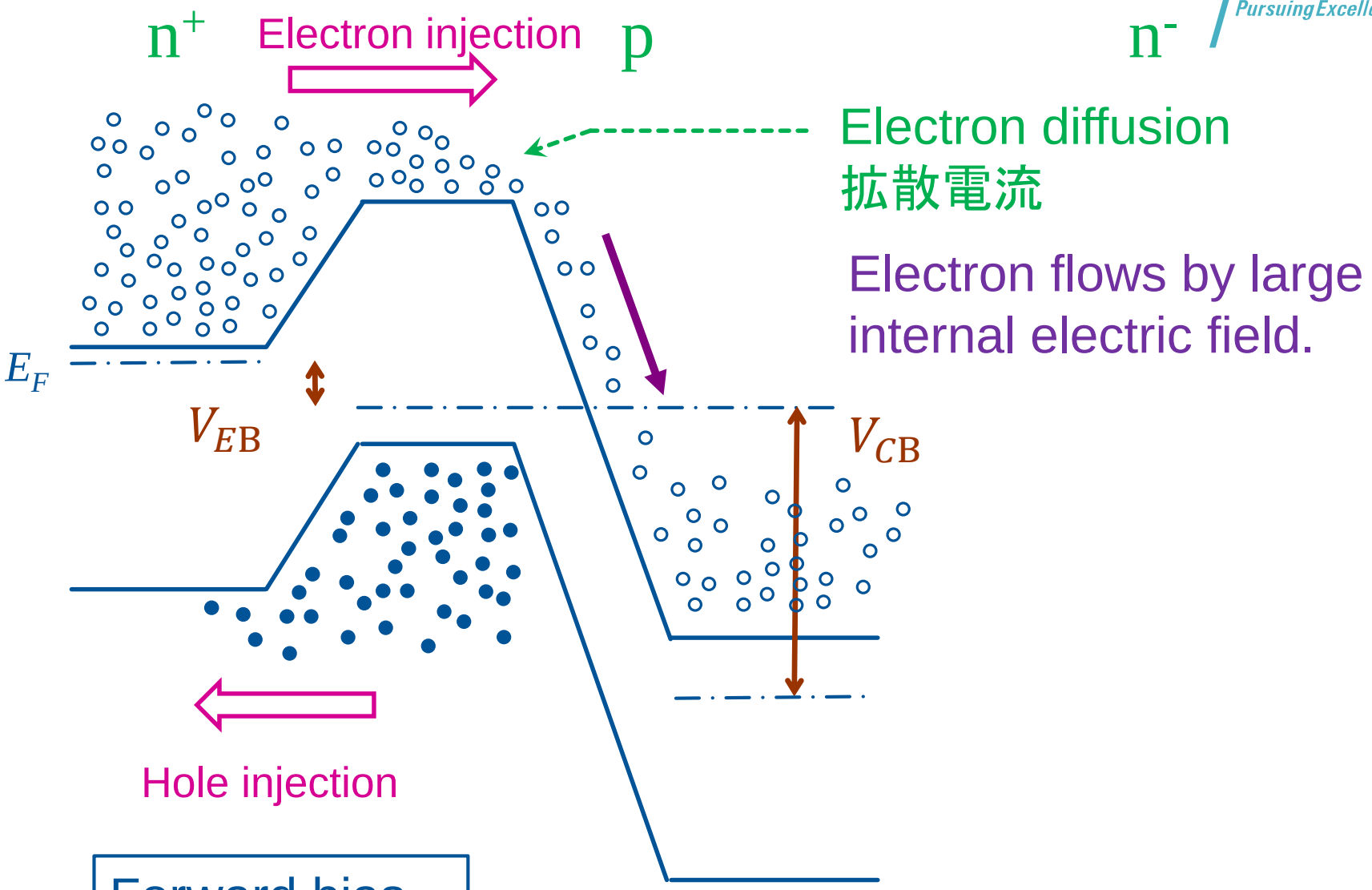


Forward bias
順方向バイアス

Reverse bias 逆方向バイアス

Carrier injection: narrow base width

TOKYO TECH
Pursuing Excellence



Forward bias
順方向バイアス

Reverse bias 逆方向バイアス

実際のバイポーラトランジスタの構造

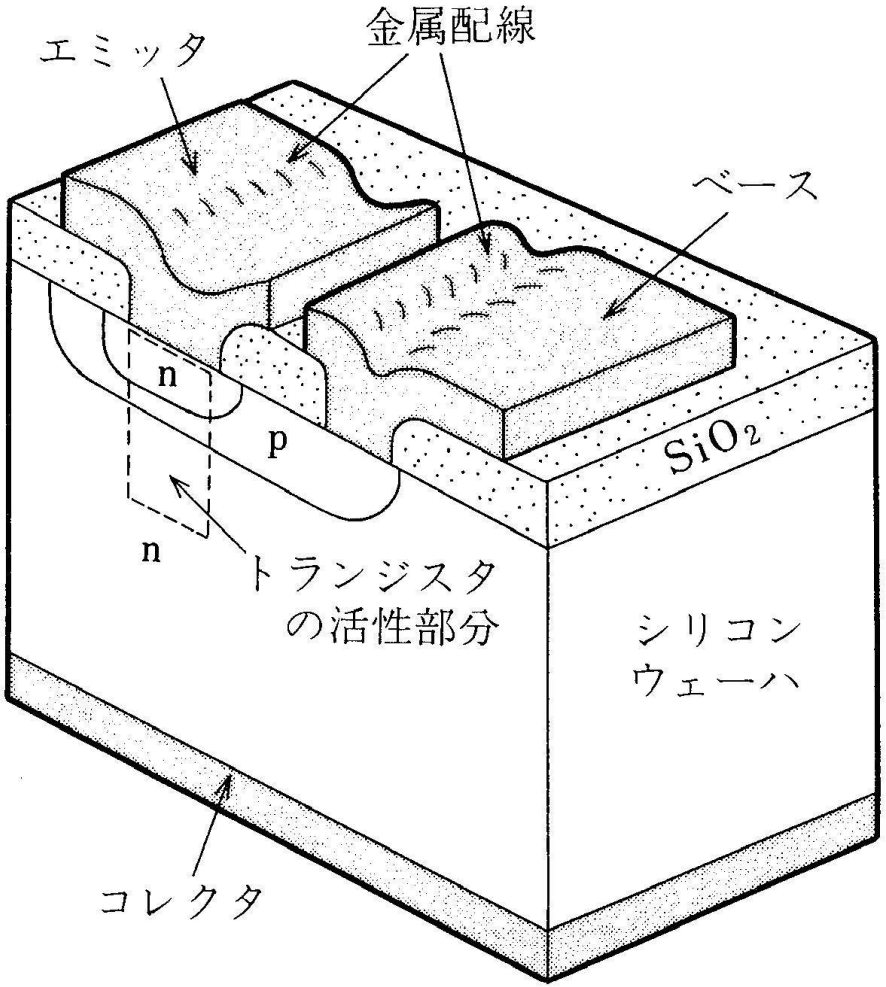


図 3・4　シリコンプレーナプロセスによるバイポーラトランジスタ（npn 形）の概形

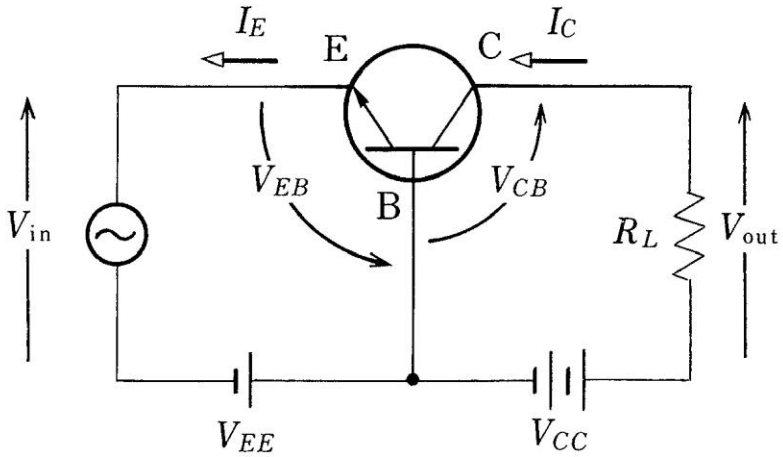
ベース接地回路における電圧増幅動作

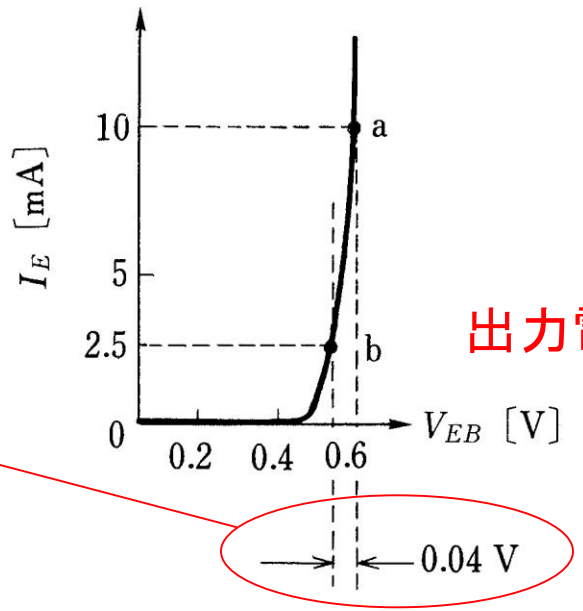
TOKYO TECH
Excellence

V_{EB}

基準点

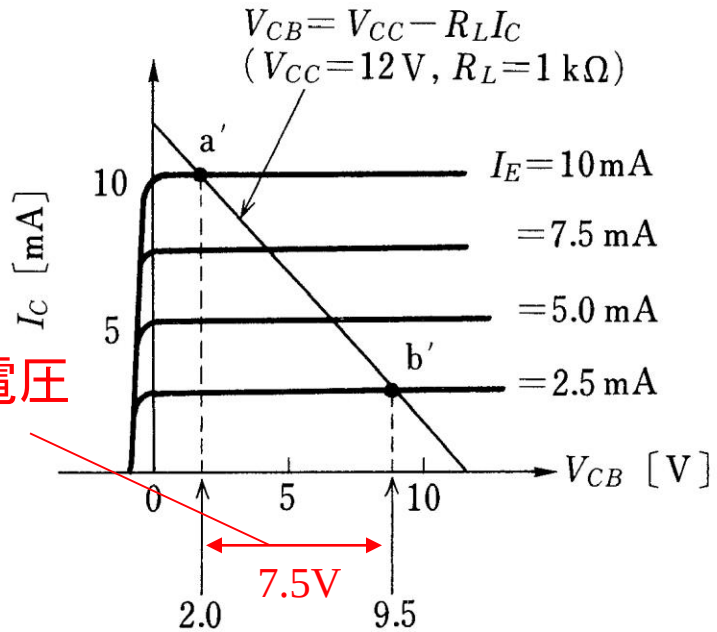
かかっている点



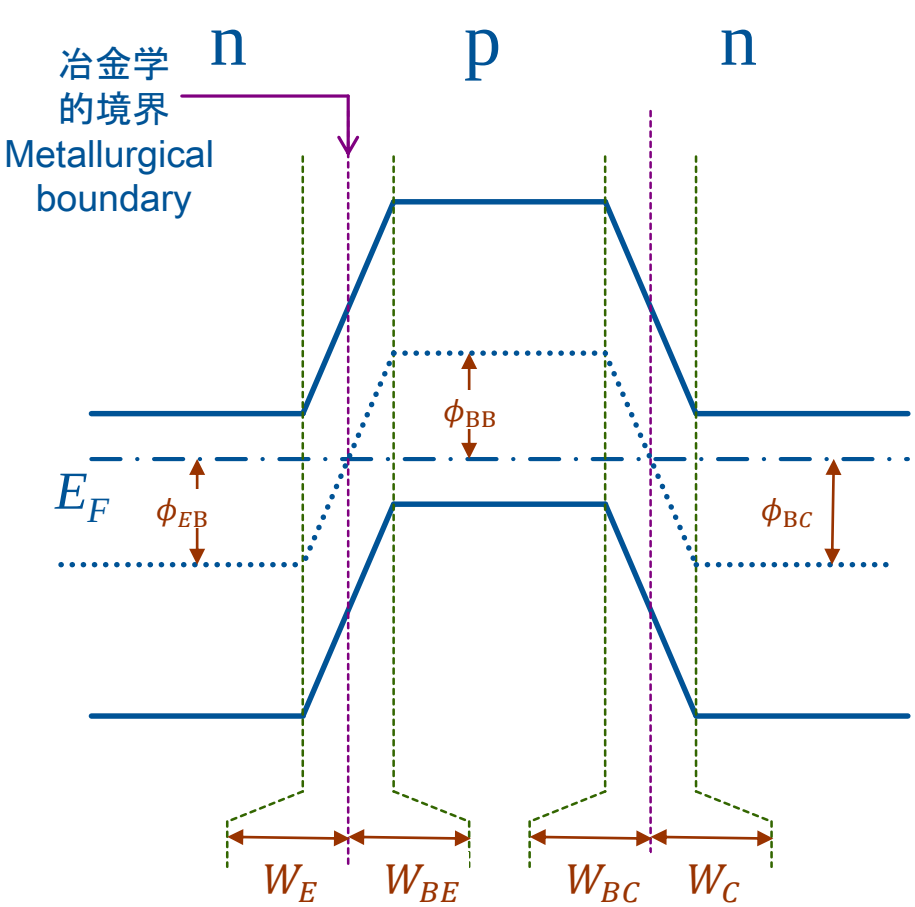


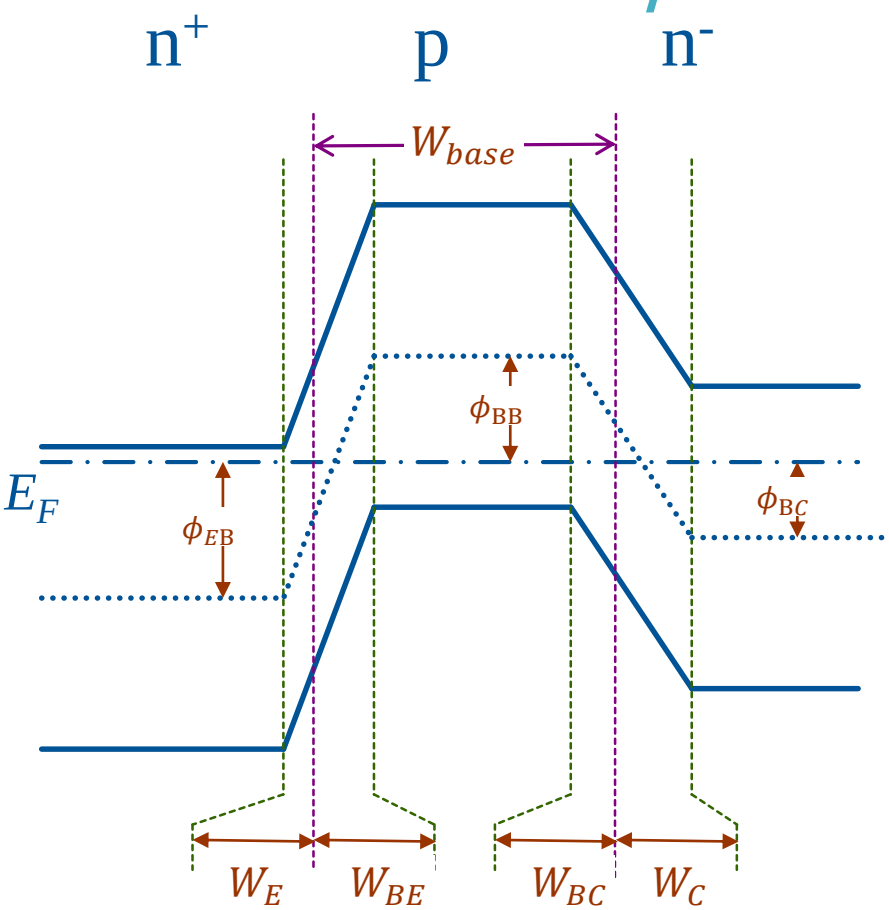
入力電圧

出力電圧



npn and n^+pn^- junctions





- npn structure: doping concentrations of each regions are the same.
- npn構造（全てのドーピング量が等しいとき）

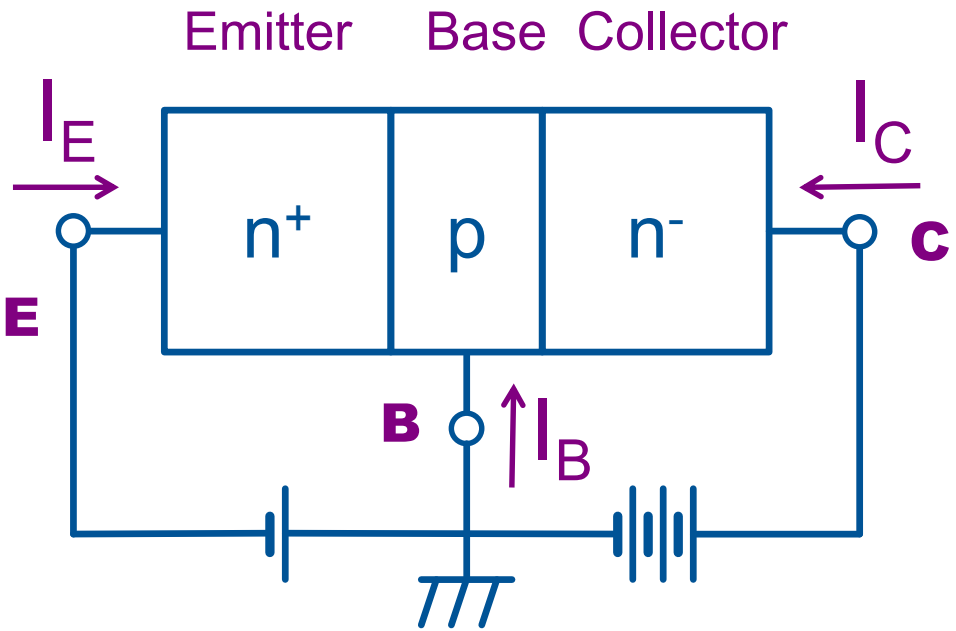
- n^+pn^- structure

数値をいれて考える

- npnとn^+pn^-接合について、具体的に下記の数値を入れたときのバンド図を描け。
- ベース幅W_{base}は、0.6μmと仮定せよ。
- 描くときは、横軸1cm=0.1μm,（3～5）cm = 1eVというように適当に数値を仮定して描け。
- $W_E, W_{BE}, W_{CE}, W_C,$ $\phi_{E\mathrm{B}}, \phi_{B\mathrm{B}}, \phi_{C\mathrm{B}}$ をきちっと明示せよ。

- npn接合
  - $N_D(emitter) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_A(base) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_D(collector) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
- n^+pn^-接合
  - $N_D(emitter) = 1 \times 10^{19}(cm^{-3})$
  - $N_A(base) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_D(collector) = 1 \times 10^{15}(cm^{-3})$

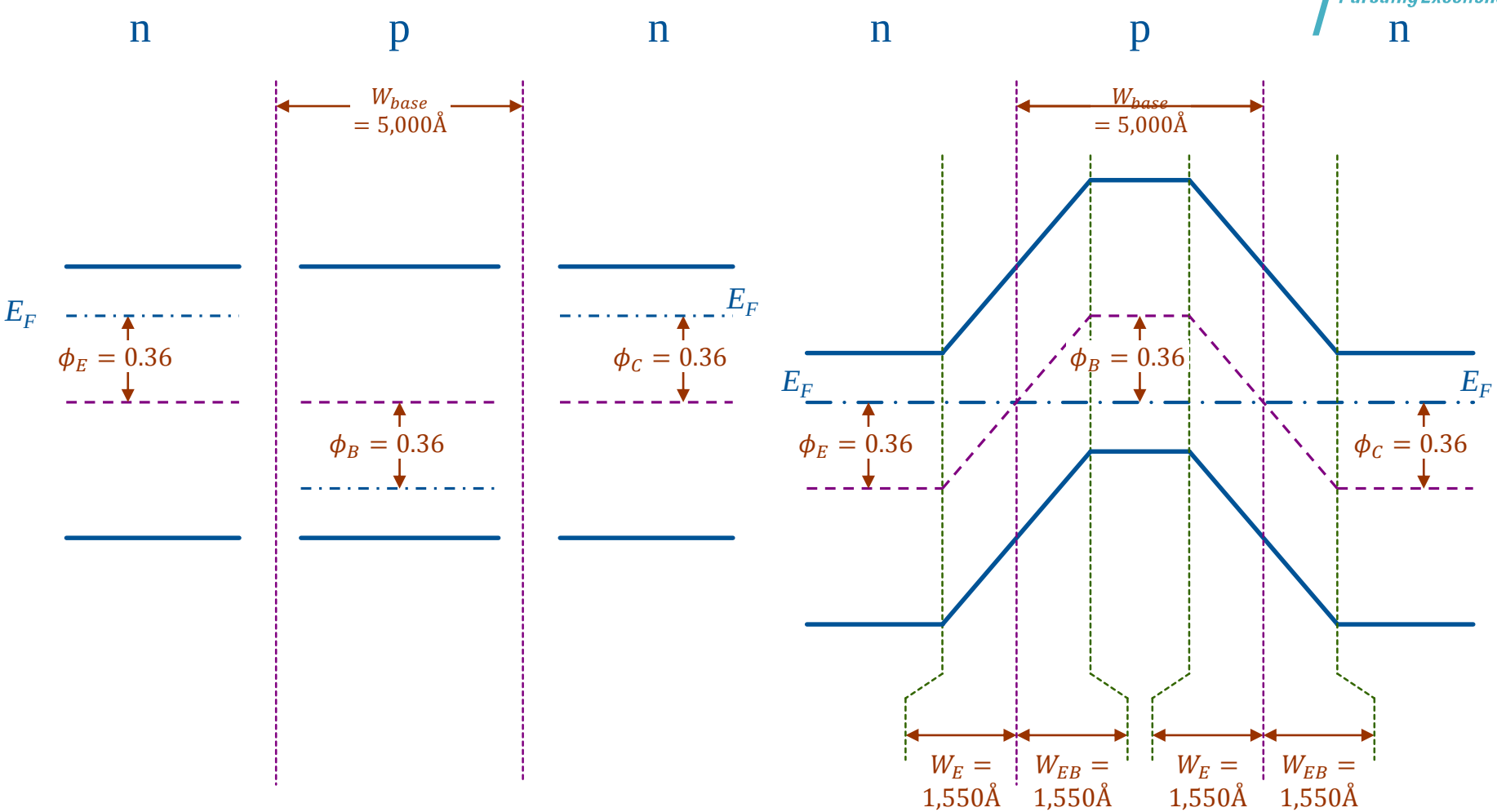
n^+pn^-接合



順方向バイアス　　逆方向バイアス

- エミッタ／ベース接合間には順方向バイアス、ベース／コレクタ間には逆方向バイアスを印加する。
- この時のバンド図は？

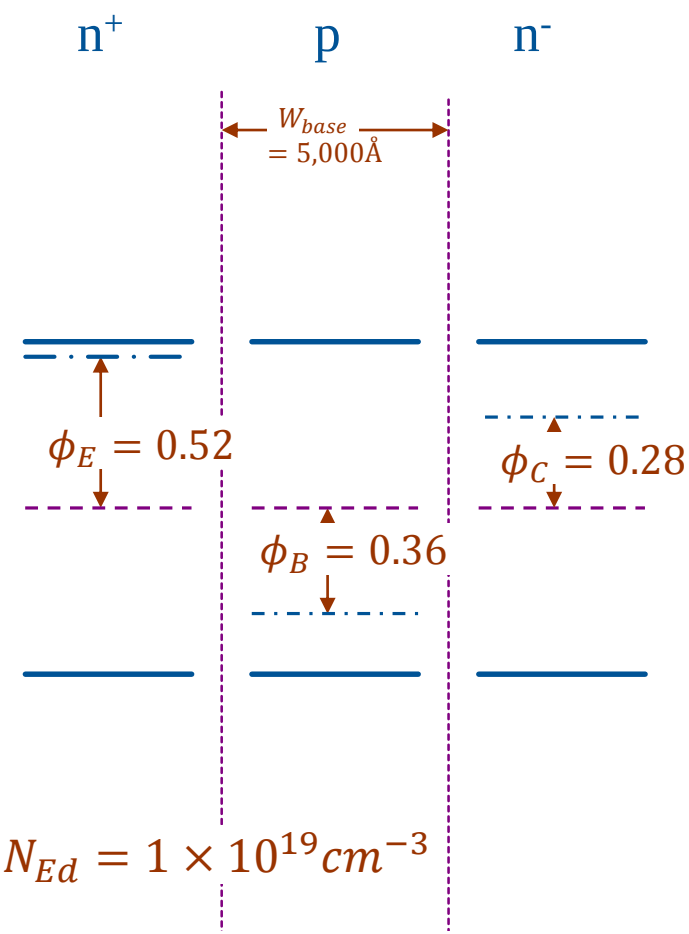
npn接合（接合前と接合後）

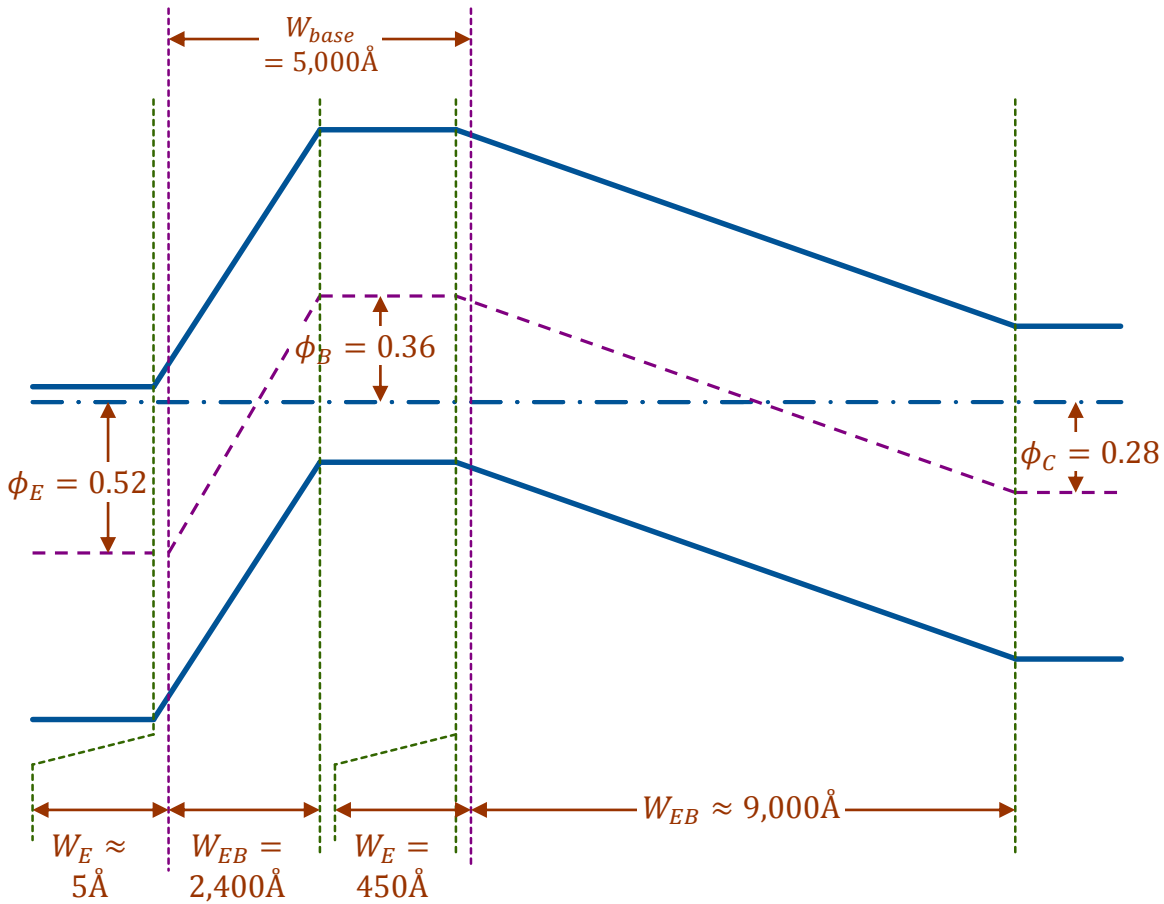


$N_{Ed} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$ $N_{Ba} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$ $N_{Cd} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$ $N_{Ed} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$ $N_{Ba} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$ $N_{Cd} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$

n^+pn^-接合

TOKYO TECH
Pursuing Excellence





$N_{Ed} = 1 \times 10^{19} cm^{-3}$

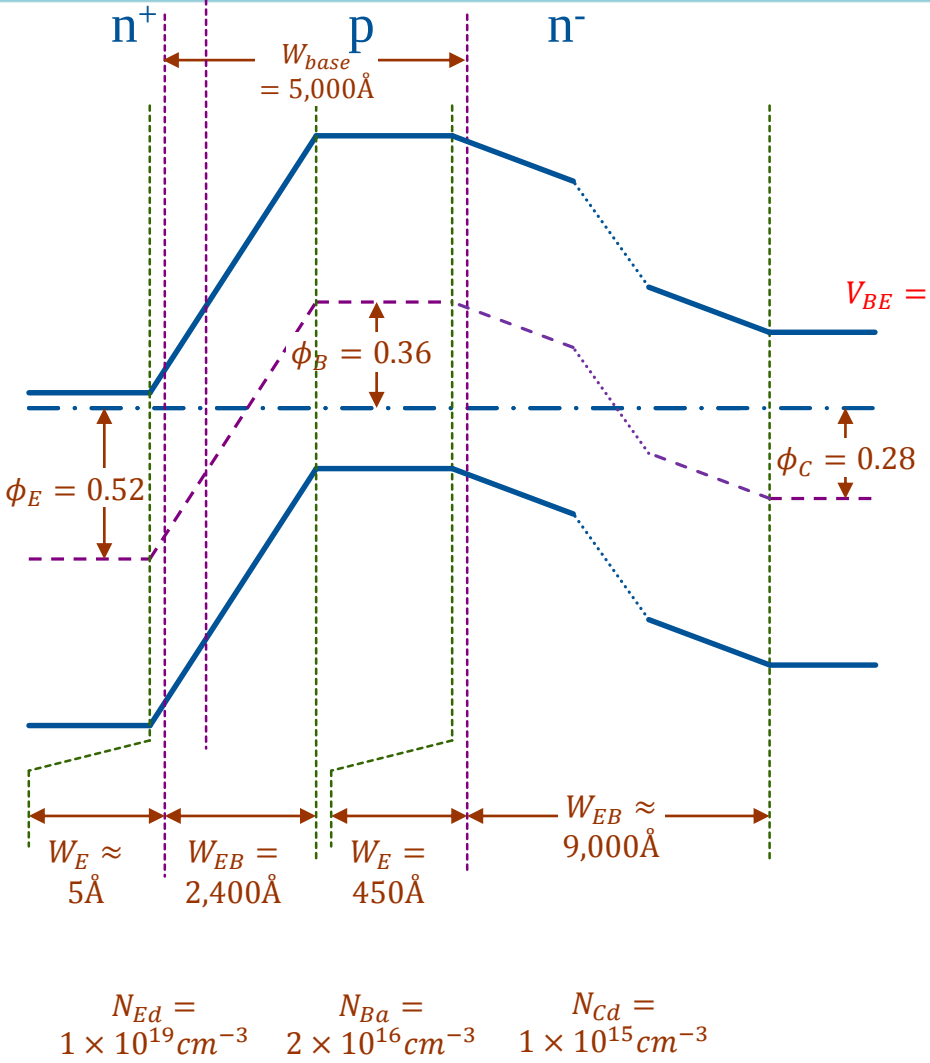
$N_{Ba} = 2 \times 10^{16} cm^{-3}$

$N_{Cd} = 1 \times 10^{15} cm^{-3}$

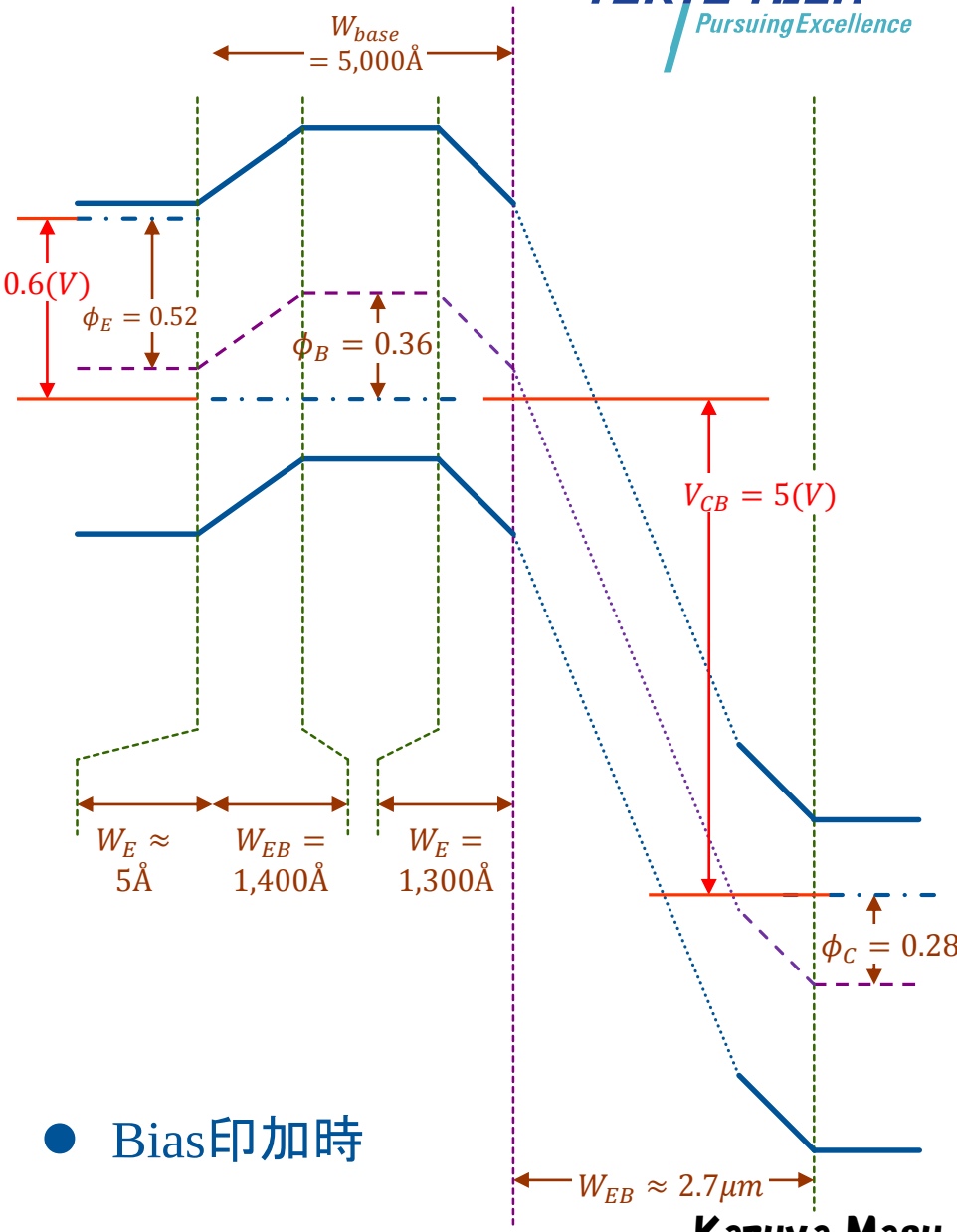
- Zero bias

n^+pn^-接合

TOKYO TECH
Pursuing Excellence



- Zero bias

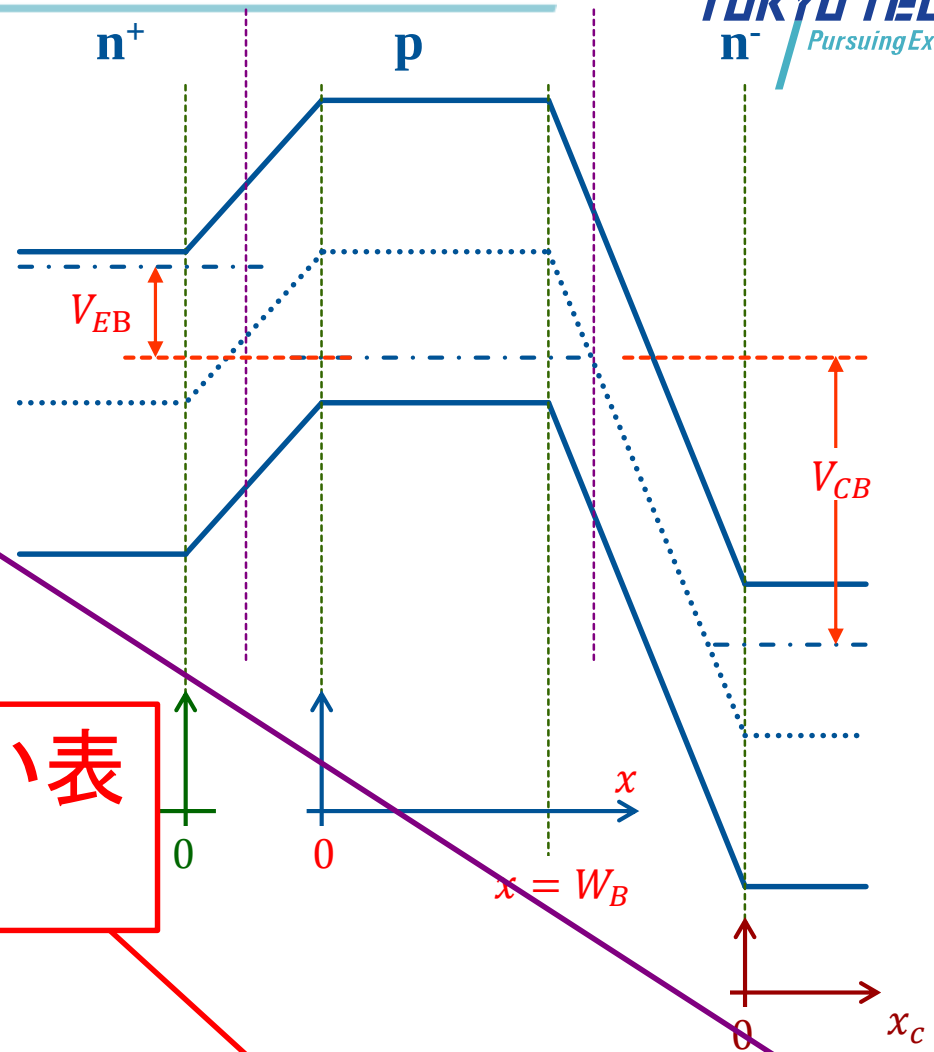


- Bias印加時

n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

- エミッタ、ベース、コレクタ領域のそれぞれの少数キャリア連続の方程式を解く。境界条件は、pn接合の電流電圧特性を求めたときから類推可能である。
- 全部の少数キャリアの連続方程式を解くならば、解が分かり易くなるように、x軸を定義して解くと良い。
- エ
合
じ。
- コレクタには、ベース領域を突っ切った電子が流れ込む。

次のpageに正しい表記を示します。



不純物濃度 N_E
多数キャリア（電子）$n_E(x)$
少数キャリア（正孔）$p_E(x)$
熱平衡時の濃度: n_{E0}
熱平衡時の濃度: p_{E0}

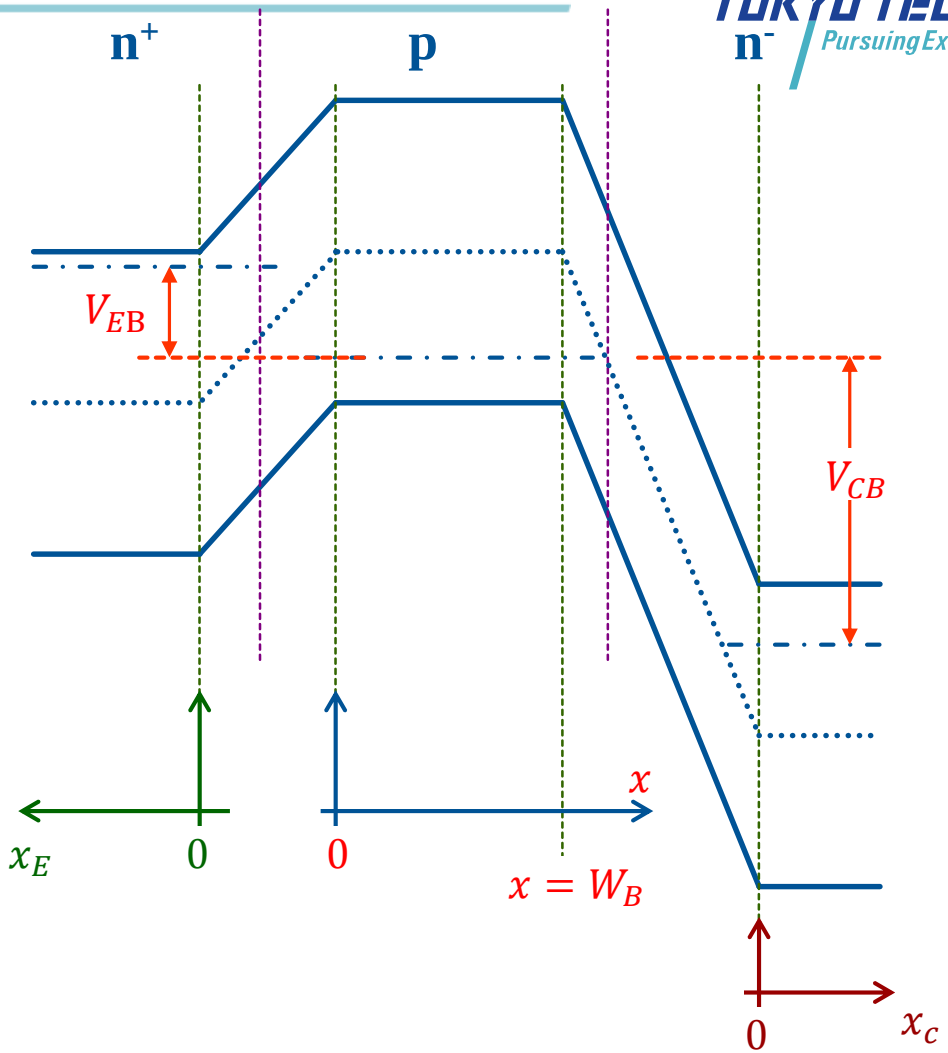
不純物濃度 N_B
多数キャリア（電子）$n_B(x)$
少数キャリア（正孔）$p_B(x)$
熱平衡時の濃度: n_{B0}
熱平衡時の濃度: p_{B0}

不純物濃度 N_C
多数キャリア（電子）$n_C(x)$
少数キャリア（正孔）$p_C(x)$
熱平衡時の濃度: n_{C0}
熱平衡時の濃度: p_{C0}

n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

Jpn

- エミッタ、ベース、コレクタ領域のそれぞれの少数キャリア連続の方程式を解く。境界条件は、pn接合の電流電圧特性を求めたときから類推可能である。
- 全部の少数キャリアの連続方程式を解くならば、解が分かり易くなるように、x軸を定義して解くと良い。
- エミッタ・ベース間はpn接合の順方向の解き方と同じ。
- コレクタには、ベース領域を突っ切った電子が流れ込む。



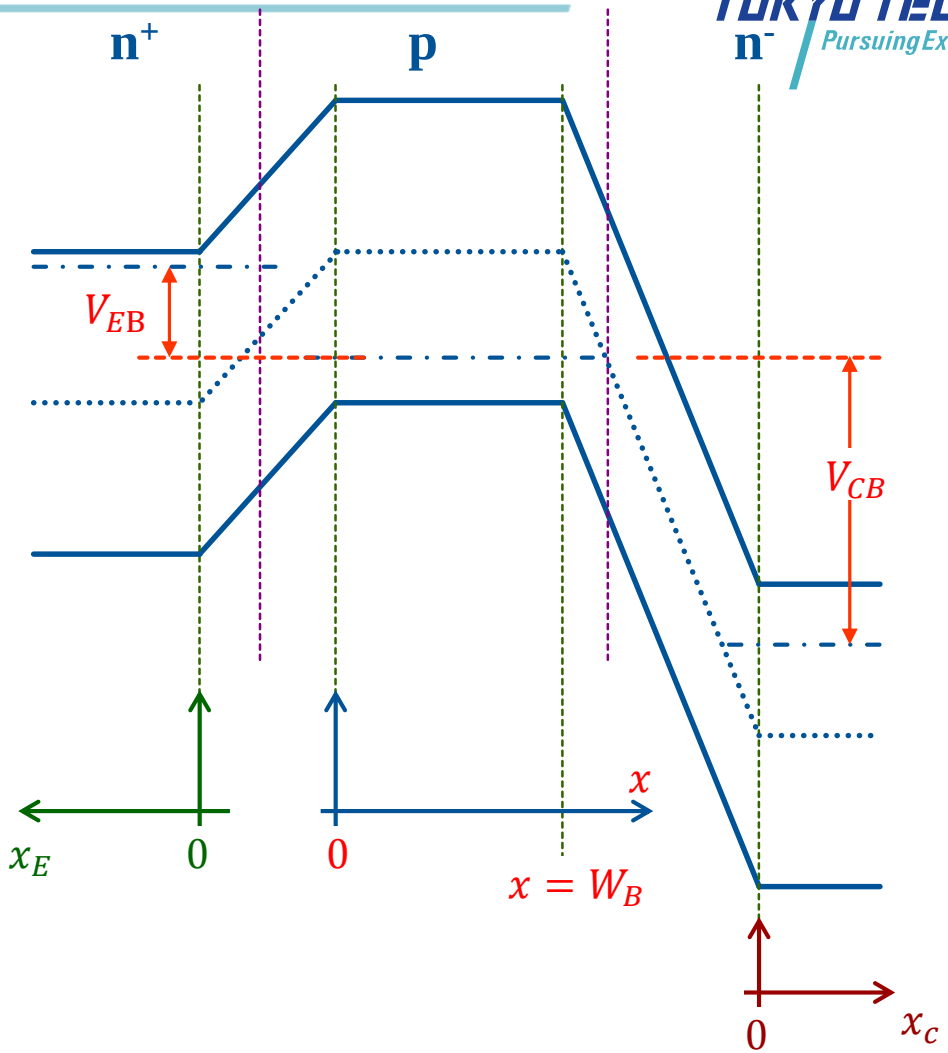
不純物濃度 N_E
多数キャリア（電子）$n_E(x)$
少数キャリア（正孔）$p_E(x)$
熱平衡時の濃度: n_{E0}
熱平衡時の濃度: p_{E0}

不純物濃度 N_B
少数キャリア（電子）$n_B(x)$
多数キャリア（正孔）$p_B(x)$
熱平衡時の濃度: n_{B0}
熱平衡時の濃度: p_{B0}

不純物濃度 N_C
多数キャリア（電子）$n_C(x)$
少数キャリア（正孔）$p_C(x)$
熱平衡時の濃度: n_{C0}
熱平衡時の濃度: p_{C0}

n^+pn^- junction: I-V characteristic

- The continuity and current equations of emitter, base, and collector regions are solved. The boundary conditions are easily inferred from pn junction analysis.
- Axes of each layer are preferred to be defined independently.
- The current between emitter and base is similar to the pn-junction forward analysis.
- The current to collector is the electron that speed the base.



Doping conc. N_E
Majority carrier (elec) $n_E(x)$
Minority carrier (hole) $p_E(x)$
Equilibrium elec conc.: n_{E0}
Equilibrium hole conc.: p_{E0}

Doping conc. N_B
Minority carrier (elec) $n_B(x)$
Majority carrier (hole) $p_B(x)$
Equilibrium elec conc.: n_{B0}
Equilibrium hole conc.: p_{B0}

Doping conc. N_C
Majority carrier (elec) $n_C(x)$
Minority carrier (hole) $p_C(x)$
Equilibrium elec conc.: n_{C0}
Equilibrium hole conc.: p_{C0}

Today's summary

- The bipolar transistor action originates from the small base width.
- バイポーラトランジスタの動作は、ベース幅が小さいことに起因する。
- In n^+pn^- junction transistor, injected electrons from emitter to base flow thru base as diffusion current, and the electrons that reach the collector edge are attracted to the collector by the larger electric field.
- n^+pn^- 接合型トランジスタでは、エミッタからベースに注入された電子はベース領域を拡散電流として突っ切り、コレクタ端に到達した電子は強電界によりコレクタに流れる。
- Current from emitter to collector thru base will be analyzed by solving current equations. The method is similar to the pn junction analysis.

宿題

- npnとn^+pn^-接合について、具体的に下記の数値を入れたときのバンド図を描け。
- ベース幅W_{base}は、0.6μm と仮定せよ。 変更します。
- $W_E, W_{BE}, W_{CE}, W_C,$ $\phi_{E\mathrm{B}}, \phi_{B\mathrm{B}}, \phi_{C\mathrm{B}}$ を求めよ。

提出　4月28日(月)講義終了まで。

- npn接合
  - $N_D(emitter) = 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_A(base) = 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_D(collector) = 10^{16}(cm^{-3})$
- n^+pn^-接合
  - $N_D(emitter) = 10^{20}(cm^{-3})$
  - $N_A(base) = 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_D(collector) = 10^{14}(cm^{-3})$

講義中配付資料を変更します。

宿題

- npnとn^+pn^-接合について、具体的に下記の数値を入れたときのバンド図を描け。
- ベース幅W_{base}は、0.6μmと仮定せよ。
- $W_E, W_{BE}, W_{CE}, W_C,$ $\phi_{E\mathrm{B}}, \phi_{B\mathrm{B}}, \phi_{C\mathrm{B}}$ を求めよ。

提出　４月２８日（月）講義終了まで。

- npn接合
  - $N_D(emitter) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_A(base) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_D(collector) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
- n^+pn^-接合
  - $N_D(emitter) = 1 \times 10^{19}(cm^{-3})$
  - $N_A(base) = 2 \times 10^{16}(cm^{-3})$
  - $N_D(collector) = 1 \times 10^{15}(cm^{-3})$

ドーピング量を上記の値に変更します。