平成25年度前期東京工業大学学部講義

電子デバイス

Electron Devices

資料（８）

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

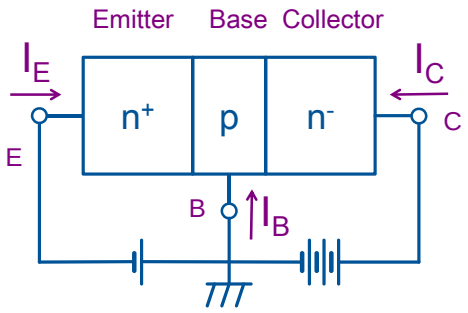
益　一　哉
異種機能集積研究センター
ソリューション研究機構
精密工学研究所
大学院・物理電子システム創造専攻

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

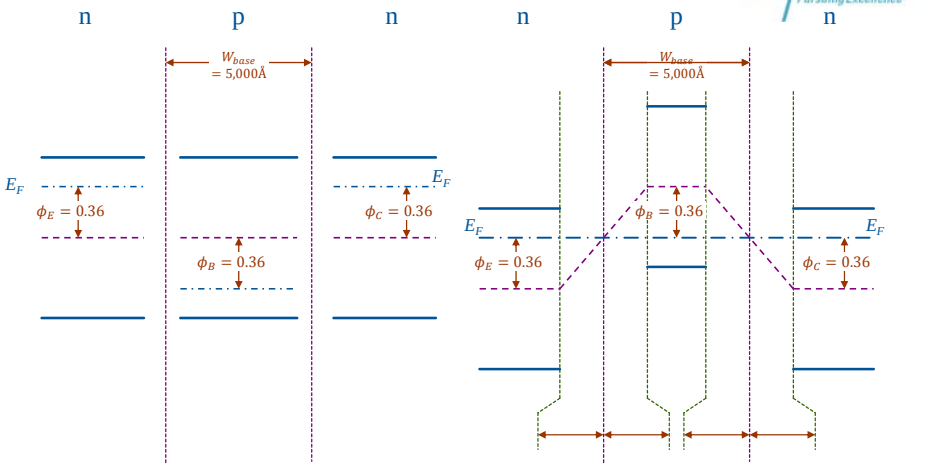
n^+pn^-接合



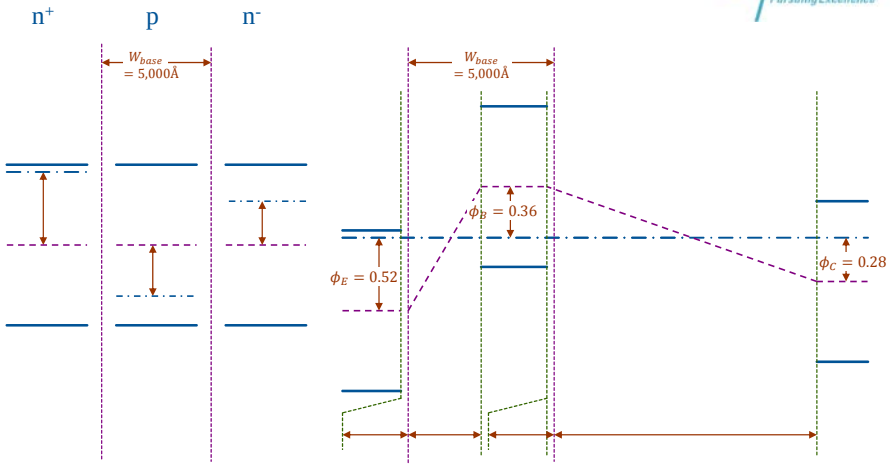
順方向バイアス　　逆方向バイアス

- 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）

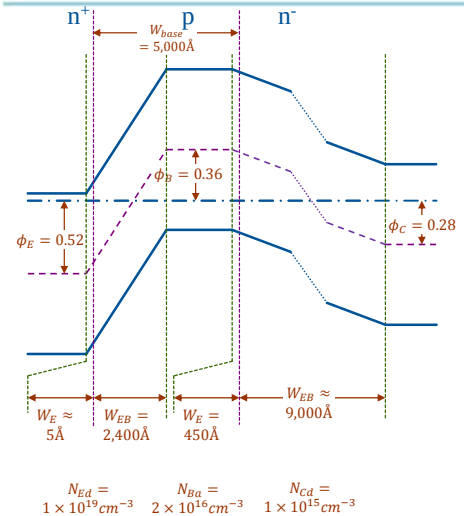


n^+pn^-接合

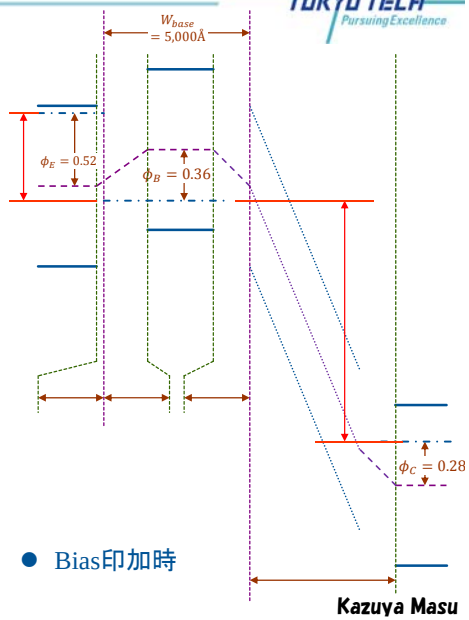


- Zero bias

n⁺pn⁻接合



- Zero bias

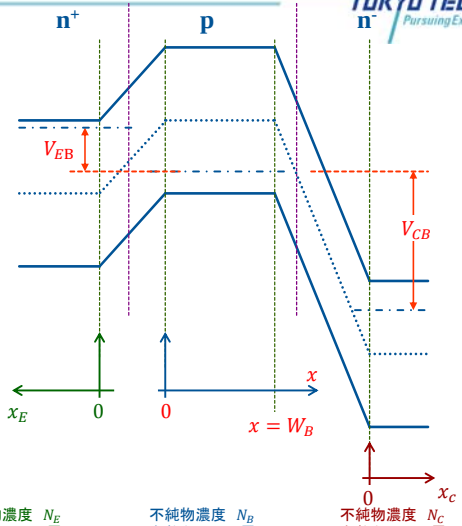


- Bias印加時

Kazuya Masu

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}

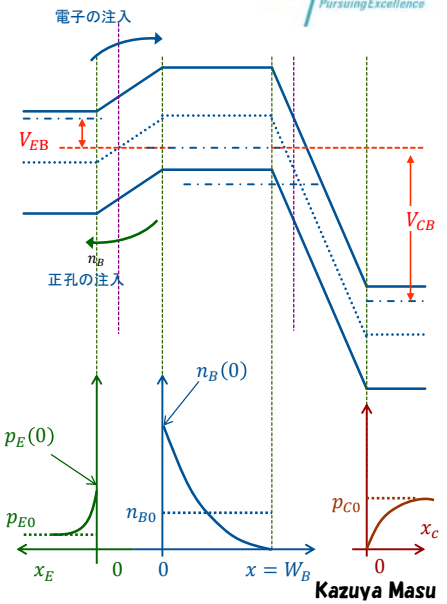
不純物濃度 N_B
多数キャリア(電子) $n_B(x)$
少数キャリア(正孔) $p_B(x)$
熱平衡時の濃度: n_{B0}
熱平衡時の濃度: p_{B0}

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}

Kazuya Masu

n⁺pn⁻接合 電流ー電圧特性

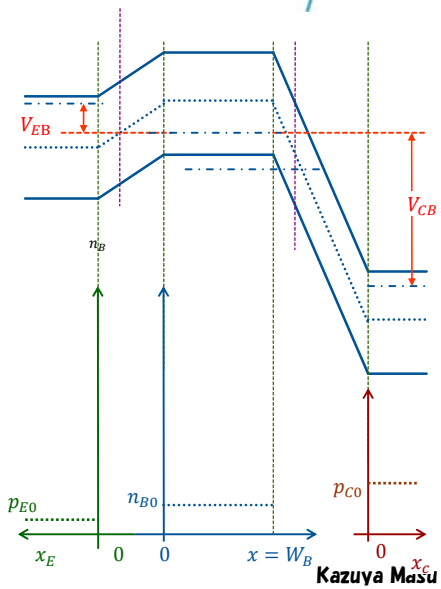
- 解くべき少数キャリアの式($E = 0$)
- 定義(過剰少数キャリア)
- $L = \sqrt{D\tau}$ ：拡散長



Kazuya Masu

n⁺pn⁻接合 電流ー電圧特性

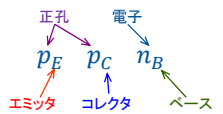
- 境界条件(エミッタ領域)
- 境界条件(ベース領域)
- 境界条件(コレクタ領域)



Kazuya Masu

n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

W :ベース幅
$L_x(x: E, B, C)$:拡散長

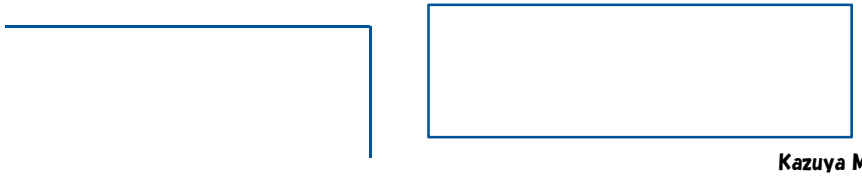


- エミッタ領域（正孔）
- エミッタ領域（電子）
- コレクタ領域（正孔）

n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

- エミッタ領域のキャリア密度
- $W \to \infty$, or $\frac{W}{L_B} \gg 1$ のとき、

$$n_B{}'(x) = \frac{n_B{}'(W) - n_B{}'(0)e^{-\frac{W}{L_B}}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} \cdot e^{+\frac{x}{L_B}} - \frac{n_B{}'(W) - n_B{}'(0)e^{+\frac{W}{L_B}}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} \cdot e^{-\frac{x}{L_B}}$$



n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

- エミッタ／ベース接合の電流

$J_E =$

$=$

$J_E =$

n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

- ベース／コレクタ接合の電流

$J_C =$

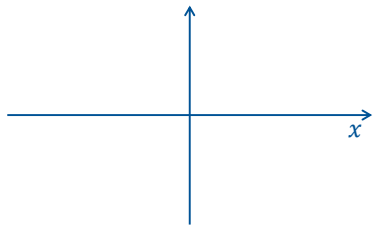
$=$

$J_C =$

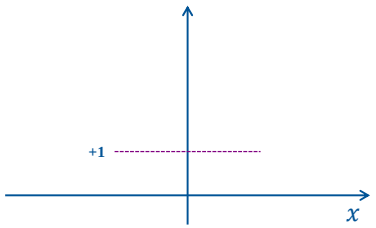
- ベース電流

双曲線関数

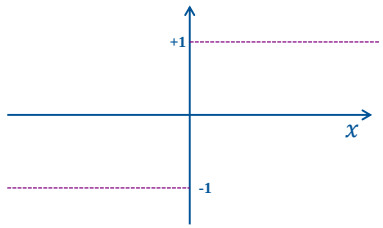
$\sinh x = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \approx x \quad for\ x \ll 1$



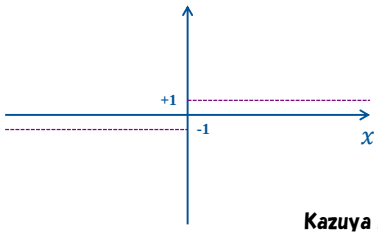
$\cosh x = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \approx 1 + \frac{x^2}{2} \quad for\ x \ll 1$



$\tanh x = \frac{\sinh x}{\cosh x} \approx x \quad for\ x \ll 1$



$\coth x = \frac{\cosh x}{\sinh\ x} \approx \frac{1}{x} \quad for\ x \ll 1$



n⁺pn⁻接合 電流ー電圧特性

- $\frac{W}{L_B} \ll 1$ ベース幅が十分に薄いとき、

$$cosh\left(\frac{W}{L_B}\right) \approx 1, \quad sinh\left(\frac{W}{L_B}\right) \approx \frac{W}{L_B}, \quad coth\left(\frac{W}{L_B}\right) \approx \frac{L_B}{W},$$

$$J_E = q\frac{D_B n_{B0}}{L_B} coth\left(\frac{W}{L_B}\right)\left[\left(e^{\frac{q\,V_{BE}}{kT}} - 1\right) - \frac{1}{cosh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\left(e^{\frac{q\,V_{CB}}{kT}} - 1\right)\right] + q\frac{D_E p_{E0}}{L_E}\left(e^{\frac{q\,V_{BE}}{kT}} - 1\right)$$

$J_E \approx$

n⁺pn⁻接合 電流ー電圧特性

$$J_E \approx q\frac{D_B n_{B0}}{L_B}\frac{L_B}{W}e^{\frac{q\,V_{BE}}{kT}} + q\frac{D_E p_{E0}}{L_E}\left(e^{\frac{q\,V_{BE}}{kT}} - 1\right) \approx q\frac{D_B n_{B0}}{W}e^{\frac{q\,V_{BE}}{kT}}$$

電子電流 J_e　　正孔電流 J_h

J_e/J_hを増加させるためには、

n⁺pn⁻接合 電流ー電圧特性

- $\frac{W}{L_B} \ll 1$ ベース幅が十分に薄いとき、

$$cosh\left(\frac{W}{L_B}\right) \approx 1, \quad sinh\left(\frac{W}{L_B}\right) \approx \frac{W}{L_B}, \quad coth\left(\frac{W}{L_B}\right) \approx \frac{L_B}{W},$$

$$J_C = q\frac{D_B n_{B0}}{L_B}\frac{1}{\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)}\left[\left(e^{\frac{q\,V_{BE}}{kT}} - 1\right) - cosh\left(\frac{W}{L_B}\right)\left(e^{\frac{q\,V_{CB}}{kT}} - 1\right)\right] - q\frac{D_C p_{C0}}{L_C}\left(e^{\frac{q\,V_{CB}}{kT}} - 1\right)$$

$J_C \approx$

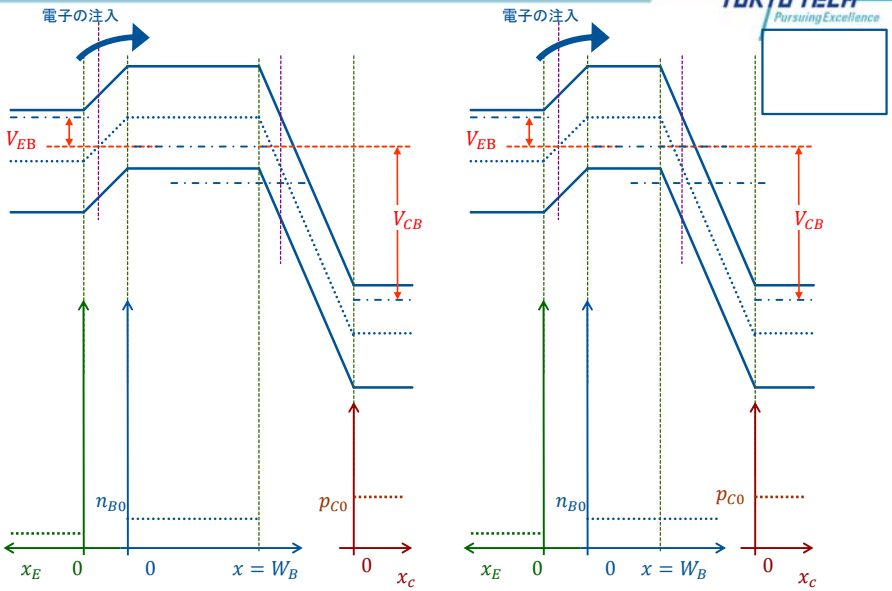
n^+pn^-接合 電流ー電圧特性

- エミッタ領域のキャリア密度 $\frac{W}{L_B} \ll 1$ のとき

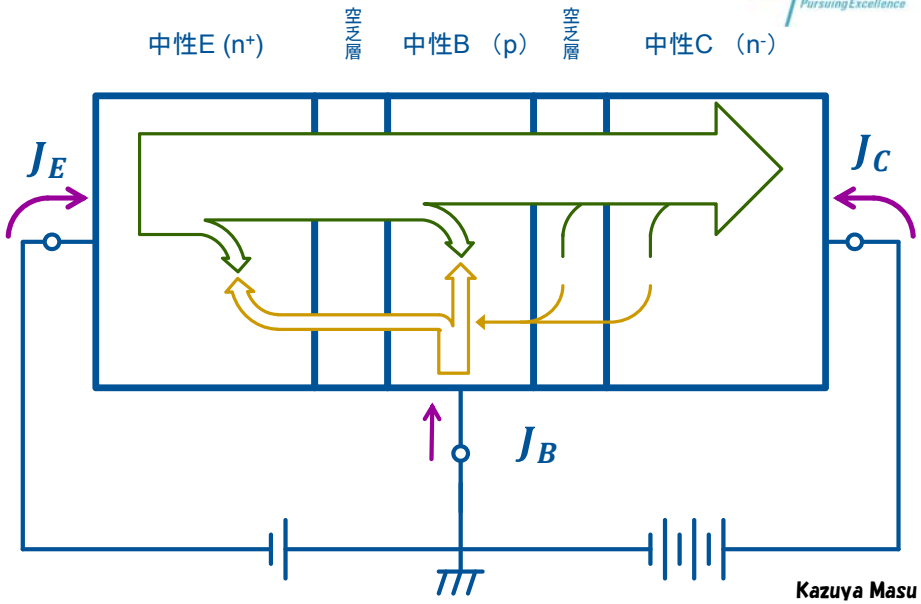
$$n_B{}'(x) = \frac{n_B{}'(W) - n_B{}'(0)e^{-\frac{W}{L_B}}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} \cdot e^{+\frac{x}{L_B}} - \frac{n_B{}'(W) - n_B{}'(0)e^{+\frac{W}{L_B}}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} \cdot e^{-\frac{x}{L_B}}$$

$n_B{}'(x) =$

ベース領域のキャリア分布



n^+pn^-接合 電流の流れ



電流伝送率 $\gamma = \alpha_E \alpha_T \alpha_C$

- α_E : エミッタ注入効率 emitter efficiency
- α_T : ベース輸送効率 base transfer factor
- α_C : コレクタ効率

$\alpha_E =$

$\alpha_E =$

電流伝送率

- α_E :エミッタ注入効率 emitter efficiency
- α_T :ベース輸送効率 base transfer factor
- α_C :コレクタ効率

$\alpha_T =$

$\alpha_T =$

電流伝送率

- コレクタ効率:
- 逆方向の強い電界で、コレクタ空乏層内でなだれ増倍現象が起こる場合がある。通常は降伏電圧より小さな電圧で動作させる。

$$\alpha_C = \frac{J_{eC}}{J_e(x=W)} \approx \frac{1}{1-\left(\frac{V_{CB}}{V_B}\right)^n}$$

J_{eC}:コレクタ内電子電流密度, V_B:降伏電圧

電流伝送率

1. 電流輸送効率を1に近づけるためにはどうすれば良いか？　ドーピング量とベース幅？
2. コレクタ濃度をベースドーピング量より小さくするのは何故か？

宿題

1. エミッタ領域の電子濃度が次式になることを示せ。

$$n_B'(x) = \frac{n_B'(W) - n_B'(0)e^{-\frac{W}{L_B}}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} \cdot e^{+\frac{x}{L_B}} - \frac{n_B'(W) - n_B'(0)e^{+\frac{W}{L_B}}}{2\sinh\left(\frac{W}{L_B}\right)} \cdot e^{-\frac{x}{L_B}}$$

2. エミッタ注入効率（ α_E ）が、次式になることを示せ。

$$\alpha_E = \left[1 + \frac{p_{E0}}{n_{B0}}\frac{D_E}{D_B}\frac{L_B}{L_E}\tanh\left(\frac{W}{L_B}\right)\right]^{-1} \approx 1 - \frac{p_{E0}}{n_{B0}}\frac{D_E}{D_B}\frac{W}{L_E} = 1 - \frac{N_B}{N_E}\frac{D_E}{D_B}\frac{W}{L_E}$$

提出は、7月9日（月）講義終了まで。メイルで送付しても可。手書きの場合はスキャナでとりpdfとすること。