

# 実験レポート

2024 年度

電気電子情報工学実験Ⅱ,Ⅲ(a)

学籍番号 22221280

氏名 渡辺悠斗

実験番号 1

実験題目 トランジスタの物性とhパラメータ

実験班 J

共同実験者

山崎 大輔、大平 日向

実験日 5月21日、5月28日

提出締切日 6月11日

提出日 6月11日

チェック欄			点数
合 ・ 否	合 ・ 否	合 ・ 否	
月 日	月 日	月 日	

## 1.目的

接合型トランジスタ（またはバイポーラトランジスタとも呼ばれる）は PNP または NPN 型のサンドイッチ型接合を作ることによって構成される。接合型トランジスタの動作原理は、PN 接合の理解の上になんて説明できる。本実験の前半では、トランジスタのエミッターベース間における PN 接合の電流電圧特性、エミッタ接地回路における PNP 接合型トランジスタの出力特性を測定する。後半ではエミッタ接地回路における PNP 接合型トランジスタについて  $h$  パラメータを測定し、特に  $h$  パラメータ要素である  $h_{21}$  が周波数とともに減少する様子について観察する。また、PNP 接合型トランジスタの静特性を記述する少数キャリアの連続の方程式から出発して、エミッタ接合を流れる正孔電流  $J_{pe}$ （エミッタ電流に対応）とコレクタ接合を流れる正孔電流  $J_{pc}$ （コレクタ電流に対応）の表式を求める。また、求めた電流式を用いてベース輸送効率の簡単化された表式を導出する。

## 2.原理

接合型トランジスタには PNP および NPN 型がある。回路記号はそれぞれ図 1 のように表される。以下では、例として PNP 型について説明するが、NPN 型の場合は、キャリアの正負（正孔⇔電子）、バイアス電圧の正負を反対にするだけで動作の原理は同様に考えてよい。

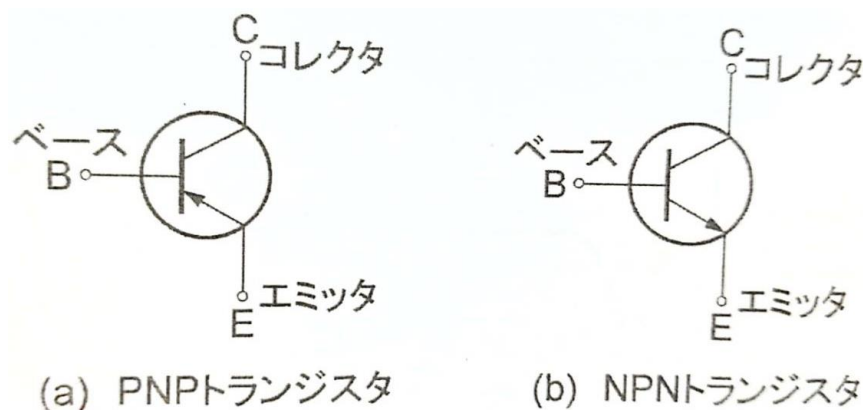


図 1. 接合型トランジスタの回路記号

PNP 接合型トランジスタは、不純物濃度の大きい P 型半導体（エミッタ：E）、不純物濃度の少ない N 型半導体（ベース：B）、および不純物濃度の少ない P 型半導体（コレクタ：C）を接合させたもので、図 2 に示すようにバイアス電圧を印加して使用する（エミッタ接地回路）。エミッタ接地回路では B-E 間に順方向バイアス電圧を、C-E 間に逆方向バイアス電圧を印加しておき、B-E 間に交流入力信号を加え、C-E 間に

接続した負荷を介してその交流出力を取り出す。B-E間は順方向にバイアスされているため、E領域の高濃度の正孔がベースに注入されるが、B領域の電子密度が低いいため、ベースに注入された正孔は電子とほとんど再結合せず、B-C接合部に到達し、コレクタ側の負電圧によって加速されC領域に流れ込む。この様子をエネルギーバンド図を用いて表すと図3のようになる。図3(a)はバイアス電圧を印加しないときのバンド図、図3(b)は図2に示したバイアス電圧を印加したときのバンド図に対応する。E領域からB領域に注入される正孔による交流電流は、ほとんどそのままの大きさに出力側(C領域)に伝送されることになる。このとき、E-B間は順方向にバイアスされ、C-E間（正しくはC-B間）は逆方向にバイアスされているため、入力インピーダンスが低く出力インピーダンスが高くなる。この入出力のインピーダンスの関係から電力増幅が行われることになる。以上が接合型トランジスタの動作の概略であるが、B領域での少数キャリアである正孔の輸送時間、B領域の多数キャリアである電子のE領域への注入、逆バイアスされたC-B間を通過する正孔によるキャリア増倍効果、なども接合型トランジスタの動作に重要な影響を与える。詳細については、「電子デバイス」の講義で取り扱う。

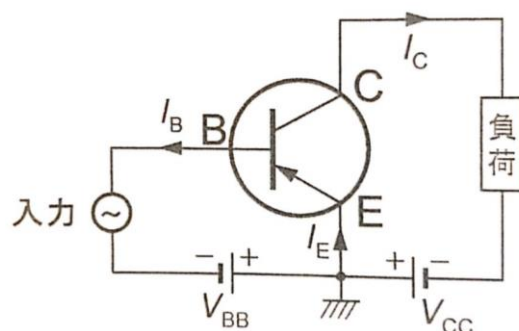


図2.PNP 接合型トランジスタのエミッタ接地回路

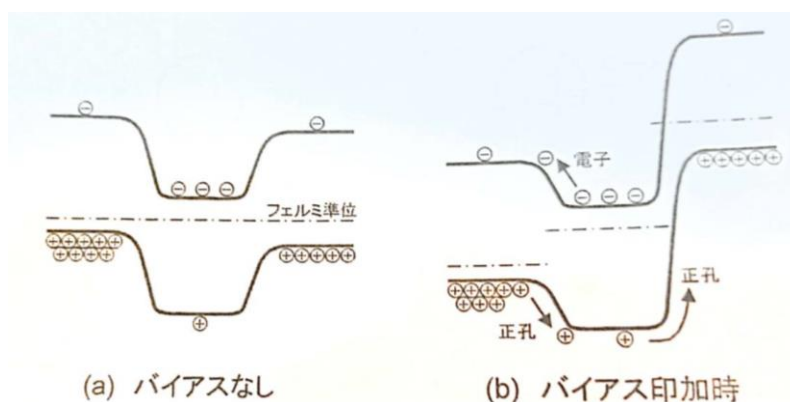


図3. PNP トランジスタのエネルギーバンド図

### 3.実験方法

#### (1)直流特性( $I_B - V_{BE}$ )の測定

$I_B = 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150 \mu A$ となるように $V_{BE}$ を調整し、縦軸に $I_B$ 、横軸に $V_{BE}$ を図示せよ。(線形プロット)

注意:  $V_{BE}$ は負になるが、図の表示では符号を省略してもよい。

#### (2)直流特性( $I_C - V_{CE}$ )の測定

$V_{CE}$ を各点( $=0.25, 1, 2, 5, 10V$ )で一定とし、 $I_B$ をパラメータとして、 $25, 50, 75, 100, 125, 150 \mu A$ に変化させたときの $I_C$ を測定する。縦軸に $I_C$ 、横軸に $V_{CE}$ を図示せよ。(線形プロット)

注意:  $V_{CE}$ は負になるが、図の表示では符号を省略してもよい。

#### (3)交流特性(h パラメータ)の測定 $V_{CE} = -5V$ (一定)、周波数 $=100kHz$ (一定)として、 $I_C = 1, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30mA$ の各点で h パラメータを測定する。縦軸に h パラメータ(対数表示)を、横軸に $I_C$ を図示せよ。(両対数プロット)

注意:  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ の測定では、出力側を交流的に短絡( $v_2=0$ )し、 $i_1=10 \mu A$ を入力せよ。 $h_{12}$ ,  $h_{22}$ の測定では、出力側を交流的に短絡( $i_1=0$ )し、 $v_2=50mA$ を入力せよ。

#### (4)h パラメータ( $h_{21}$ )の周波数特性の測定

$V_{CE} = -5V$ (一定)、 $I_C = 10mA$ (一定)、 $i_1 = 10 \mu A$ (一定)とし、 $h_{21}$ の周波数依存性( $50, 100, 200, 300, 400, 500, 600, 800, 1000, 1500, 2000kHz$ )を測定する。縦軸に $h_{21}$ 、横軸に周波数を図示せよ。(両対数プロット)

### 4.実験器具

名称	型番
直流安定化電源	METRONIX MTR3505
マルチファンクションジェネレーター	WAVE FACTORY
デジタルマルチメーター	Agilent 34405A

## 5. 実験結果

実験 1 の測定結果を表 1 に表す。

表 1. 実験結果 1 の測定結果

$I_B$	$V_{BE}(V)$
5	0.43
10	0.49
20	0.54
30	0.55
40	0.56
50	0.57
60	0.58
70	0.585
80	0.59
90	0.595
100	0.6
110	0.604
120	0.607
130	0.609
140	0.611
150	0.613

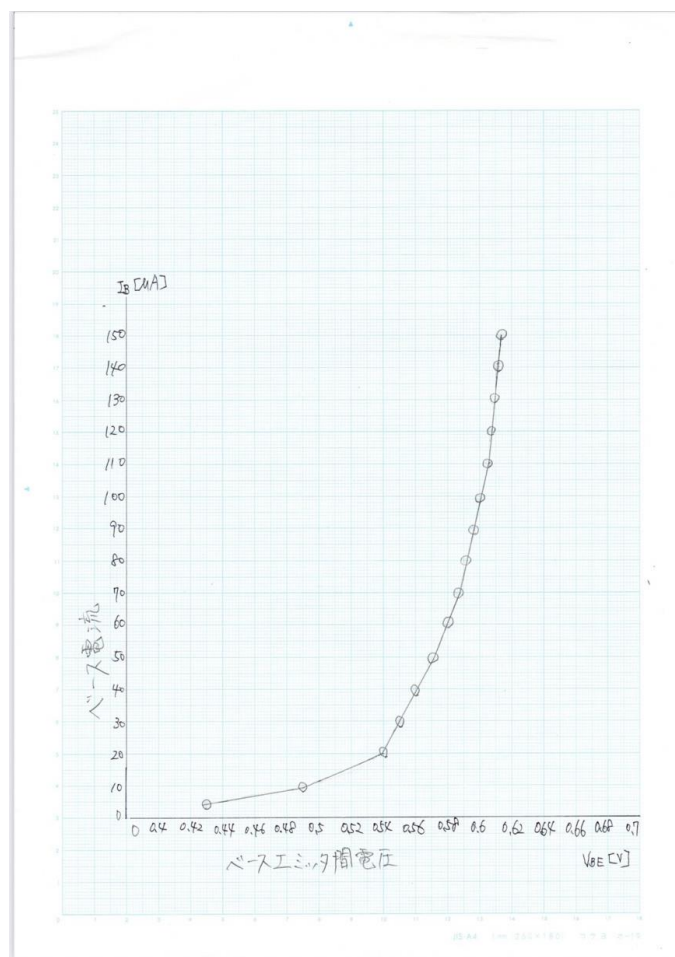


図 4. 実験 1 の測定結果 ( $I_B - V_{BE}$  グラフ)

また、実験結果をそれぞれ縦軸を  $I_B$ 、横軸を  $V_{BE}$  としプロットしたグラフを図 4 に示す。

実験 2 の測定結果を表 2 に示す。

表2. 実験2の測定結果

$V_{CE}$	$I_C(\text{mA})$					
	$I_B=25(\mu\text{A})$	$50(\mu\text{A})$	$75(\mu\text{A})$	$100(\mu\text{A})$	$125(\mu\text{A})$	$150(\mu\text{A})$
0.25	2.18	3.538	4.468	5.38	6.03	6.64
1	2.66	5.61	8.26	9.82	11.04	11.77
2	2.73	5.88	8.93	12.03	14.85	16.9
5	2.82	6.03	9.2	12.87	16.07	19.45
10	2.95	6.37	10.07	13.95	17.08	21.56

また実験結果を縦軸、横軸を とし、プロットしたグラフを図5に示す。

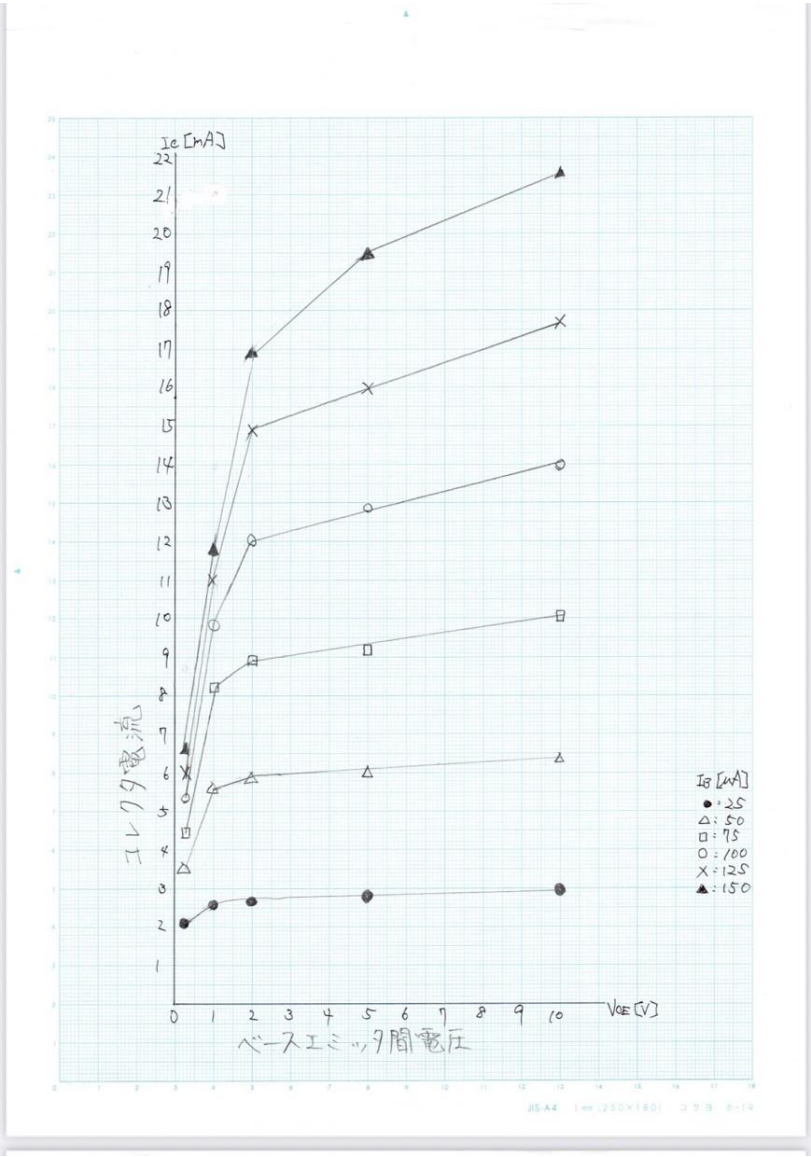


図5. 実験2の測定結果 ( $I_C - V_{CE}$  グラフ)

実験 3 の測定結果を以下の表 3 に表す。

表 3. 実験 3 の測定結果 ( $V_{CE} = 5V, i_1 = 10\mu A, v_2 = 50mV$ )

$I_C[mA]$	$h_{11}(=v_1/i_1)$	$h_{21}(=i_2/i_1)$	$h_{12}(=v_1/v_2)$	$h_{22}(=i_2/v_2)$
1	4154	105.6	0.1951	0.00146
2	2420	143.5	0.1027	0.00148
4	919	122.8	0.0595	0.00158
6	648	127.1	0.0471	0.0016
8	503	127.3	0.043	0.0016
10	419.5	128.2	0.0386	0.0016

また、実験結果をそれぞれ縦軸を  $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ,  $h_{12}$ ,  $h_{22}$ 、横軸を  $I_C$  にプロットしたグラフを図 6 に示す。

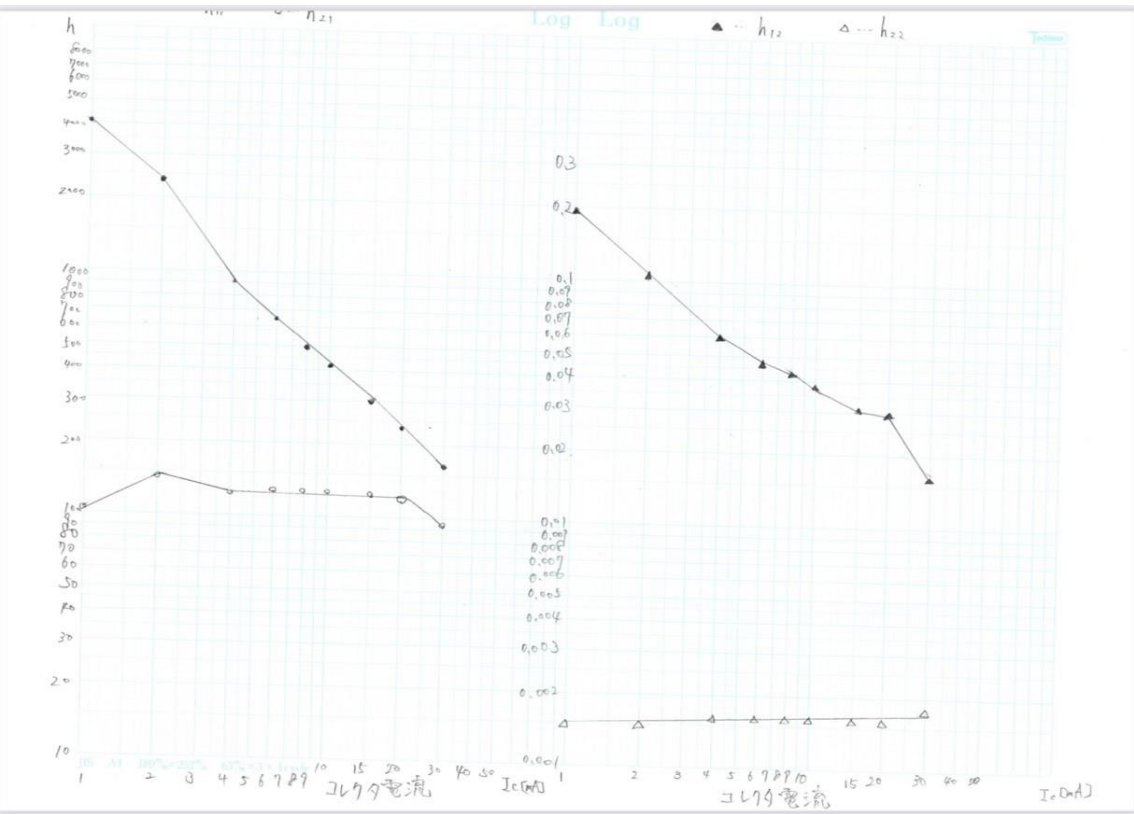


図 6. 実験 3 の測定結果 ( $h$  パラメータのコレクタ電流依存性)



実験 4 の測定結果を表 4 に表す。

表 4．実験 4 の測定結果 ( $i_1 = 10\mu A$ )

周波数[kHz]	$h_{21}$
50	131.3
100	130.25
200	130.4
300	132.3
400	132.4
500	129.9
600	126
800	121.5
1000	109.6
1500	0.693
2000	0.128

また、測定結果をそれぞれ縦軸を $h_{21}$ 、横軸を周波数としてプロットしたグラフを図 7 に示す。

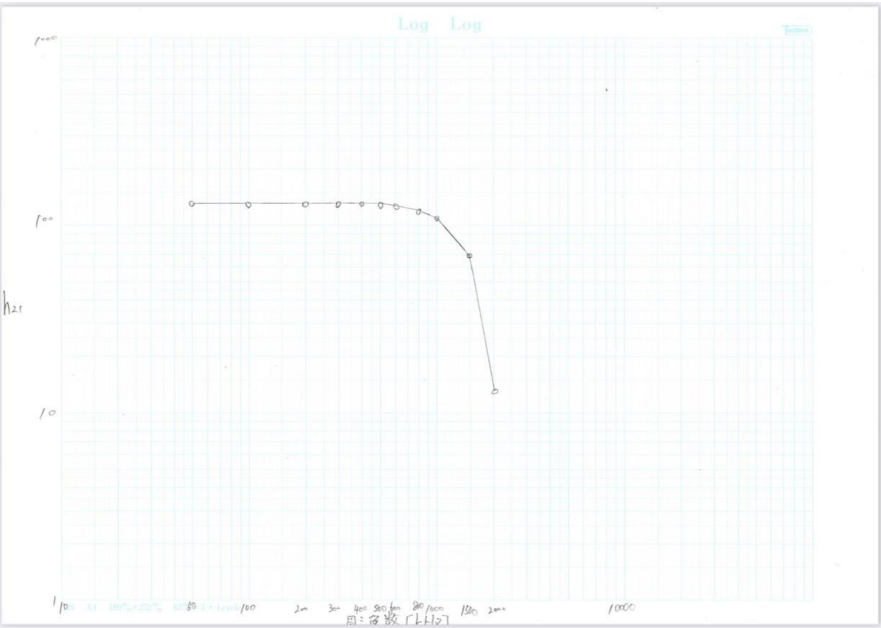


図 7．実験 4 の測定結果 ( $h_{21}$  の周波数特性)



# レポート課題

1. 図4参照    2. 図5参照    3. 図6参照    4. 図7参照    5, 6 下図

$P_p$  は正孔の拡散係数  
 $L_p$  は正孔の寿命

レポート課題5, 6

ベースに与えられた正孔の連続式は  $\frac{\partial P}{\partial t} = D_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{P - P_{no}}{\tau_p}$

また定常状態であると  $\frac{\partial P}{\partial t} = 0$  より  $D_p \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} - \frac{P - P_{no}}{\tau_p} = 0 \Rightarrow \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{P - P_{no}}{L_p^2}$

この方程式の一般解は、  
 $P - P_{no} = C_1 e^{\frac{x}{L_p}} + C_2 e^{-\frac{x}{L_p}}$ 
 $L_p$  : 正孔の拡散長  
 $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$

境界条件  $x=0$  で  $P = P_e = P_{no} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}}$  ... ②

$x = W_0$  で  $P = P_c = P_{no} e^{\frac{eV_{CB}}{kT}}$  ... ③

②, ③を①に代入し、  
 $C_1 = \frac{1}{2 \sinh(\frac{W_0}{L_p})} [-(P_e - P_{no}) e^{-\frac{W_0}{L_p}} + (P_c - P_{no})]$  ... ④

$C_2 = \frac{1}{2 \sinh(\frac{W_0}{L_p})} [(P_c - P_{no}) e^{\frac{W_0}{L_p}} - (P_e - P_{no})]$  ... ⑤

④, ⑤を①に代入し整理すると  
 $P_e - P_{no} = (P_e - P_{no}) (e^{\frac{W_0}{L_p}} - e^{-\frac{W_0}{L_p}}) + (P_c - P_{no}) (e^{\frac{W_0}{L_p}} - e^{-\frac{W_0}{L_p}})$   
 $\Rightarrow P_e = \frac{(P_c - P_{no}) \sinh(\frac{W_0}{L_p})}{1 - \sinh(\frac{W_0}{L_p})} + P_{no}$

同様に、  
 $P_c = \frac{(P_e - P_{no}) \sinh(\frac{W_0}{L_p})}{1 - \sinh(\frac{W_0}{L_p})} + P_{no}$

よって  $J_{Pe} = -e D_p \left. \frac{\partial P_e}{\partial x} \right|_{x=0} \cong \frac{e P_p P_{no}}{L_p} e^{\frac{eV_{EB}}{kT}} \times \tanh\left(\frac{W_0}{L_p}\right)$

$J_{Pc} = -e D_p \left. \frac{\partial P_c}{\partial x} \right|_{x=W_0} \cong \frac{e P_p P_{no}}{L_p} e^{\frac{eV_{CB}}{kT}} \frac{1}{\sinh(\frac{W_0}{L_p})}$

レポート課題6

また、ベース輸送効率  $\alpha_T = \frac{J_{Pc}}{J_{Pe}}$

$\alpha_T = \frac{J_{Pc}}{J_{Pe}} = \frac{1}{\cosh(\frac{W_0}{L_p})}$      $2700 - 7 > 2700$  より、

$\cosh x = 1 + 0 + \frac{x^2}{2} + 0 + \frac{x^4}{24} + \dots$     今回は  $(\frac{W_0}{L_p}) < 1$  より、  
 $\cosh(\frac{W_0}{L_p}) \cong 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{L_p}\right)^2$     また、 $\alpha_T = \cosh(\frac{W_0}{L_p}) \cong \{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{L_p}\right)^2\}^{-1}$

よって  $\alpha_T \cong 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{W_0}{L_p}\right)^2$  と近似できる。

参考文献：指導書、

「半導体工学 第3版・新装版：半導体物性の基礎」：高橋清・山田陽一 共著