

1 目的

電子回路を構成する基本的な非線形回路素子であるトランジスタ (バイポーラ接合トランジスタ) の静特性の測定を行い、初歩的な動作原理とその特性の非線形を理解する。また、実測した静特性からトランジスタのモデルパラメータ抽出を行い、非線形素子の回路シミュレーション方法を習得する。

2 理論

2.1 トランジスタ

トランジスタには、大規模集積回路 (LSI) の素子として広く利用されている MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET)、電子回路の増幅素子や TTL インバータとして用いられるバイポーラ接合トランジスタ (BJT) などがある。この実験ではバイポーラ接合トランジスタを用いて、その非線形特性を習得する。ここでは、バイポーラ接合トランジスタを単にトランジスタと呼ぶ。トランジスタは、p 型シリコン層を n 型シリコン層ではさんだ構造をした npn 接合トランジスタと、n 型シリコン層を p 型シリコン層ではさんだ構造をした pnp 接合トランジスタがある。トランジスタは 3 端子の素子であり、端子はそれぞれ、エミッタ (E)、コレクタ (C)、ベース (B) と呼ばれる。npn 型トランジスタの回路記号と端子名、電圧の取り方を図 1 に示す。同図の記号で丸を書かないトランジスタの回路記号を用いることもある。

図 1: npn 型トランジスタの回路記号

2.2 トランジスタの直流等価回路

トランジスタの大振幅での直流等価回路を図 2 に示す。この等価回路はエバースモル (Ebers-Moll) モデルと呼ばれ、トランジスタの物理的な性質をよ

図 2: npn 型トランジスタの直流等価回路

く現しており、理論的な解析によく用いられる。この等価回路は、ベース-コレクタ間のダイオードと電流源およびベース-エミッタ間のダイオードと電流源からなる。ベースは、トランジスタの内部抵抗であるベース抵抗 R_b を介してベース端子と接続している。ここでは、コレクタ抵抗とエミッタ抵抗は無視している。ほとんどのトランジスタ回路では、エミッタ設置抵抗回路、すなわち、エミッタを共通端子として、ベースを入力、コレクタを出力端子として用いる (図 3)。

図 3: エミッタ設置回路

2.3 ベース入力特性

エミッタ接地回路でのベース入力電圧特性を図 4 に示す。

図 4: $I_B - V_{BE}$ 特性

このベース電圧-電流特性は次式で近似できる。

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (1)$$

ここで、 β_F はエミッタ設置電流増幅率、 I_S はダイオード接合の飽和電流、 $V_T = \frac{k_B T}{e}$ 、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度、 e は電気素量である。ここで、トランジスタ内部のベース抵抗 R_b は無視している。

2.4 コレクタ出力

エミッタ接地回路でのコレクタ出力電圧-電流特性を図 5 に示す。
コレクタ電流は近似的に次式で表せる。

$$I_C = I_S e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (2)$$

ただし、コレクタ抵抗およびアーリー効果は無視している。ベース電流とコレクタ電流との関係は、

$$I_C = \beta_F I_B \quad (3)$$

図 5: $I_C - V_{CE}$ 特性

と近似できる。すなわち、コレクタ電流 I_C はベース電流 I_B に比例し、その比例定数がエミッタ接地電流増幅率 β_F である。

3 実験

3.1 実験手順

ベース入力測定 ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} を変化させながら、ベース電流 I_B を測定する。

コレクタ出力 ベース電流 I_B が一定になるように調整しながら、コレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} を変化させ、コレクタ電流 I_C を測定する。

モデルパラメータ抽出

1. $I_C - V_{CE}$ 特性の測定結果から β_F を求める。
2. $I_B - V_{BE}$ 特性の測定結果から R_b を求める。
3. $I_B - V_{BE}$ 特性の測定結果から I_S を求める。
4. 上で求めた β_F 、 R_b 、 I_S を用いて、 $I_S - V_{BE}$ 特性のシミュレーションと実測を比較して、 I_S を修正する。

3.2 ベース入力測定

ベース入力測定の回路図を図 6 に示す。

図 6: ベース入力特性測定の回路図

1. 安定化電源の電圧は 10V に設定する。
2. 測定治具のスイッチを $R_B = 100\Omega$ にする。
3. 測定治具の可変抵抗 I_{CADJ} を調節して、コレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} を 1.5V 程度に調整する。一度合わせたらそのままよい。
4. 測定治具の可変抵抗 I_{BADJ} を調整して、ベース-エミッタ間電圧 V_{BE} を変化させ、ベース電流 I_B を測定する。(通常方眼紙を使用)(図 4)
5. 測定治具のスイッチを $R_B = 10K\Omega$ にする。
6. 測定治具の可変抵抗 I_{BADJ} を調整して、ベースエミッタ間電圧 V_{BE} を変化させ、ベース電流 I_B を測定する。(片対数方眼紙を使用)(図 7)

注意

ベース電流 I_B は 30mA を超えないように注意する。
グラフをプロットしながら測定する。

図 7: $I_B - V_{BE}$ 特性 (片対数)

3.3 コレクタ出力特性

コレクタ出力特性測定回路図を図 8 に示す。

1. 安定化電源の電圧は 10V に設定する。
 2. 測定治具のスイッチを $R_B = 10k\Omega$ にする。
 3. 測定治具の可変抵抗 I_{BADJ} を調節して、ベース電流 I_B を $10\mu A$ に調整する。
 4. 測定治具の可変抵抗 I_{CADJ} を調整して、コレクタ-エミッタ間電圧 V_{CE} を変化させて、コレクタ電流 I_C を測定する。(通常方眼紙を使用)
 5. ベース電流 I_B を 20、 $30\mu A$ にして、それぞれ、コレクタ電流 I_C を測定する。(図 5)
- 測定できないなら、15、 $20\mu A$ で測定する。

注意

ベース電流 I_B を一定に保つため、測定中は可変抵抗 I_{BADJ} と I_{CADJ} を調整する必要がある。

3.4 モデルパラメータ抽出

β_F の求め方

$I_C - V_{CE}$ 特性 (図 5) の結果から手計算で求める。

$$\beta_F = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} \quad (4)$$

図 8: コレクタ出力測定回路図

例:測定で I_B を $10\mu A$ ずつ増加させたとして、 I_C が $1mA$ ずつ増加していた場合、 $1mA/10\mu A = 100$ と求める。

R_b の求め方

方眼紙にプロットした $I_B - V_{BE}$ 特性の測定結果 (図 4) から手計算で求める。I-V 曲線は、ベース抵抗 R_b によって決まる傾きのある直線状となるので、この傾きからベース抵抗を推測する。

I_S の求め方

片対数方眼紙にプロットした $I_B - V_{BE}$ 特性の測定結果 (図 4) から手計算で求める。測定値が直線的になる部分を外挿し、外挿線の I_B 切片と、図 5 で求めた β_F から計算する。

(補足)

ベース電圧-電流特性を (1) 式で近似する。

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} e^{\frac{V_{BE}}{V_T}} \quad (5)$$

(5) 式の両辺に対して常用対数をとると、

$$\log_{10} I_B = \frac{1}{V_T \log_e 10} \cdot V_{BE} + \log_{10} \left(\frac{I_S}{\beta_F} \right) \quad (6)$$

(6) 式より、 I_B 特性は対数方眼紙上で直線状に表され、その切片は $\frac{I_S}{\beta_F}$ となる。

4 結果

$I_C - V_{CE}$ 特性の測定結果を図 9 に示す。 β_F は、3V の点を見て、

$$\begin{aligned}\beta_{F1} &= \frac{(6.60 - 4.80) \times 10^{-3}}{(20 - 15) \times 10^{-6}} \\ &= 0.32 \times 10^3 \\ \beta_{F2} &= \frac{(4.80 - 3.38) \times 10^{-3}}{(15 - 10) \times 10^{-6}} \\ &= 0.28 \times 10^3 \\ \beta_{F3} &= \frac{(6.60 - 3.38) \times 10^{-3}}{(20 - 10) \times 10^{-6}} \\ &= 0.30 \times 10^3\end{aligned}$$

$I_B - V_{BE}$ 特性 ($R_B = 100\Omega$) の測定結果を図 10 に示す。傾きから、 R_b は

$$\begin{aligned}R_b &= \frac{0.850 - 0.840}{(27.72 - 22.46) \times 10^{-3}} \\ &= 1.90[\Omega]\end{aligned}$$

$I_B - V_{BE}$ 特性 ($R_B = 10k\Omega$) の測定結果を図 11 に示す。図に示すとおり、
の切片は $10^{-15}[\text{mA}]$ 、 の切片は $7 \times 10^{-16}[\text{mA}]$ 、 の切片は $10^{-48}[\text{mA}]$
である。

5 考察

$I_B - V_{BE}$ 特性について、室温を 300K と仮定し

$$\begin{aligned} V_T &= \frac{1.38 \times 10^{-23} \cdot 300}{1.60 \times 10^{-19}} \\ &= 0.0259[\text{V}] \end{aligned}$$

I_S/β_F が、 $10^{-15}[\text{mA}]$ の時

$$I_S = 10^{-15} e^{\frac{V_{BE}}{0.0259}}$$

のグラフを図 12 に、

$7 \times 10^{-16}[\text{mA}]$ の時

$$I_S = 7 \times 10^{-16} e^{\frac{V_{BE}}{0.0259}}$$

のグラフを図 13 に、

$10^{-48}[\text{mA}]$ の時

$$I_S = 10^{-48} e^{\frac{V_{BE}}{0.0259}}$$

のグラフを図 14 に示す。

これより、最も測定に近いのは $I_S/\beta_F = 10^{-15}$ の時である。ゆえ、

$$\begin{aligned} I_S &= 10^{-15} \cdot 0.30 \times 10^3 \\ &= 0.30 \times 10^{-12} \end{aligned}$$

また、図 9 において、 $\beta_F = \frac{\partial I_C}{\partial I_B}$ の値が一定でないのは、注意を無視して、可変抵抗 I_{BADJ} を初めしか調整しなかったためであると思われる。

図 12: $I_S/\beta_F = 10^{-15}$ の時の $I_B - V_{BE}$

図 13: $I_S/\beta_F = 7 \times 10^{-16}$ の時の $I_B - V_{BE}$

図 14: $I_S/\beta_F = 10^{-48}$ の時の $I_B - V_{BE}$