

PSPICE 用非線形動作トランジスタ パラメータの抽出

苦米地 宣 裕

Extraction of Non-Linear Transister Parameters for PSPICE

Nobuhiro TOMABECHI

Abstract

This paper presents the extracting method of bipolar transistor parameters in non-linear operation which are needed for the electronic circuit simulation using PSPICE. The extracting program is developed based on the presented method. The parameters of several kind of transistors are successfully extracted using the program.

1. ま え が き

最近開発されたパソコン上で使用できる電子回路解析プログラム PSPICE¹⁾は、回路設計技術者にとって有用な設計支援ツールとして期待されている。PSPICE では、トランジスタ・ダイオードなどのデバイスについては、それらの動作式が組み込まれていて、精度の高いシミュレーションが可能となっている²⁾。しかし、その反面、この動作式の記述に必要なデバイスパラメータをどのようにして求めるのかという問題も生ずる。PSPICE には、デバイスパラメータ抽出ソフト：PARTS が、別売の形で提供されているが、入力データの個数が、求めるパラメータの個数より少ないなど、抽出したパラメータの精度に疑問があるようである。

本研究者は、すでに、バイポーラトランジスタの高周波増幅に寄与するパラメータを S パラメータの測定値から抽出する方法を明らかにした³⁾。本研究では、バイポーラトランジスタの

B 級増幅のような非線形動作をとり上げ、その動作に寄与するトランジスタパラメータを V-I 特性から求める方法を検討した。その結果、トランジスタパラメータを求める適切な手順が存在することを明らかにした。次に、求めた方法に基づいて、トランジスタパラメータを抽出するプログラムを作成した。作成したプログラムを用いて、数種類のタイプの異なるトランジスタについてパラメータ抽出を試みた。その結果、良好に抽出できることを確認した。

2. PSPICE のバイポーラトランジスタ モデル

PSPICE においては、バイポーラトランジスタのモデルとして、Gummel-Poon のモデル²⁾が用いられている。図 1 に本モデルに基づくトランジスタの等価回路を示している。また、付録に、PSPICE で用いるトランジスタパラメータの一覧表を示している。本モデルにおいて、ベース電流 I_b 、コレクタ電流 I_c は、真性ベース-エミッタ間電圧を V_{be} 、真性ベース-コレクタ間電圧を V_{bc} とすると、次のように表わされ

平成 4 年 12 月 15 日受理
電気工学科教授

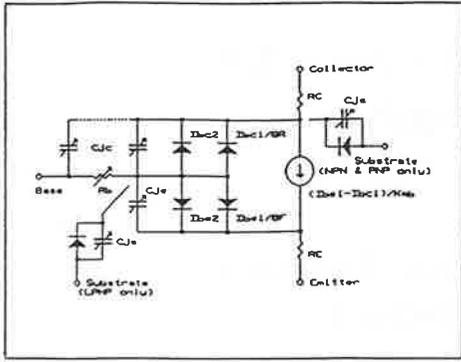


図1 バイポーラトランジスタモデル

る^{2,4)}。

$$I_b = I_{be1}/BF + I_{be2} + I_{bc1}/BR + I_{bc2} \quad (1)$$

$$I_c = I_{be1}/Kqb - I_{bc1}/Kqb - I_{bc1}/BR - I_{bc2} \quad (2)$$

ただし、

$$I_{be1} = \text{順方向拡散電流} = IS (\exp(V_{be}/(NFVt)) - 1) \quad (3)$$

$$I_{be2} = b-e \text{電流の非理想値} = ISE (\exp(V_{be}/(NEVt)) - 1) \quad (4)$$

$$I_{bc1} = \text{逆方向拡散電流} = IS (\exp(V_{bc}/(NRVt)) - 1) \quad (5)$$

$$I_{bc2} = b-c \text{電流の非理想値} = ISC (\exp(V_{bc}/(NCVt)) - 1) \quad (6)$$

$$Kq1 = \text{ベースチャージファクタ} = Kq1 (1 + (1 + 4Kq2)^{1/2}) / 2 \quad (7)$$

$$Kq1 = 1 / (1 - V_{bc}/VAF - V_{be}/VAR) \quad (8)$$

$$Kq2 = I_{be1}/IK + I_{bc1}/IKR \quad (9)$$

- Vt : 熱起電圧 = kT/q
- BF : 順方向ベータの理想値
- BR : 逆方向ベータの理想値
- IS : B-E間 p-n 接合飽和電流
- NF : 理想 B-E 間ダイオード放出係数
- ISE : 非理想 B-E 間 p-n 接合飽和電流
- NE : 非理想 B-E 間ダイオード放出係

表1 非線形動作に寄与するトランジスタパラメータ

パラメータ	意味
BF	順方向ベータの理想値
BR	逆方向ベータの理想値
IS	B-E 間 p-n 接合飽和電流
NF	理想 B-E 間ダイオード放出係数
ISE	非理想 B-E 間 p-n 接合飽和電流
NE	非理想 B-E 間ダイオード放出係数
NR	逆方向電流エミッション係数
RC	コレクタ・オーム性抵抗
RB	ベース・オーム性抵抗
VAF	順方向アッリー電圧
IK	大電流によって順方向ベータがロールオフを始める電流値

数

- NR : 逆方向電流エミッション係数
- ISC : 非理想 B-C 間 p-n 接合飽和電流
- NC : 非理想 B-C 間ダイオード放出係数
- VAF : 順方向アッリー電圧
- VAR : 逆方向アッリー電圧
- IK : 大電流によって順方向ベータがロールオフを始める電流値
- IKR : 大電流によって逆方向ベータがロールオフを始める電流値

また、寄生抵抗 RB を含んだ外部ベース-エミッタ端子間電圧を Vb 、寄生抵抗 RC を含んだ外部コレクタ-エミッタ端子間電圧を Vc とすると、次の関係が成り立つ。

$$Vb = V_{be} + I_b RB \quad (10)$$

$$Vc = V_{be} + V_{cb} + I_c RC \quad (11)$$

結局、B 級増幅のような非線形動作に寄与するトランジスタパラメータは、表1のようになる。ただし、 ISC 、 NC 、 VAR 、 IKR は、逆方向トランジスタの非理想特性に関するパラメータであり通常は無視できるので除いている。

3. 非線形動作に寄与するトランジスタ パラメータの V-I 特性からの抽出

式 (1) ~ (11) を見ると、トランジスタパラメータは、一個の式に複数記述されることが多い。従って、あるパラメータだけが支配的となる V-I 特性の領域を見つけ、そのパラメータをまず先に求める。その他のパラメータは先に求めたパラメータを式に代入して逐次的に求めていくとよいと考えられる。

3.1 NF, IS, IK の求め方

これらのパラメータは、 V_{be} - I_c 特性より、次のように求められる。

通常のバイアス条件、すなわち、 $V_{be} > 0$ 、 $V_{bc} < 0$ とすると、 $I_{bc1} = 0$ 、 $I_{bc2} = 0$ とできるので、コレクタ電流 I_c は次のように表わされる。

$$I_c = \frac{2ISexp(V_{be}/(NFVt))}{1 + (1 + 4ISexp(V_{be}/(NFVt)))/IK}^{1/2} \quad (12)$$

(1) NF, IS

低電流領域、 $I_c \ll IK$ 、における I_c をとると

$$I_c = ISexp(V_{be}/(NFVt)) \quad (13)$$

このとき、 $V_{be} - \log(I_c)$ 特性は直線となり、 NF は次式のように、その勾配より求められる。ただし、 Δ は差分を表わしている。

$$1/NF = Vt \Delta \log(I_c) / \Delta V_{be} \quad (14)$$

また、 NF が求まれば、 IS は式 (13) より直ちに求まる。

(2) IK

大電流領域、 $I_c \sim IK$ 、における I_c を考えると、

$$I_c = \frac{2ISexp(V_{be}/(NFVt))}{1 + (1 + 4ISexp(V_{be}/(NFVt)))/IK}^{1/2} \quad (15)$$

IS 、 NF がすでに求められているとすると、 IK は次のように求まる。

$$IK = 4X / ((2X/I_c - 1)^2 - 1) \quad (16)$$

ただし、

$$X = ISexp(V_{be}/(NFVt))$$

としている。

なお、式 (16) で、 $X = 2I_c$ とおくと、 $IK = I_c$ となることから、 IK の物理的意味は、 I_c が理想的な exp 特性から $I_c/2$ に低下するその I_c 値であることが分かる。

3.2 BF, ISE, NE の求め方

前節で述べた方法で、 NF 、 IS 、 IK がすでに求められるとすると、 BF 、 ISE 、 NE は、 V_{be} - I_b 、 I_c 特性より次のように求められる。

通常のバイアス条件、すなわち、 $V_{be} > 0$ 、 $V_{bc} < 0$ と仮定すると、 $I_{bc1} = 0$ 、 $I_{bc2} = 0$ とできるので、ベース電流 I_b 、およびコレクタ電流 I_c は次のようになる。

$$I_b = I_{be1}/BF + I_{be2}$$

$$I_{be1} = ISexp(V_{be}/(NFVt))$$

$$I_{be2} = ISEexp(V_{be}/(NEVt)) \quad (17)$$

$$I_c = \frac{2ISexp(V_{be}/(NFVt))}{1 + (1 + 4ISexp(V_{be}/(NFVt)))/IK}^{1/2} \quad (18)$$

(1) BF

まず、大電流領域、 $I_c \sim IK$ 、で考える。一般に、 $NE > NF$ であるから、大電流領域においては、 $I_{be1} \gg I_{be2}$ となる。よって、

$$I_b = I_{be1} = ISexp(V_{be}/(NFVt))/BF \quad (19)$$

式 (18)、(19) より、 BF は次のように求められる。

$$BF = (I_c/I_b)(1 + I_c/IK) \quad (20)$$

(2) ISE, NE

今度は、小電流領域で考える。 I_b は、

$$I_b = I_{be1}/BF + I_{be2} = ISexp(V_{be}/(NFVt))/BF + ISEexp(V_{be}/(NEVt)) \quad (21)$$

IS , NF , BF がすでに求められているとすると、第1項、 I_{be1}/BF は既知となる。 $V_{be} - \log(I_{be2})$ 特性をとると直線となり、 NE はその勾配より得られる。 ISE も、 NE が求められた後、直ちに求まる。

3.3 RB

RB は、次のような RB を含めた外部ベース-エミッタ間端子電圧 $V_b - I_c$ 特性より求められる。

$$I_c = \frac{2ISexp(V_{be}/(NFVt))}{1 + (1 + 4ISexp(V_{be}/(NFVt)))/IK)^{1/2}} \quad (22)$$

$$V_b = V_{be} + I_b RB \quad (23)$$

IS , NF , IK が前述の方法で求まっていて、かつ、 V_b , I_c , I_b が与えられれば、 RB は次のように一意に定まる。

$$RB = (V_b - NFVt \log(I_c(1 + I_c/IK)/IS))/I_b \quad (24)$$

なお、 IK と RB はともに、 $V_b - \log(I_c)$ 特性を大電流領域で下方向に湾曲させる効果をする。両者の効果を見積もると、直線からのずれを ΔI_c とすると、

IK の影響: $I_c = IK$ で、 $\Delta I_c = I_c/2$

RB の影響: $I_b = V_t/RB$ で、

$$\Delta I_c = I_c/2$$

いま、典型的な値として、 $RB = 50\Omega$ とすると、 RB の影響は、 $I_b = .5\text{mA}$ で生ずる。この値は、 $BF = 100$ とすると、 $I_c = 50\text{mA}$ に相当する。 IK の値は数 10mA ~ 数 100mA と推定されるので、両者の効果はコンパラブルなことが分かる。

従って、 IK を先に抽出すると、 IK の値は RB の効果を含んだ値となり、その分 RB は小さな値に求まる。

3.4 VA

VA は、 $V_c - I_c$ 特性より次のように求められる。まず、小電流領域において、 I_c は次のよ

うに表わされる。

$$I_c = \frac{ISexp(V_{be}/(NFVt))}{1 - V_c/VAF} \quad (27)$$

よって、 VAF は、次のように V_c を変化させたときの I_c の変化率より求められる。

$$\begin{aligned} \Delta I_c / \Delta V_c &= I_c / VAF (1 - V_c / VAF) \\ &\sim I_c / VAF \end{aligned} \quad (28)$$

$$VAF = I_c / (\Delta I_c / \Delta V_c) \quad (29)$$

なお、 $\Delta I_c / \Delta V_c$ は、 h パラメータの h_{oe} に相当する。

3.5 NR, BR, RC

これらのパラメータは、飽和状態における V_{be} , $V_c - I_b$, I_c 特性より求められる。

飽和状態においては、 $V_{bc} > 0$ となる。このとき、 I_b , I_c は次のように表わされる。

$$I_b = I_{be1}/BF + I_{be2} + I_{bc1}/BR \quad (30)$$

$$I_c = I_{be1} - I_{bc1} - I_{bc1}/BR \quad (31)$$

ただし、

$$I_{be1} = ISexp(V_{be}/(NFVt))$$

$$I_{be2} = ISEexp(V_{be}/(NEVt))$$

$$I_{bc1} = ISexp(V_{bc}/(NRVt))$$

(1) NR, BR

小電流領域の I_b をとると、

$$\begin{aligned} I_b &= ISexp(V_{be}/(NFVt))/BF \\ &+ ISexp(V_{bc}/(NRVt))/BR \end{aligned} \quad (32)$$

ただし、

$$V_c = V_{be} - V_{bc} \quad (33)$$

よって、 $V_{bc} - \log(I_{bc1})$ の勾配より NR が求まり、 NR が求まると BR も直ちに求まる。なお、 $BR \sim 1$ であるから、このように I_b から BR を求めた方が、 I_c から求めるよりも精度がよいと考えられる。

(2) RC

中電流領域の I_c をとると、

$$I_c = ISexp(V_{be}/(NFVt))/BF$$

$$+ISexp(Vbc/(NRVt))(1+1/BR) \quad (34)$$

$$Vc = Vbe - Vbc + IcRC \quad (35)$$

よって、 NF, IS, BF, BR がすでに求まっているとすると、 Vc, Veb, Ic データが一点与えられれば、 RC は一意に定まる。

4. トランジスタパラメータ抽出プログラムの作成

4.1 全体構成

前章の解析に示したように、トランジスタパラメータを抽出するには、適当な順序が存在すふことが分かる。その手順を図2に示している。

4.2 VAF抽出

入力データは、 $Vc-Ic$ (Vb 一定) 特性曲線上の2点とする。これを、 $(Vc1, Ic1, Vb)$ 、 $(Vc2, Ic2, Vb)$ と表すと、

$$VAF = Ic1(Vc2 - Vc1)/(Ic2 - Ic1) \quad (36)$$

4.3 NF, IS, RB, IK抽出

入力データは、 $Vb-Ib, Ic$ (Vc 一定) 特性曲線上の4点とする。これを、 $(Vb1, Ib1, Ic1)$ 、

$(Vb2, Ib2, Ic)$ 、 \sim 、 $(Vb4, Ib4, Ic4)$ と表わす。ただし、 $Ib1 < Ib2 < Ib3 < Ib4$ 、かつ、 $Ib1, Ib2 < IK, Ib4 \sim IK, Ib3 \sim (Ib2Ib4)^{1/2}$ にとる。

以下のように、 NF, IS, RB, IK の順に逐次的に求めてゆく。

$$(1) NF \quad NF = (Vb2 - Vb1)/(Vt \log(Ic2/Ic1)) \quad (37)$$

$$(2) IS \quad IS = Ic1/exp(Vb1/(NFVt)) \quad (38)$$

$$(3) RB \quad RB = (Vb3 - NFVt \log(Ic3/IS))/Ib3 \quad (39)$$

$$(4) IK \quad IK = 4X/((2X/Ic4 - 1)^2 - 1) \quad (40)$$

ただし、

$$X = ISexp((Vb4 - Ib4RB)/(NFVt)) \quad (41)$$

(5) 最適化
 NF, IS, RB, IK の正確な値は、本来、次のような4元連立方程式を解いて得られる。

$$\begin{aligned} Ic1 &= f(Vb1, NF, IS, RB, IK) \\ Ic2 &= f(Vb2, NF, IS, RB, IK) \\ Ic3 &= f(Vb3, NF, IS, RB, IK) \\ Ic4 &= f(Vb4, NF, IS, RB, IK) \end{aligned} \quad (42)$$

よって、前述のように、 $NF \rightarrow IS \rightarrow RB \rightarrow IK$ の順に逐次求めた値は近似値で、式(42)を満足する正確な値とはずれを生ずることとなる。そこで、(1)~(4)で得た値を NF, IS, RB, IK のそれぞれの初期値として、各パラメータを微小に変化させてゆき、その値を用いて Ic を計算し、入力データの Ic との差が小さくなるように最適化を行う。

4.4 BF, NE, ISE抽出

入力データは、前項で用いた $(Vb1, Ib1, Ic1)$ 、 $(Vb2, Ib2, Ic)$ 、 \sim 、 $(Vb4, Ib4, Ic4)$ をそのまま、

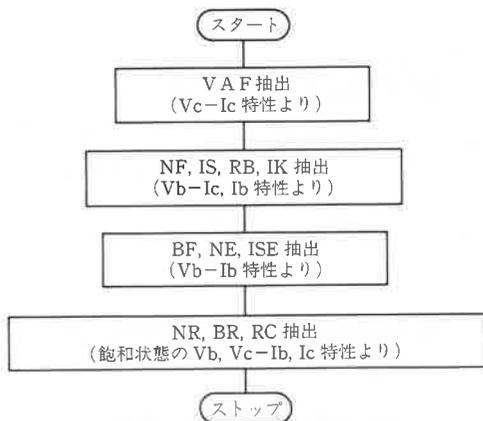


図2 パラメータ抽出ゼネラルフローチャート

ここでも用いる。 BF , NE , ISE の順に逐次求める。

(1) BF

$$BF = (Ic4/Ib4) (1 + Ic4/IK) \quad (43)$$

(2) NE

$$NE = (Vb2 - Vb1) / (Vt \log(y2/y1)) \quad (44)$$

ただし、

$$y1 = Ib1 - ISexp(Vb1/(NFVt))/BF \quad (45)$$

$$y2 = Ib2 - ISexp(Vb2/(NFVt))/BF \quad (46)$$

(3) ISE

$$ISE = (Ib1 - ISexp(Vb1/(NFVt))/BF) / exp(Vb1/(NEVt)) \quad (47)$$

(4) 最適化

(1)~(3) で得た値を、 BF , NE , ISE のそれぞれの初期値とし、微小に変化させて、 Ib の入力データと BF , NE , ISE を用いた Ib の逆算値の差が最小となるよう最適化を行う。

4.5 NR, BR, RC

入力データは、飽和状態における Vc , $Vb - Ib$, Ic 特性曲線上の3点とする。これらを、 $(Vc1, Vb1, Ib1, Ic1)$, $(Vc2, Vb2, Ib2, Ic2)$, $(Vc3, Vb3, Ib3, Ic3)$ と表わす。ただし、 $Ic1 < Ic2 < Ic3$ とする。

(1) NR

$$NR = (Vc2 - Vc1) / (Vt \log(Y2/Y1)) \quad (48)$$

ただし、

$$Y1 = Ib1 - ISexp(Vb1/(NFVt))/BF \quad (49)$$

$$Y2 = Ib2 - ISexp(Vb2/(NFVt))/BF \quad (50)$$

(2) BR

$$BR = ISexp(Vc1/(NRVt)) / (Ib1 - ISexp(Vb1/(NFVt)))$$

$$- ISexp(Vb1/(NEVt)) \quad (51)$$

(3) RC

$$RC = (Vc3 - Vc2) / (Ic3 - Ic2) \quad (52)$$

5. プログラム作成結果

前章で明らかにした方法に基づいて、トランジスタパラメータを抽出するプログラムを作成した。このプログラムを“PARAMN”とよぶことにする。

5.1 模擬トランジスタを用いたパラメータ抽出テスト

図3, 図4は、模擬的なトランジスタを作製して、“PARAMN”のトランジスタパラメータ抽出機能のテストを行った結果を示している。模擬トランジスタとは、試験的に各パラメータを指定した仮想的なトランジスタを意味している。そのパラメータをもとにトランジスタの $Vb - Ic$, Ib 特性の理論値を計算し、これを模擬トランジスタのデータとしてパラメータ抽出を行った。図は、指定したパラメータより得られる $V - I$ 特性と抽出されたパラメータより得られる $V - I$ 特性を対比して示している。図には、4個の測定点も示している。図3は Ic を、図4は Ib を示している。図より、二つの特性曲線は充分一致していることが分かる。

図3, 図4にはパラメータの値も記している。

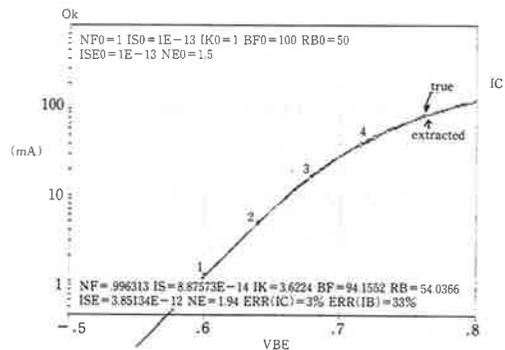


図3 PARAMN のテスト結果 ($Vb - Ic$ 特性)

PSPICE 用非線形動作トランジスタパラメータの抽出

NFO, ISO, ~NEO は始めに指定した値, NF, IS, ~NE は抽出された値を示している。指定値と抽出値の差は, パラメータによって大きく異なるが, これは, 測定点近傍において特性曲線に与える影響の少ないパラメータほど誤差が大となるためと考えられる。ERR (IC), ERR (IB) は, 特性曲線 IC, IB の誤差を表わしており, 4 個の測定点における誤差の絶対値の

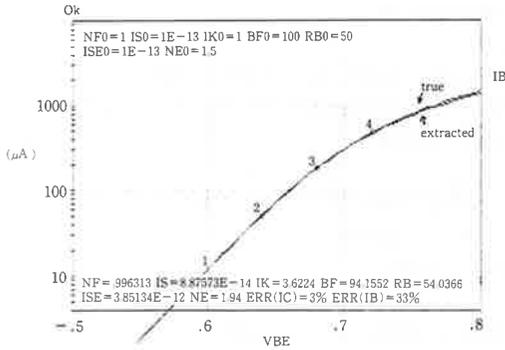


図4 PARAMN のテスト結果 (Vb-Ib 特性)

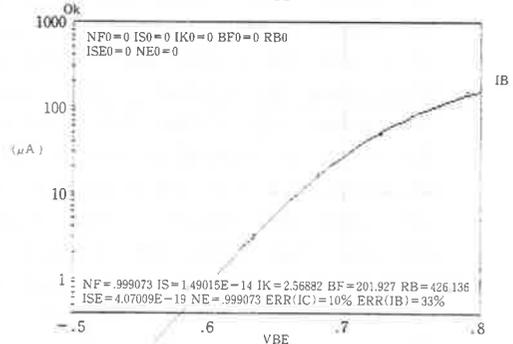
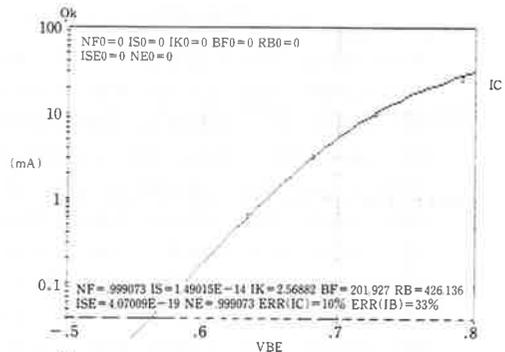


図6 2SC945 のパラメータ抽出結果

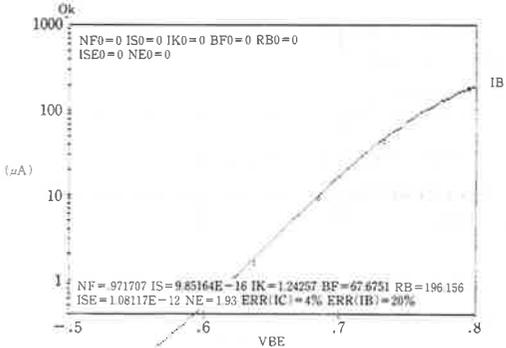
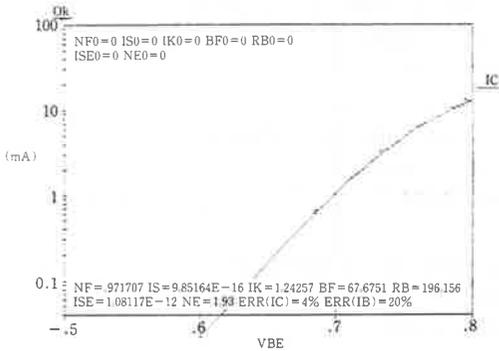


図5 2SC372 のパラメータ抽出結果

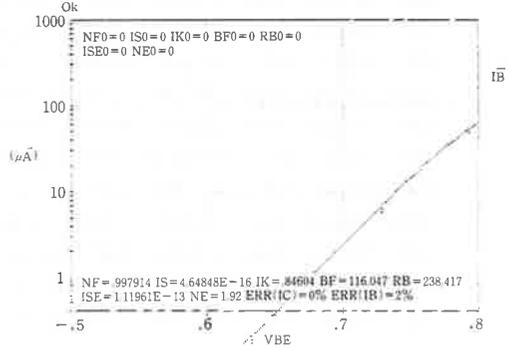
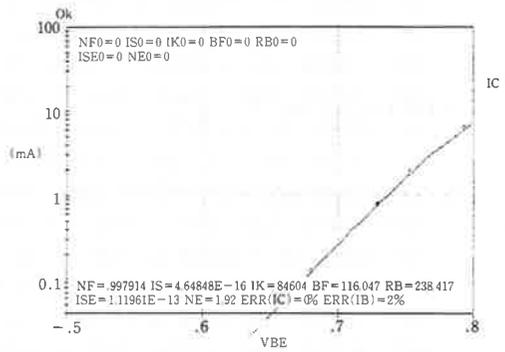


図7 2SC4226 のパラメータ抽出結果

表2 PARAMN のテスト結果 (乱数を用いてテストパラメータを発生)

NF0=1.01412 IS0=6.11769E-13 RB0=96.4769 IK0=9.82081
 BF0=127.908 NE0=1.51412 ISE0=8.49987E-13
 NF=1.06687 IS=1.85886E-12 RB=75.7048 IK= .200214 ERR (IC)=4.7442%
 BF=147.78 NE=1.79721 ISE=2.58003E-11 ERR (IB)=10.63%
 NFO=1.42863 IS0=7.97176E-13 RB0=92.259 IK0=3.78333
 BF0=78.0481 NE0=1.92863 ISE0=1.21148E-13
 NF=1.42863 IS=7.75886E-13 RB= .0558296 IK=4.00426 ERR (IC)=2.13776E-04%
 BF=66.0425 NE=1.91 ISE=8.65015E-14 ERR (IB)=3.25969%
 NFO=1.03245 IS0=6.07307E-13 RB0=25.1231 IK0=3.91498
 BF0=100.008 NE0=1.53245 ISE0=4.93597E-13
 NF=1.04735 IS=8.30871E-13 RB=24.7752 IK=173.371 ERR (IC)=5.48001E-03%
 BF=87.4399 NE=1.06735 ISE=1.82976E-16 ERR (IB)=13.8549%
 NE0=1.05996 IS0=5.10914E-13 RB0=41.9441 IK0=4.90326
 BF0=89.1003 NE0=1.55996 ISE0=4.55614E-13
 NF=1.09142 IS=9.48409E-13 RB=37.0769 IK=14.163 ERR (IC)= .336271%
 BF=80.2617 NE=1.92 ISE=6.76181E-12 ERR (IB)=12.3594%
 NFO=1.0053 IS0=9.96278E-13 RB0=41.5501 IK0=1.63098
 BF0=242.2 NE0=1.5053 ISE0=9.79857E-13
 NF=1.007 IS=1.02918E-12 RB=46.6823 IK=21.4188 ERR (IC)=1.66651%
 BF=199.262 NE=1.007 ISE=6.59285E-17 ERR (IB)=8.22688%
 NFO=1.1048 IS0=3.60543E-14 RB0=71.2067 IK0=3.82471
 BF0=54.6202 NE0=1.6048 ISE0=5.46794E-13
 NF=1.09526 IS=2.91524E-14 RB=79.3257 IK= .267753 ERR (IC)=1.42604%
 BF=39.6161 NE=1.93 ISE=5.84411E-12 ERR (IB)=5.1638%
 NFO=1.34869 IS0=1.06806E-13 RB0=78.1797 IK0=1.211
 BF0=219.329 NE0=1.84869 ISE0=1.21269E-13
 NF=1.34869 IS=1.03787E-13 RB=1.13732 IK=1.81983 ERR (IC)=8.72377E-05%
 BF=151.593 NE=1.97 ISE=2.52399E-13 ERR (IB)=2.49205%
 NFO=1.4694 IS0=1.81189E-13 RB0=10.9064 IK0=8.6336
 BF0=233.983 NE0=1.9694 ISE0=6.91563E-13
 NF=1.4694 IS=1.76488E-13 RB=0 IK=11.8144 ERR (IC)=1.19674E-04%
 BF=233.641 NE=1.96947 ISE=6.78331E-13 ERR (IB)=6.24374E-03%
 NFO=1.20912 IS0=7.39673E-13 RB0=66.2619 IK0=5.78003
 BF0=92.3319 NE0=1.70912 ISE0=2.26426E-13
 NF=1.19872 IS=6.09312E-13 RB=71.6658 IK= .634551 ERR (IC)=1.02423%
 BF=78.9518 NE=1.9 ISE=9.54682E-13 ERR (IB)=5.91341%
 NFO=1.05807 IS0=2.62726E-13 RB0=42.6837 IK0=2.49401
 BF0=191.251 NE0=1.55807 ISE0=7.10234E-13
 NF=1.06715 IS=3.07774E-13 RB=7.29273 IK= .116695 ERR (IC)=3.47652%
 BF=168.702 NE=1.95 ISE=1.67175E-11 ERR (IB)=34.3891%
 NFO=1.00259 IS0=2.2691E-13 RB0=87.828 IK0=3.50213
 BF0=125.271 NE0=1.50259 ISE0=6.15641E-13
 NF=1.00154 IS=2.20546E-13 RB=92.1081 IK=4.19785 ERR (IC)=1.7359%
 BF=104.546 NE=1.98 ISE=1.60951E-11 ERR (IB)=7.39848%

累積をとっている。

表 2 は、トランジスタパラメータを乱数を用いて無作為に発生し、PARAMN のパラメータ抽出機能のテストを行った結果を示している。表 2 の範囲で、誤差は、ERR (IC) で 6% 以下、ERR (IB) で 34% 以下となることが分かる。また、1 測定点当たりの平均誤差で言うと最大でも 10% 以下となることが分かる。

5.2 実トランジスタを用いたパラメータ抽出

図 5～図 7 は、実際のトランジスタ 3 種類、2SC372, 2SC945, 2SC4226, についてパラメータ抽出を行った結果を示している。図 5～図 7 は、パラメータ抽出が良好に行われていることを示していると考えられる。

6. むすび

PSPICE を用いて B 級増幅などの非線形動作のシミュレーションを行うときに必要となるバイポーラトランジスタパラメータを、V-I 特性から高精度で抽出する方法を明らかにした。またその方法に基づいてパラメータ抽出プログ

ラム：“PARAMN”を開発した。数種類のタイプの異なるトランジスタについて、パラメータ抽出を試みたところ良好に動作することが確認された。

今後は B 級増幅回路の組み立てを行って実際の特性を測定し、これと PARAMN で抽出したパラメータを用いたシミュレーション結果と比較を行う予定である。

なお、本研究は (株) 小電力高速通信研究所からの委託研究として行ったものであることを付記する。

参考文献

- 1) サイバネット (株), “PSPICE”, サイバネット (株) (1989)
- 2) L.W. Nagel, “SPICE2: A computer program to simulate semiconductor circuits”, Memorandum No. UCB/ERL M520 (May 1973)
- 3) 苫米地, 長沢, “PSPICE シミュレーション用高周波トランジスタパラメータの抽出”, 八戸工業大学情報システム工学研究所紀要, Vol. 3, pp. 1-11 (March 1990)
- 4) P.W. Tuinger, 松本訳, “SPICE による電子回路設計入門”, CQ 出版 (株) (1990)

付録 バイポーラトランジスタのデバイスパラメータ一覧

		デフォルト値
IS	B-E間 p-n 接合飽和電流	10^{-10}
VAF	順方向アーリー電圧	100
BF	順方向ベータの理想的最大値	100
NE	非理想ベース・エミッタ・ダイオード放出係数	1.5
ISE	非理想ベース・エミッタ・ダイオード飽和電流	無限大
IKF	大電流によって順方向ベータがロールオフを始める電流値	無限大
RE	エミッタ・オーム性抵抗	0
BR	逆方向ベータの理想最大値	1
NC	非理想ベース・コレクタ・ダイオード放出係数	2.0
ISC	非理想ベース・コレクタ・ダイオード飽和電流	無限大
IKR	大電流によって逆方向ベータがロールオフを始める電流値	無限大
RC	コレクタ・オーム性抵抗	0
RB	O バイアス時のベース抵抗	0
RBM	ベース抵抗の電流変化の最小値	RB
IRB	ベース抵抗が RBM の 1/2 になる電流値	∞
XCJC	内部で R_b に接続される B-C 間容量のフラクション	1
CJE	B-E 間 O バイアス q-n 接合容量	0
MJE	B-E 間 p-n 接合傾斜ファクター	0.33
VJE	B-E 間 p-n 接合拡散電位差	0.75
CJC	B-C 間 O-バイアス q-n 接合容量	0
MJC	B-C 間 p-n 接合傾斜ファクター	0.33
FC	B-C 間 p-n 接合の順方向バイアス時の空乏層容量開始係数	0.5
VJC	B-C 間 p-n 接合拡散電位差	0.75
CJS	C-S 間 O-バイアス p-n 接合容量	0
TF	順方向透移時間 t_f の理想値	0
XTF	t_f の V_{oe} 依存性係数	0
VTF	t_f が V_{oe} に依存開始する電圧値	0
ITF	t_f が I_o に依存開始する電流値	0
TR	逆方向遷移時間 t_r の理想値	0