BJT-Spice パラメータ設定

代表的な npn 型のバイポーラ型トランジスタのパラメータ設定手順を次に示す。基本的には pnp 型も同様な手順で定めれば良い。

しかし、コンプリメンタリだからといって同じ値を設定すると全く同じ特性を持つトランジスタが定義されてしまい、キャリアの差による特性差が表現されず、実態と異なることになるので注意が必要です。

パッケージの差によっては提供状況にバラツキがある場合がありますが、同一チップを使用している場合は熱的なもの（Spice パラメータ以外）を除いて流用できますので提供状況を調べてください。

例えば、Panasonic の面実装品 DSC2002 は提供されていますがディスクリート品の DSC4002 は提供されていません。しかし、両者は同一チップを使用していますので流用できます。特性曲線をよく見て判断する必要があります。特にカタログ更新時でデーターを撮り直した時に違う特性の様に見えるので注意してください。

又、パラメータについては海外メーカーや一部メーカーを除いて、多くは非公開になっている。しかし実際は一部の有力ユーザーには提供している場合があるので、データーそのものは所有しているケースがある。

ビジネスで購入するのであれば、個別交渉でパラメータを提供してもらうか、あるいはパラメーター抽出に必要な特性曲線群を提供してもらう様、購入者としてベンダーに要求してみるのも良いかと思う。

> 注)モデルパラメータのパラメトリック解析を実行する場合、0 以外の値が lib ファイルに設定されている必要があるのでうまく動作しない場合はファイルをチェックする事。

1.Vb-Ib 特性

図 1.1 の回路図で B-E 間の P-N 接合特性を決める。コレクタは実測は開放であるが、Spice ではエラーになるので 1G(ギガ)の抵抗を介して接地する。

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値
IS	伝達飽和電流	A	1.00E-16	調整
EG	バンドギャップバリア電位	eV	1.11	←
XTI	IS温度効果べき乗指数	—	3	←

表 1.1　使用パラメータ

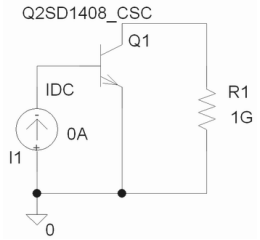

図 1.1　Is 設定回路

Is は P-N 接合の基準電流となるもので、Vbe の値を調整する。

モデルパラメーターの Is を指数的に調整した方が合わせやすいが、ここでは折れ曲がり点のポイント近辺を中心に合わせれば良い。又、Ib の大きい領域は Rb が左右するので後で調整する。

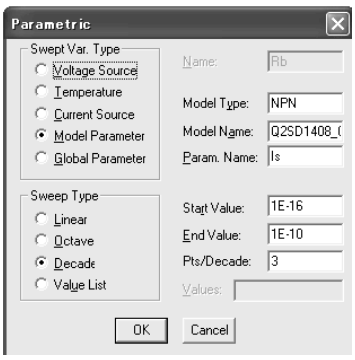

図 1.2　モデルパラメータ設定

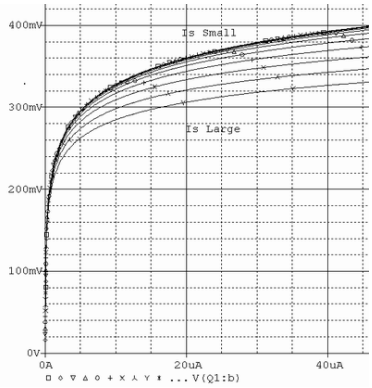

図 1.3　測定結果

しかし、カタログではこの特性曲線が添付されず、代わりに Vbe(sat)が添付されている場合がある。

その場合は、図 1.4 の Vbe(sat)の測定回路で Vbe-Ic 特性を測定し、曲線の左半分の領域で Is を定める。

Is はコレクタ電流も左右するので変更した場合は多くの Ic 由来特性の再確認が必要になる。

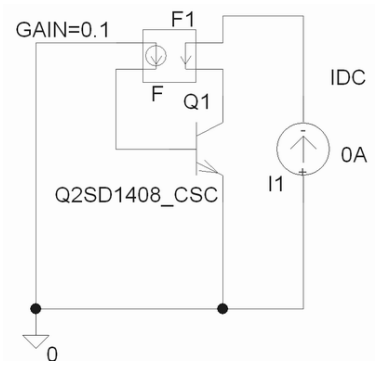

図 1.4 Vbe(sat)測定回路

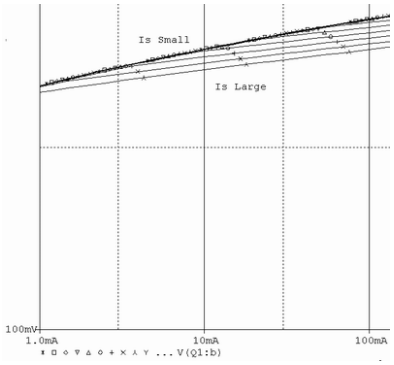

図 1.5 Vbe(sat)測定結果

尚、設定ウィンドではなく、コマンドで入力する場合は次のように設定する。

(LT-Spice ではツールバー右端の op ボタン→Spice Directive)

.STEP DEC NPN Q2SD1408_CSC (Is) 1E-16 1E-10 3　　あるいは値のリストで与える場合は、

.STEP NPN Q2SD1408_CSC (Is) LIST 1E-16 1E-12 1E-9 の様に記述する。

グローバル変数では次のようになる。部品の値を{変数}で定義した後、

.STEP PARAM 変数 LIST n1 n2 n3 …

2.hfe 特性

図 2.1 の回路図でベース電流を可変しながらコレクタ電流を測定する。

ここで決めるパラメータは表 2.1 である。

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値
BF	順方向理想最大増幅率	—	100	調整
IKF	順方向高電流域の ロールオフポイント	A	∞	調整
ISE	B-E間漏れ電流飽和電流	A	0	Is×10^3
NE	B-E間漏れ電流放出係数	—	1.5	1.5～2.0
NK	高電流域ロールオフ係数		0.5	0.5-0.9
XTB	BF･BR温度係数	—	0	1.5

表 2.1 hfe 曲線に使用するパラメータ

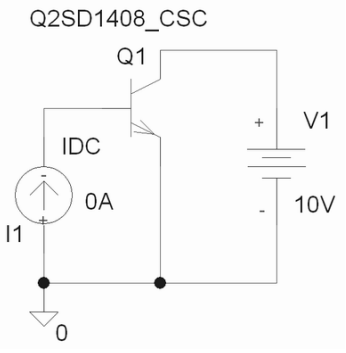

図 2.1 hfe 測定回路図

手順 1

前記図 1.2 に示す様にモデル･パラメータの BF を指定して可変すれば図 2.1 の結果を得る。この様にして、先ず、hfe のピーク値を合わす。

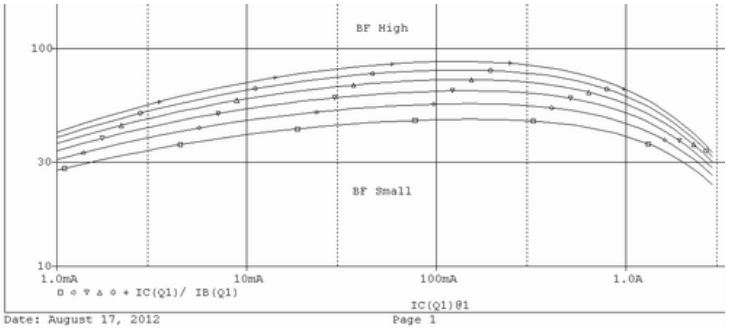

図 2.1 BF 可変時の hfe 曲線

手順 2

hfe が 50%に低下する電流値を目処に Ikf を可変して設定する。(図 2.2)必要に応じて BF の再調整が必要になる場合もある。

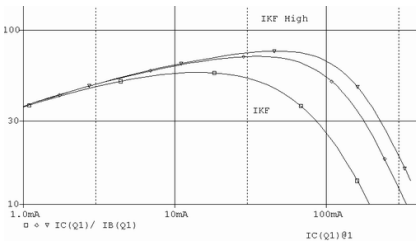

図 2.2 IKF の調整

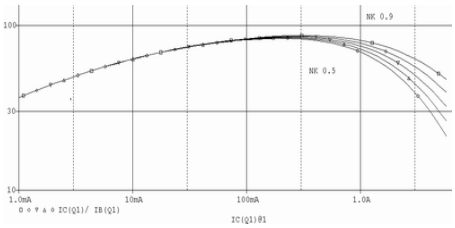

図 2.3 NK の調整

手順 3

NK を調整して高電流域での降下の様子を合わす。(図 2.3)

手順 4

Ise を Is の 1000 倍程度に設定して、微小電流域の低下が始まる電流を調整･設定する。(図 2.4)
この値は桁数単位で変える必要があるので Dec 単位で 3 桁程度スイープする必要がある。

手順 5

Ne を調整して低下の様子を調整する。だいたい 1.5 以上の値が必要で、1.0 程度に小さいと急激に hfe 全般が低下するので先ず、NE は 2.0 程度に設定してから調整した方が良い。(図 2.5)

＊正帰還型の自励式回路に用いる場合、微小電流域の hfe を合しておかないと実機で起動不良に成り兼ねない。これは正帰還を起す領域の Ic に対する hfe の低下が再現されていない事による。

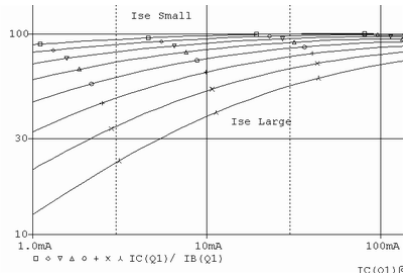

図 2.4 Ise 調整

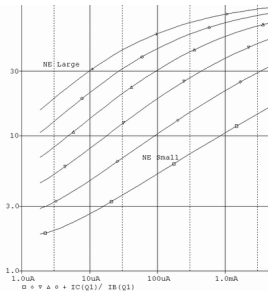

図 2.5 NE 調整

3.出力特性

図 3.1 に回路図、図 3.2 に測定結果を示す。
ここで設定するのはアーリー効果を示す VAF だけである。

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値
VAF	順方向アーリー電圧	V	∞	50～100

表 3.1 使用パラメータ

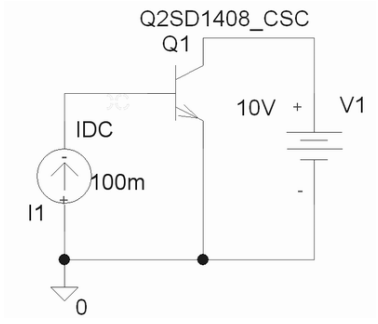

図 3.1 測定回路図

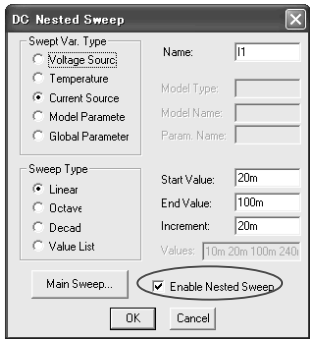

図 3.2 DC ネストスィープ

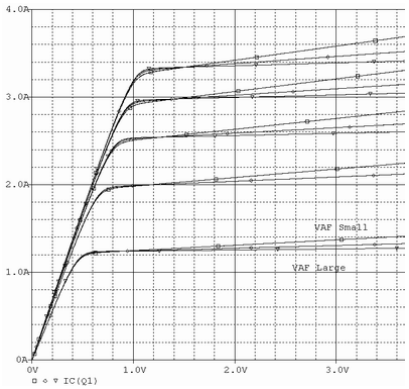

図 3.2 測定結果

ここではモデルパラメータの VAF をパラメトリック解析で、Ib の可変を DC ネストスイープで設定し、多重スィープを行う。

ベース電流値ではなく、曲線と同等の Ic レベル近辺で、且つ Vce がある程度高い領域の傾斜を合わす。

4.飽和特性

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値	順方向記号	初期値	モデル･パラメータ内容
VAR	逆方向アーリー電圧	V	∞	調整	VAF	∞	順方向アーリー電圧
BR	逆方向理想最大増幅率	－	1	調整	BF	100	順方向理想最大増幅率
IKR	逆方向高電流域の ロールオフポイント	A	∞	調整	IKF	∞	順方向高電流域の ロールオフポイント
ISC	B-C間漏れ電流飽和電流	A	0	調整	ISE	0	B-E間漏れ電流飽和電流
NR	逆方向電流放出係数	－	1	←	NF	1	順方向電流放出係数
NC	B-C間漏れ電流放出係数	－	2	調整	NE	1.5	B-E間漏れ電流放出係数

表4.1 使用パラメータと順方向特性対比

＊順方向の NK に相当する逆方向パラメータは不明であった。

飽和特性として諸特性を定める前に、飽和特性として影響する各種特性を表 4.1 に示す。いずれも逆トランジスタとして動作する時の hfe 曲線を決めるものであり、一般には公開されていない。もし、運良く逆特性曲線を測定や入手できたら、次の様に順方向特性の調整法を参考に逆方向パラメーターを設定する。

しかし、一般には正常な使用方法として逆トランジスタとして使うことはほとんどなく、又特性値を入手することも困難である。従って、

多くのユーザーは飽和特性を参考に表 4.2 のパラメータを設定することになる。

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値
Is	伝達飽和電流	A	1E-16	調整
BR	逆方向理想最大増幅率	－	1	調整
IKR	逆方向高電流域の ロールオフポイント	A	∞	←
ISC	B-C間漏れ電流飽和電流	A	0	←
NC	B-C間漏れ電流放出係数	－	2	←
RB	0バイアス時ベース抵抗	Ω	0	$0.1/Ib_{(MAX)}$
RC	コレクタのオーミック抵抗	Ω	0	$0.5/Ic_{(MAX)}$

表4.2 飽和特性の使用パラメータと順方向特性対比

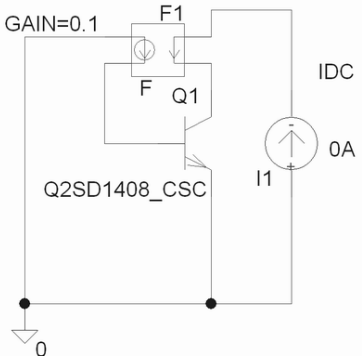

図 4.1 飽和特性回路図

手順 1

図 4.1 の回路図で Vce(sat)を測定しながら Is を再確認する。Is が小さいと微小電流域で Vce(sat)が飽和せず、図 4.2 のように Vce が跳ね上がる。

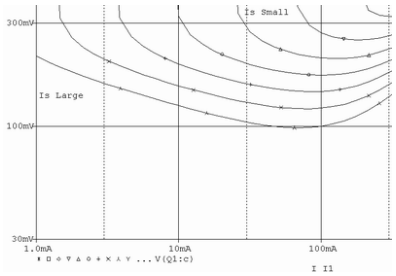

図 4.2 Is の確認

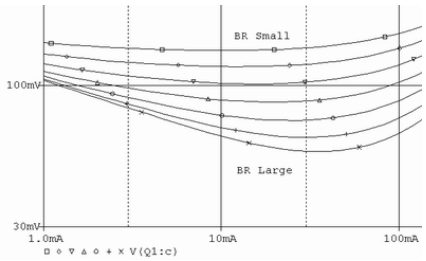

図 4.3 BR 調整

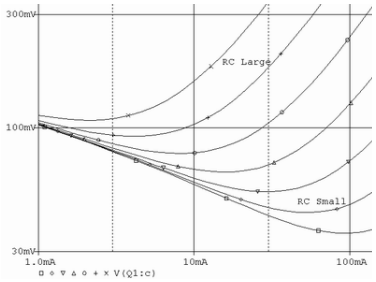

図 4.4 RC 調整

先ず、Is を大まかに合わせた後、BR で Vce(sat)の最下点を合わす。続いて Is を再調整して…、BR を再調整して…、と合わせ込む。

曲線の左半分が合えば、右半分で効果的な RC を調整して全体像を合わせる。Rc の目処は最大コレクタ電流で 0.5V 程度の電圧降下が発生する程度である。

又、IKR を調整して、逆トランジスタの大電流域 hfe を調整しても、大電流域の飽和電圧に関しては RC の影響が支配的であり、Isc=0 にすると、NC はその係数であるので曲線に影響しなくなる。

特に指定のない限り、普通は IKR/Isc/NC は初期値で良い。

手順 2

図 4.1 の回路図で Vbe を測定しながら Is を調整し、Ic の中域での Vbe を合わす。

手順 3

Vbe の画面の右半分の電位を Rb をパラメトリックで調整しながら決定する。

目処は 0.2×hfe×Rc 程度である。

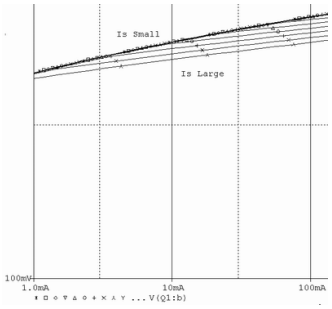

図 4.5 Is の確認･調整

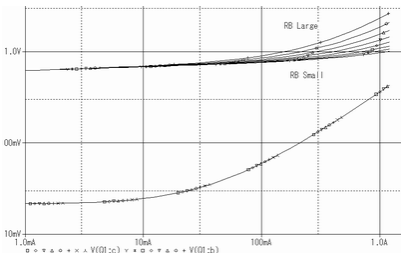

図 4.6 RB の調整

以上の確認が完了したら、hfe 特性を再確認･調整を行う。 (特に Is を変更した場合)

5.電極間容量

図 5.1 の回路図を参考に B-C 間容量、B-E 間容量を決める。

ここで決めるパラメータは表 5.1 のものである。

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値
CJC	B-C間0バイアス時P-N接合容量	F	0	Cob×1.2
MJC	B-C間p-n接合勾配係数	—	0.33	0.33～0.5
VJC	B-C間ビルトイン (基底)電圧	V	0.75	←
CJE	B-E間0バイアス時P-N接合容量	F	0	Cjc×1.5
MJE	B-E間p-n接合勾配係数	—	0.33	0.33
VJE	B-E間ビルトイン (基底)電圧	V	0.75	←

表5.1 容量関係のパラメータ

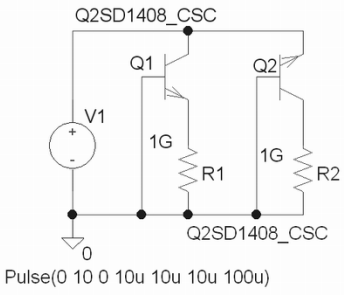

図5.1 測定回路

注)SW 特性の遅れ時間等に影響を与えるので Cjc,Cje は決して 0 にしないこと。

Q2 の接続が逆になっているのは E-B 間の逆接合の特性を測るためであり、電圧が V/μS で上昇するので Ic(Q1)や IE(Q2)の電流は 1μA=1pF で読み取る事ができる。

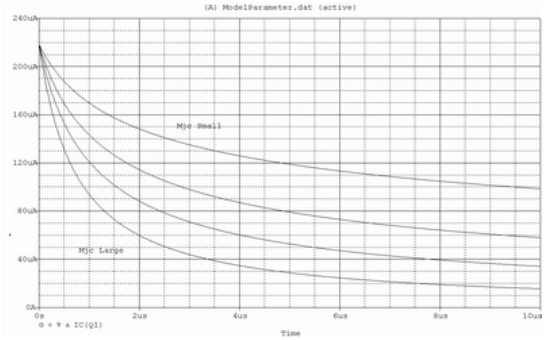

図 5.2 Mjc の確認･調整

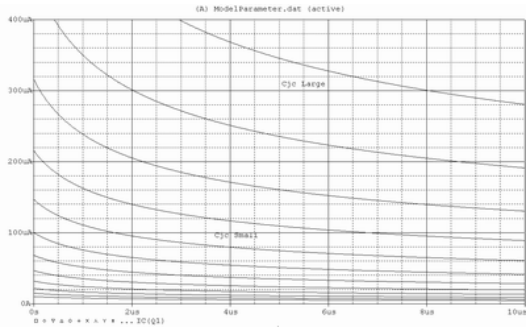

図 5.3 Cjc 確認･調整

手順 1

コレクタ周辺の容量特性を決定する。

曲線の減衰割合の様子を Mjc で合わせ、その後に Cjc のレベルを合わすと良い。

もしこの様な手順を踏むのが面倒であり、PSpice の Model・Editor(試用版)が使用出来る環境であればダイオードの容量特性抽出機能で各パラメータを抽出すれば良い。

図 5.4 の入力テーブルに

Vrev に印加電圧

Cj に容量

の組み合わせを代入し、図 5.5 の特性曲線を確認した後に抽出ボタンをクリックすれば図 5.6 の様にパラメータを抽出してくれる。

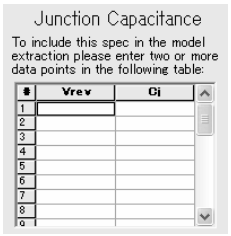

図 5.4 入力テーブル

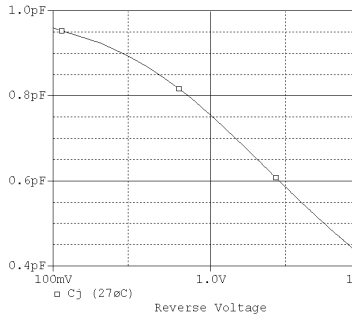

図 5.5 特性曲線

CJO	1e-012
M	0.3333
VJ	0.75

図 5.6 パラメータ

Cjo→Cjc M→Mjc Vj→Vjc に読みかえればそのまま代入出来る。

手順 2

エミッタ周辺の容量特性を決定する。

手順 1 と同様に各種パラメータを決定する。

エミッタ関連の Cje、Mje は公開されていない場合が多いのでその場合は、Cje=1.5×Cjc とし、その他は初期値のままとする。

面倒でも Cjc,Cje は 0 にしないこと。SW スピードに関連して特性が全く合わなくなる事がある。

6.スイッチング特性

図 6.1 の回路図を参考にスイッチング特性を決める。ここで決めるパラメータは表 6.1 のものである。

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値	コメント
TR	逆方向理想通過時間	Sec	0	TF×10	蓄積時間相当
TF	順方向理想通過時間	Sec	0	調整	変移時間相当

表 6.1 スイッチング特性のパラメータ

手順 1

蓄積時間に相当する TR を設定する。

TR はリバースの特性で Ic の降下時間には影響しないから先ずは TR から決めると良い。

駆動回路は指定の回路条件に合わすこと。

回路例は抵抗負荷であるが、インダクタンス負荷が指定されている場合もある。

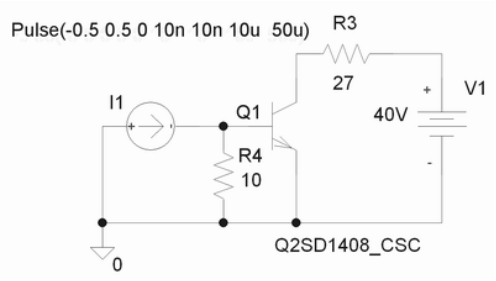

図 6.1 測定回路図

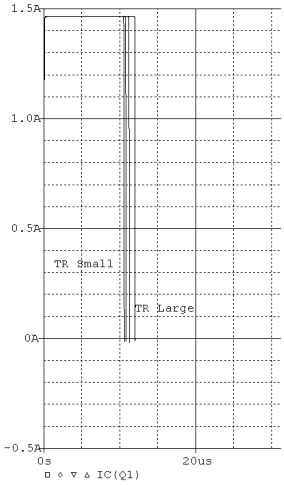

図 6.2 測定結果

手順 2

TR と同様に Ic 降下時間に相当する TF を設定する。

TR は変移時間なので立ち上がりと立下りの両方に影響するので TR→TF と決めていく。

ただし、SW 用途の場合は Tstg や Tf は定義されているが、小信号の場合等は定義されておらず、代わりに f_T が定義されている場合がある。当然、特性値や曲線も添付されていない、

その場合は次のように仮の値を決める

$$TF = \frac{3\sim5}{f_T}$$

TR=10×TF

例えば fT=15MHz の場合、TF=200nS～333nS、TR=0.2～0.33μS 程度に設定すると良い。

7.参考資料

- 「Spice による電子回路セミナー 第 2 回」 トランジスタ技術 1991/06 岡村廸夫
- 「SPICE とデバイス･モデル」CQ 出版 2005/10/01 新原 盛太郎
- 「LT-Spice で実波形再現 第 7 回」 トランジスタ技術 2012/01 堀米毅
- 各種 Web 情報

8.Spice パラメーター一覧

記号	モデル･パラメータ内容	単位	初期値	推奨値	面積係数	コメント
AF	フリッカーノイズべき乗指数	―	1			
BF	順方向理想最大増幅率	―	100			
BR	逆方向理想最大増幅率	―	1			
CJC	B-C間0バイアス時P-N接合容量	F	0	Cob×1.2	*	
CJE	B-E間0バイアス時P-N接合容量	F	0	Cjc×1.5	*	
CJEM	順バイアス接合容量最大値	F	0			
CJS	対サブストレート0バイアス時P-N接合容量	F	0		*	
EG	バンドギャップ電圧 (バリア電位)	eV	1.11			Si:1.11/Ge:0.67/SB:0.69
FC	順バイアス時の空乏層容量係数	―	0.5			
FRB	RBのモデル番号	-	0			
GAMMA	エピタキシャル領域のドーピング係数	―	1E-11			
IKF	順方向高電流域のロールオフポイント	A	∞		*	50%降下時の電流
IKR	逆方向高電流域のロールオフポイント	A	∞		*	
IRB	RBがRBMの50%に低下する電流	A	∞		*	
IS	伝達飽和電流	A	1E-16		*	
ISC	B-C間漏れ電流飽和電流	A	0		*	1より大きいと係数扱い
ISE	B-E間漏れ電流飽和電流	A	0	Is×1000	*	1より大きいと係数扱い
ISS	対サブストレートP-N 飽和電流	A	0			
ITF	通過時間のIc依存性	A	0		*	
KF	フリッカーノイズ係数	―	0			
MJC	B-C間p-n接合勾配係数	―	0.33	0.33～0.5		
MJE	B-E間p-n接合勾配係数	―	0.33			
MJS	対サブストレートp-n接合勾配係数	―	0			
NC	B-C間漏れ電流放出係数	―	2			
NE	B-E間漏れ電流放出係数	―	1.5	1.5～2.0		
NEPI	エピ･コレクタ濃度	-	1E+16			
NF	順方向電流放出係数	―	1			
NK	高電流域ロールオフ係数		0.5	0.5～0.9		
NR	逆方向電流放出係数	―	1			
NS	対サブストレートp-n接合放出係数	―	1			
PTF	1/ (2*pai*TF)Hzの時の余剰位相	deg	0			
QC0	エピタキシャル領域の電荷係数	Q	0			
RB	0バイアス (最大)ベース抵抗	Ω	0	0.1/Ib(max)	*	
RBM	高電流域の最小のベース抵抗	Ω	RB	0.5/Ic(max)	*	
RC	コレクタのオーミック抵抗	Ω	0		*	
RC0	エピタキシャル領域の抵抗	Ω	0			
RE	エミッタのオーミック抵抗	Ω	0		*	

REPI	0V時エピ･コレクタ抵抗	Ω	0			
TF	順方向理想通過時間	sec	0			
TNOM	パラメータ測定温度	℃	27			
TR	逆方向理想通過時間	Sec	0	TF×10		
TRB1	RB温度係数 (1次項)	/℃	0			
TRB2	RB温度係数 (2次項)	/℃^{2}	0			
TRC1	RC温度係数 (1次項)	/℃	0			
TRC2	RC温度係数 (2次項)	/℃^{2}	0			
TRE1	RE温度係数 (1次項)	/℃	0			
TRE2	RE温度係数 (2次項)	/℃^{2}	0			
TRM1	RBM温度係数 (1次項)	/℃	0			
TRM2	RBM温度係数 (2次項)	/℃^{2}	0			
V0	キャリア移動度のKnee電圧	V	10			
VAF	順方向アーリー電圧	V	∞	50～100		
VAR	逆方向アーリー電圧	V	∞			
VJC	B-C間ビルトイン (基底)電圧	V	0.75			
VJE	B-E間ビルトイン (基底)電圧	V	0.75			
VJEM	CJEMに達する電位	V	0			
VJS	対サブストレートビルトイン (基底)電圧	V	0.75			
VTF	通過時間のVbc依存性	V	∞			
XCJC	RBに接続されているCbcの割合	―	1			
XQTF	TFの電荷依存性	-	0			
XTB	BF･BR温度係数	―	0	1.5		
XTF	通過時間バイアス依存係数	―	0			
XTI	IS温度効果べき乗指数	―	3			