

半导体器件物理

The Physics of Semiconductor Devices

西安电子科技大学 微电子学院

Microelectronics Institute,

Xidian University

Model and Model Parameters of BJT

Model and Model Parameters of BJT

- 1. Introduction**
- 2. EM-1 Model (J. J. Ebers J. L. Moll)**
- 3. EM-2 Model**
- 4. EM-3 Model**
- 5. Model Parameters of EM-1, EM-2 and EM-3 Model**
- 6. Other Effects**
- 7. Basic Methods Obtaining Model Parameters**

1. Introduction

(1) 电路中的有源器件用模型描述该器件的特性。不同的电路模拟软件中采用的模型不完全相同，模型参数的名称和个数也不尽相同。

(2) 晶体管模型实际上以等效电路的形式描述晶体管端电流和端电压之间的关系。电路模拟过程中，实际上是以等效电路代替晶体管器件，然后建立回路方程、计算求解。

(3) 电路模拟结果是否符合实际情况，主要取决于晶体管模型是否正确，特别是采用的模型参数是否真正代表实际器件的特性。

(4) 晶体管模型越精确，电路模拟效果越好，但是计算量也越大，因此应折衷考虑。这样，对同一种器件，往往提出几种模型。

(5) 学习中应该掌握模型参数的含义，特别应注意每个模型参数的作用特点，即在不同的电路特性分析中必需考虑考虑哪些模型参数。每个模型参数均有内定值。对于默认值为0或者无穷大的模型参数，如果采用内定值，相当于不考虑相应的效应。

(6) 如果采用模拟软件附带的模型参数库，当然不存在任何问题。如果采用模型参数库中未包括的器件，如何比较精确地确定该器件的模型参数将是影响电路模拟结果的关键问题。

二、EM - 1模型 (J. J. Ebers J. L. Moll)

1. 基本关系式(针对NPN晶体管)

若外加电压为： $V_{b'e'} = 0, V_{b'c'} = 0$

流过b'e'的电流为： $I_F = I_{ES}[\exp(qV_{b'e'}/kt) - 1]$

则 $I_e = -I_F,$

$I_C = \beta_F I_F$ (电流方向以流进电极为正)

若外加电压为： $V_{b'e'} = 0, V_{b'c'} = 0$

流过b'c'的电流为： $I_R = I_{CS}[\exp(qV_{b'c'}/kt) - 1]$

则 $I_e = -I_R,$

$I_C = -I_R$

在一般情况下， $V_{b'e'} = 0, V_{b'c'} = 0,$

则得： $I_e = -I_F + I_R$

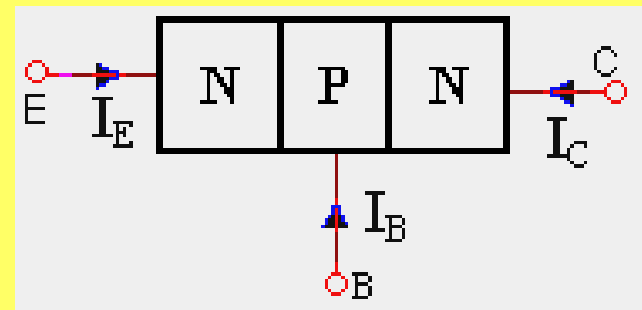
$I_C = \beta_F I_F - I_R$

这就是晶体管直流特性方程,包括 β_F, β_R, I_{ES} 和 I_{CS} 共4个参数。

由互易定理， $\beta_F I_{ES} = \beta_R I_{CS},$

记为 $\beta_F I_{ES} = \beta_R I_{CS} = I_S$ (称为晶体管饱和电流)，

所以直流特性中只有3个独立参数。取3个模型参数为 β_F, β_R 和 I_S 。



二、EM - 1模型 (J. J. Ebers J. L. Moll)

2. 实用关系式

对上述方程进行下述处理，可以得到实用的直流特性模型。

$$\begin{aligned} \text{记 } I_F &= I_{ES} [\exp(qV_{b'e}/kt) - 1] \\ &= I_S [\exp(qV_{b'e}/kt) - 1] = I_{CC} \end{aligned}$$

CC : Collector Collected

$$\begin{aligned} I_R &= I_{CS} [\exp(qV_{b'c}/kt) - 1] \\ &= I_S [\exp(qV_{b'c}/kt) - 1] = I_{EC} \end{aligned}$$

EC : Emitter Collected

代入前面方程，得：

$$\begin{aligned} I_e &= -I_F + I_R = -I_{CC} / \beta_F + I_{EC} \\ &= (-I_{CC} / \beta_F + I_{CC}) - (I_{CC} - I_{EC}) \\ &= -I_{CC} / \beta_F - I_{CT} \quad (I_{CT} = I_{CC} - I_{EC}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= I_F - I_R = I_{CC} - I_{EC} / \beta_R \\ &= (I_{CC} - I_{EC}) - (I_{EC} / \beta_R - I_{EC}) \\ &= I_{CT} - I_{EC} / \beta_R \end{aligned}$$

2. 实用关系式

$$I_e = -I_{CC} / \beta_F - I_{CT}$$

$$I_C = I_{CT} - I_{EC} / \beta_R$$

这就是实用双极晶体管直流特性模型，共有3个模型参数：

I_S 、 β_F 和 β_R

这3个参数记为：

I_S (晶体管饱和电流)

β_F (正向电流放大系数)

β_R (反向电流放大系数)。

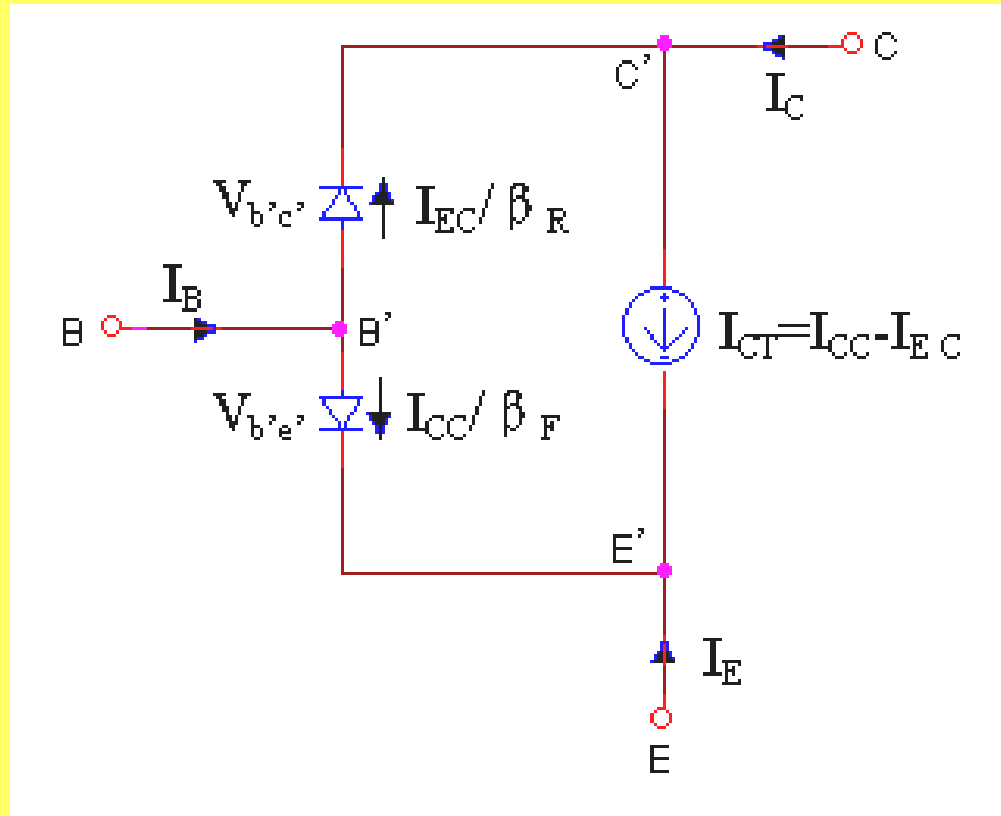
考虑到电流和电压的指数关系是 $\exp(qV_{b,c} / N_F kt)$ 和 $\exp(qV_{b,e} / N_R kt)$

则直流模型中还要包括两个模型参数：

N_F (正向电流发射系数)

N_R (反向电流发射系数)。

二、EM - 1模型 (J. J. Ebers J. L. Moll)



$$I_e = -I_{CC} / \beta_F - I_{CT}$$

$$I_c = I_{CT} - I_{EC} / \beta_R$$

三、EM - 2模型

在表示直流特性的EM - 1模型基础上，再考虑串联电阻、势垒电容和扩散电容，就得到考虑寄生参数和交流特性的EM - 2模型。

1. 串联电阻

考虑3个电极的串联电阻，新增3个模型参数：**RB、RE和RC**。

2. 势垒电容

反偏情况下势垒电容的一般表达式为： $C_J = C_{T0}(1-V/V_J)^{-mj}$

一共有3个参数。

其中 **C_{T0}** 是零偏势垒电容，与结面积以及工艺有关；

V_J 是势垒内建电势，与材料类型以及掺杂浓度有关；

mj 是电容指数，与结两侧杂质分布情况有关。

考虑eb结势垒电容，新增3个模型参数： **C_{TE0} 、 V_{JE} 和 M_{JE}** 。

考虑bc结势垒电容，新增3个模型参数： **C_{TC0} 、 V_{JC} 和 M_{JC}**

考虑衬底结势垒电容，新增3个模型参数： **C_{TS0} 、 V_{JS} 和 M_{JS}**

在正偏条件下，势垒电容的表达式为：

$$C_J = C_{T0}(1-F_C)^{-(1+mj)}(1-F_C(1+mj)+mjV/V_J)$$

又新增一个模型参数 **F_C** (势垒电容正偏系数)。

三、EM - 2模型

3. 扩散电容

发射结扩散电容为： $C_{de} = \tau_F(qI_{CC}/kT)$

新增模型参数：**TF**(正向渡越时间)

集电结扩散电容为： $C_{dc} = \tau_R(qI_{EC}/kT)$

新增模型参数：**TR**(反向渡越时间)

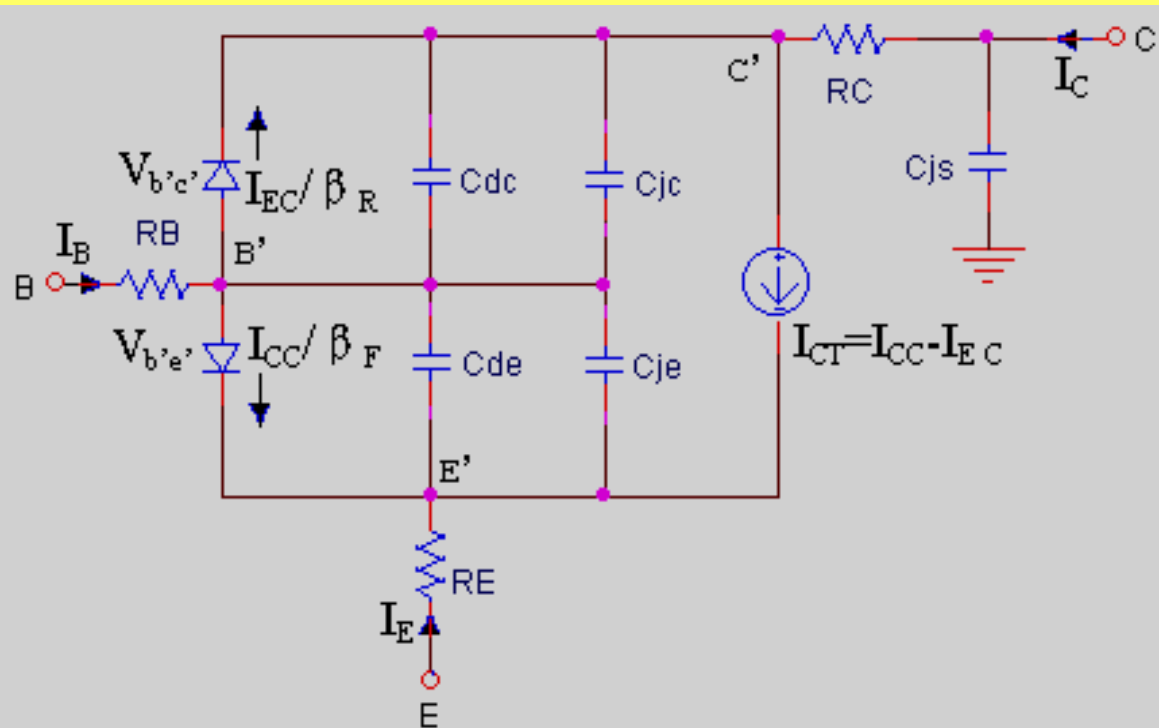
因此，EM - 2模型中新增**15**个模型参数。

4. EM-2模型和EM-1模型

对EM - 2模型，RB、RE、RC、CTE0、CTC0、CTS0、TF和TR这8个参数的内定值均为0。

若全部采用内定值，EM - 2模型将简化为EM - 1模型。

三、EM - 2模型



四、EM - 3模型

EM - 1和EM - 2是描述晶体管直流和交流特性的基本模型。

进一步考虑晶体管的二阶效应，包括基区宽度调制、小电流下复合电流的影响、以及大注入效应等，就成为EM - 3模型。

1. 基区宽度调制效应(Early效应)

(1) 基区宽度调制效应的影响

随着 $|V_{bc}|$ 的增加，使有效基区宽度 x_b 减小，从而使 I_s 增加、增加，而渡越时间则减小。因此，需要定量表征基区宽度调制效应对这些参数的影响。

(2) 正向Early电压

采用正向Early电压 V_A 描述基区宽度调制效应。

四、EM - 3模型

(3) 反向Early电压

可以采用同样方法考虑晶体管反向放大状态下 $V_{e'b'}$ 的作用，引入反向Early电压，记为 V_B 。

因此，考虑基区宽度调制效应，引进了两个新的模型参数 V_A (正向Early电压)和 V_B (反向Early电压)。

这两个模型参数的内定值均为无穷大。这就是说，若采用其内定值，实际上就不考虑基区宽度调制效应。

四、EM - 3模型

2. 大电流和小电流下电流放大系数 减小现象的描述

(1) 小电流效应的表征

在小电流下，电流放大系数减小的原因是由于势垒复合和基区表面复合效应，使基区电流所占的比例增大。

为此，引入下述基区复合电流项描述be结的影响：

$$I_b(\text{复合})=I_2 = I_{SE}[\exp(qV_{b'e}/NkT)-1]$$

对bc结，采用同样方法，引入又一项基区复合电流：

$$I_4 = I_{SC}[\exp(qV_{b'c}/NkT)-1]$$

相当于等效电路中 I_B 增加两个电流分量。

因此，要考虑基区复合电流的影响，需新增下述4个模型参数描述小电流下复合电流对电流放大系数的影响：

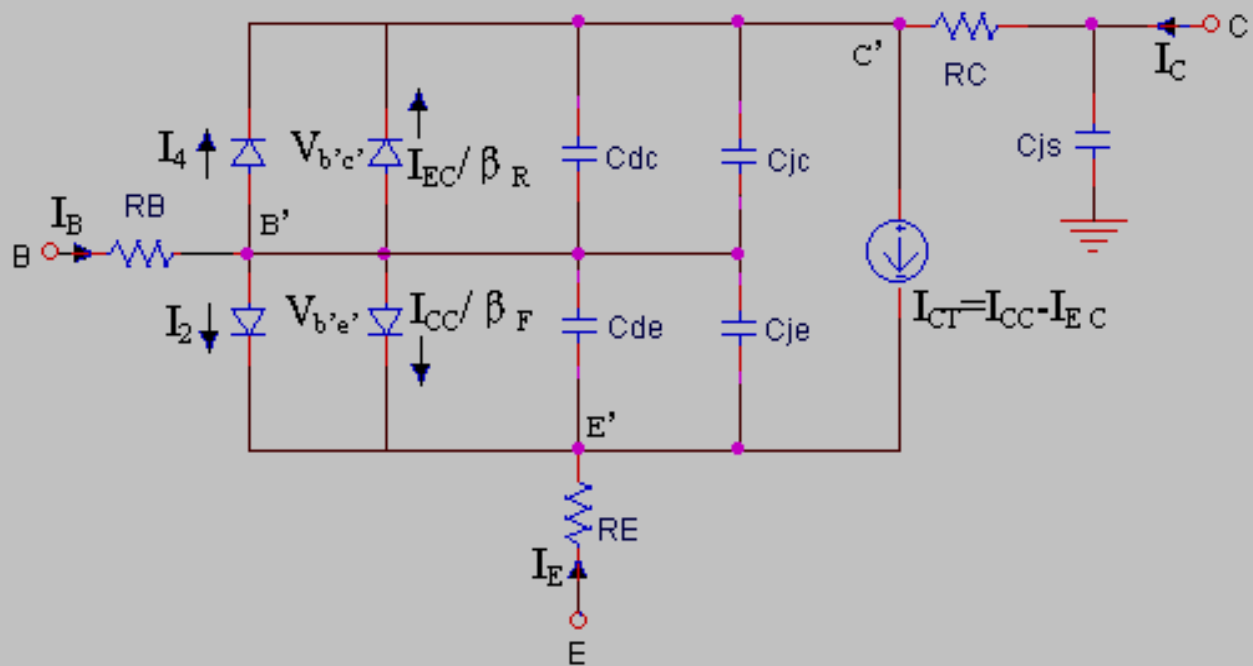
ISE(发射结漏饱和电流)

ISC(集电结漏饱和电流)

NE(发射结漏电流发射系数)

NC(集电结漏电流发射系数)

四、EM - 3模型



四、EM - 3模型

(2) 大注入效应的表征

大电流下，由于大注入效应，使 I_{CC} 随结电压 V 的增加变慢，从 $\exp(qV/kT)$ 关系逐步变为 $\exp(qV/2kT)$ 。为此，只需将 I_{CC} 表达式作下述修正，等效电路无需变化：

$$I_{CC} = I_S [\exp(qV_{b'e'}/kT) - 1] / [1 + (I_S/I_{KF}) \exp(qV_{b'e'}/2kT)]$$

显然，在一般注入下，分母项近似等于1，则 $I_{CC} = I_S [\exp(qV_{b'e'}/kT) - 1]$

在大注入情况下，分母中1可以忽略不计，则 $I_{CC} = I_S [\exp(qV_{b'e'}/2kT) - 1]$

对bc结，作同样分析，得：

$$I_{EC} = I_S [\exp(qV_{b'e'}/kT) - 1] / [1 + (I_S/I_{KR}) \exp(qV_{b'e'}/2kT)]$$

因此，考虑大注入效应，新增两个模型参数：

IKF：表征大电流下正向电流放大系数下降的膝点电流

IKR：大电流下反向电流放大系数下降的膝点电流

四、EM - 3模型

3. 基区扩展效应对渡越时间的影响

由于基区扩展效应(Kirk效应)等的影响，使渡越时间随工作电压和工作电流发生变化。

为此采用下述表式进行修正：

$$T_F = T_{F0} [1 + X_{TF} (I_{CC} / (I_{CC} + I_{TF}))^2 \exp(V_{b'c} / 1.44 V_{TF})]$$

新增3个模型参数。

XTF(表征偏置条件对渡越时间影响的偏置系数)；

ITF(表征 I_{CC} 对渡越时间影响的特征电流)；

VTF(表征 $V_{b'c}$ 对渡越时间影响的特征电压)。

五、EM - 1、EM - 2和EM - 3中的模型参数

上面介绍的基本等效电路中涉及29个模型参数。下表总结了每个参数对应的物理模型，以及在何种工作状态下必需考虑该参数。

	参数含义	正向工作状态	反向工作状态
EM-1	晶体管饱和电流	IS	
	电流发射系数	NF	NR
	最大电流放大系数	BF	BR
EM-2	串联电阻	RE、RB、RC	
	势垒电容	(CTED、VJE、MJE) (CTC0、VJC、MJC) (CTS0、VJS、MJS) (FC)	
	扩散电容	TF	TR
EM-3	Early 电压	VA(VAF)	VB(VAR)
	漏饱和电流	ISE	ISC
	漏电流发射系数	NE	NC
	大注入膝点电流	IKF	IKR
	大电流和高电压对 TF 的影响	XTF、VTF、ITF	

基本的双极晶体管模型参数

参数	含 义	单位	默认值	在下述正向放大状态分析中是否必须考虑		
				小电流	一般情况	大功率
IS	晶体管饱和电流	A	1.0E-14	√	√	√
BF	共射极正向电流放大系数	-	100	√	√	√
BR	共射极反向电流放大系数	-	1.0			
NF	正向电流发射系数	-	1.0	√	√	√
NR	反向电流发射系数	-	1.0			
RE	发射极串联电阻	ohm	0		√	√
RC	集电极串联电阻	ohm	0		√	√
RB	基极串联电阻	ohm	0		√	√
VA _F	正向厄利电压	V	∞			√
VA _R	反向厄利电压	V	∞			
IK _F	正向大注入膝点电流	A	∞			√
IK _R	反向大注入膝点电流	A	∞			
ISE	BE 结饱和电流	A	1.0E-14	√		
ISC	BC 结饱和电流	A	1.0E-14			
NE	BE 结发射系数	-	2.0	√		
NC	BC 结发射系数	-	2.0			
CJE	发射结零偏势全电容	F	0	√	√	√
VJE	发射结内建电势	V	1.0	√	√	√
MJE	发射结梯度因子	-	0.5	√	√	√
TF	正向渡越时间	s	0	√	√	√
TR	反向渡越时间	s	0			

六、其他效应的考虑

在PSpice模拟软件采用的双极晶体管模型中，还同时考虑许多其他问题。例如：

模型参数随温度的变化(包括晶体管饱和电流、漏电流、电流放大系数、串联电阻、势垒内建电势、结电容等参数)；

噪声模型；

禁带宽度参数等等。

使双极晶体管模型参数总数达到**60**个。

七、获取晶体管模型参数的基本方法

(1) 分别测定法：通过测量器件的某些特性，直接得到或者推算出某些模型参数值。

优点：方法直观、明确，可以直接测得模型参数值，并且能直接反映出模型参数随工作状态的变化。

缺点：需要仪器较多，有些仪器很昂贵，很难实现自动化。而且有一部分参数不能直接测得。

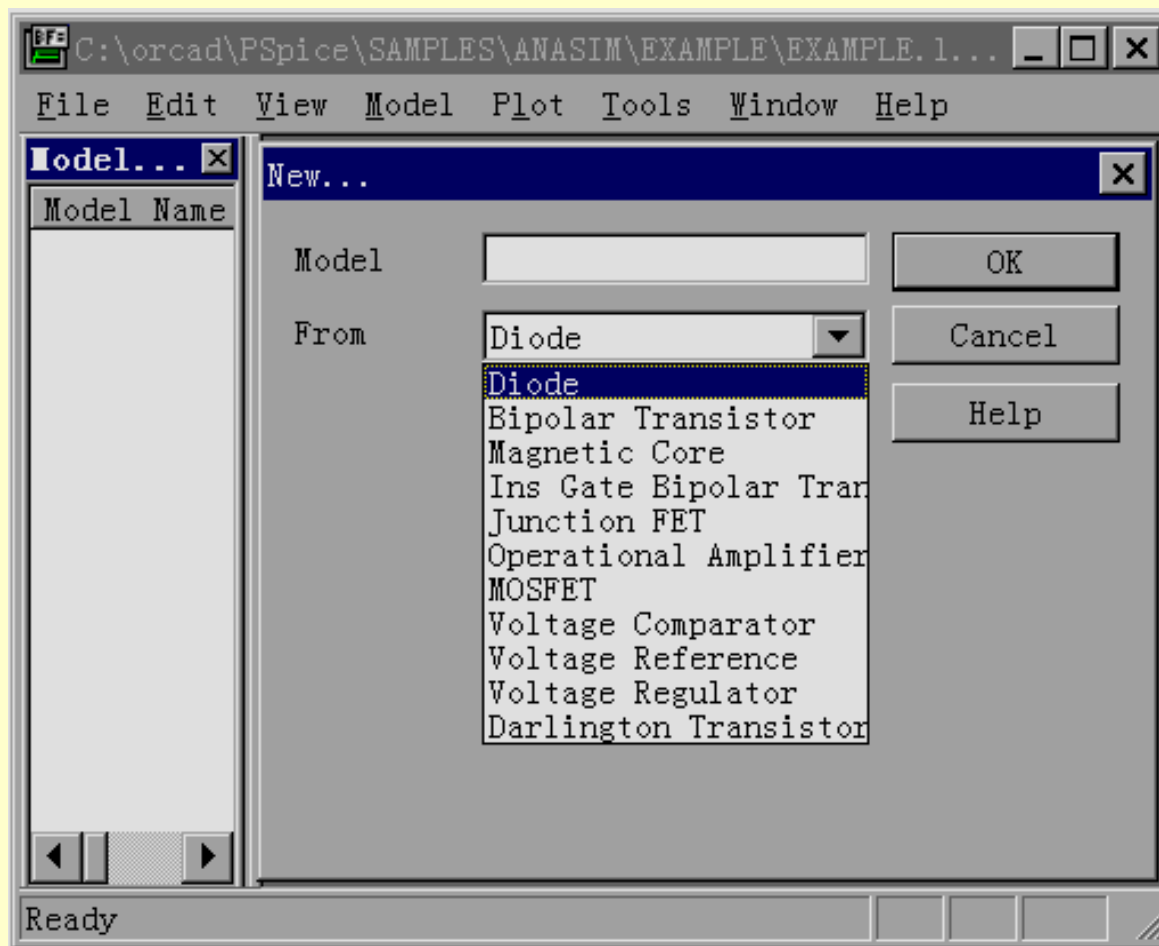
参见Ian. E. 格特鲁著“双极型晶体管模型”一书。

(2) 模型参数的优化提取：以测定的一组器件端特性为出发点，根据器件模型，首先人为选定一组模型参数值(初值)，代入模型，计算相应的端特性，并与测定的端特性进行比较。若不符合，则修订模型参数值，直到采用这组参数值计算的端特性与测量的端特性基本符合，则该组模型参数值就是该器件的模型参数。这是目前获得模型参数的常用方法。

在比较的过程中，如何修正模型参数值，是优化算法解决的问题。

OrCAD/PSpice软件包提供有模型参数提取模块ModelED。在提取过程中，对不同类型的器件，按照对话框提示，输入相应的器件端特性测量数据，ModelED模块即提取出相应的模型参数。

七、获取晶体管模型参数的基本方法

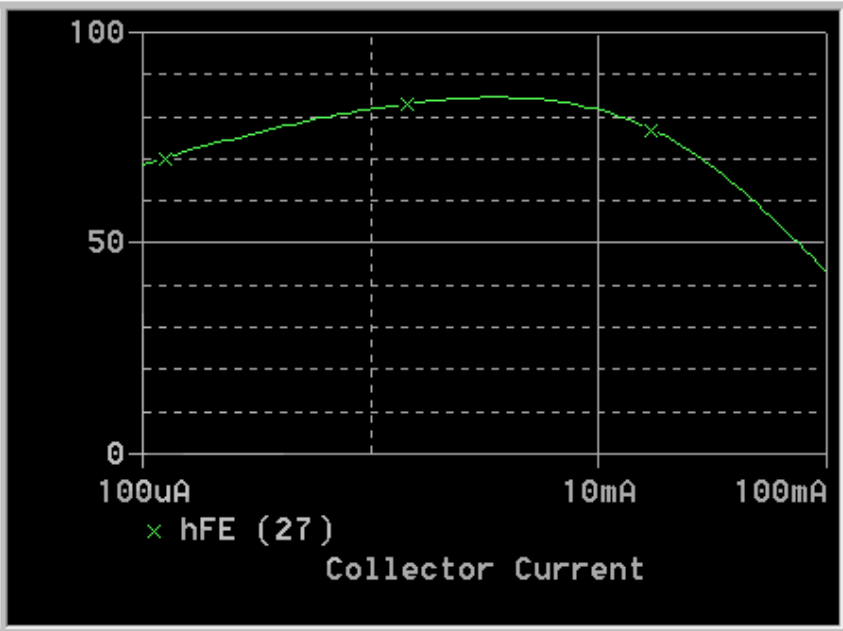


Forward DC Beta

To include this spec in the extraction please enter two more

#	Ic	hFE
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		

Vce:



Parameters

Paramet	Value	Minimum	Maximum	Default	Active	Fixed
IS	1e-014	1e-020	1e-006	1e-014	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
BF	100	1	1500	100	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
NF	1	0.8	1.2	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
VAF	100	0	1000	100	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
IKF	80m	0.01	20	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ISE	1e-013	0	1	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
NE	1.5	1	2	1.5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
BR	1	0.1	500	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

七、获取晶体管模型参数的基本方法

(3) 计算机模拟法。

首先通过工艺模拟得到器件内部杂质分布。

再结合器件版图设计尺寸，通过器件模拟，得到器件的端特性。

最后采用优化提取方法，从器件端特性中提取出模型参数。

优点：全过程均由计算机完成。

缺点：由于工艺模拟和器件模拟的精度尚未达到实用程度，使这种方法尚不能满足实际需要，目前尚未实用。