

微波 HBT 建模技术研究综述

孙玲玲, 刘 军

(杭州电子科技大学微电子 CAD 中心, 浙江杭州 310018)

摘 要: 本文对微波异质结双极型晶体管(HBT)发展及其应用现状、用于 HBT 器件的等效电路模型,以及 HBT 器件大、小信号建模技术、模型参数提取方法及研究进展进行述评。

关键词: 异质结双极型晶体管(HBT); 大信号; 小信号; 模型; 参数提取

中图分类号: TN386 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2005) 02-0336-05

Review of Microwave HBT Modeling Technique Research

SUN Ling-ling, LIU Jun

(Microelectronic CAD Center, Hangzhou University of Electronic Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310018, China)

Abstract: Microwave HBTs' development and application status, equivalent circuit models used in HBTs, its large- and small-signal modeling technique, parameter's extraction methods and research progresses are reviewed.

Key words: heterojunction bipolar transistors(HBT); large-signal; small-signal; model; parameter extraction

1 引言

得益于异质结结构, HBT(Heterojunction Bipolar Transistors, 异质结双极型晶体管)成为迄今为止最具发展潜力的半导体器件之一。HBT 器件在发射区采用宽带隙材料,基区则采用窄带隙材料制备。在一个 NPN 型的晶体管中,该结构在促进发射区电子向基区入射的同时限制了空穴从基区向发射区的入射,从而有效的提高了发射极的入射效率,这一优势即使在基区高掺杂、发射区掺杂很轻的情形下依然能够维持。而异质结所特有的物理及电特性则给器件模型的准确建立带来了相当的困难,HBT 模型的准确建立,成为近年来学术界及工业界研究的热点。

鉴于微波、毫米波和高速数字 HBT IC 已在频率从 0.9GHz 到 100GHz 的微波功率和低功率无线通讯中得到广泛应用,而作为 RF/MMIC CAD 仿真的关键技术,该类器件大、小信号等效电路模型却未形成统一的模型拓扑和相应的参数提取方法,对各种建模技术的研究还没有文献进行专门的报道。本文试图对见于文献报道的 HBT 等效电路模型构建方法、种类、模型参数提取方法及模型应用现状作一综述。

2 HBT 器件发展及应用现状

目前 HBT 器件多采用 SiGe 或者 III-V 族化合物等材料制备,图 1 给出了常用于 HBT 器件制造的材料晶格常数及其能带隙,表 1 则对典型 HBT 材料系统及其性能进行了简单对比。其中, SiGe HBT 为双异质结双极型晶体管,器件结构报道

以来^[1] f_T 高达 116GHz^[2]、130GHz^[3], f_{max} 高达 130GHz^[4] 以及和 CMOS 工艺相结合 f_{max} 高达 180GHz^[5] 器件也已见于报道,该器件已完全可与现有的 18 微米 CMOS 工艺相结合^[6,7]。在 BiCMOS 的工艺中,ASIC 和 SiGe HBT 电路的结合应用也大量见于报道。在 10GHz 以上的光通讯系统中, SiGe HBT 也被看作首选技术,但无可避免的一个缺陷是 Si 基相对较低的击穿电压。

III-V 族化合物中, AlGaAs/GaAs 和 InGaP/GaAs 多用于制备单异质结 HBT 器件,器件以 AlGaAs 形成宽带隙的发射区,以 GaAs 制备 p-型基区。和 SiGe-HBT 相似,使用 InP 基底上生长的 InP/InGaAs 和 InAlAs/InGaAs 制备的 HBT 为双异质结 HBT

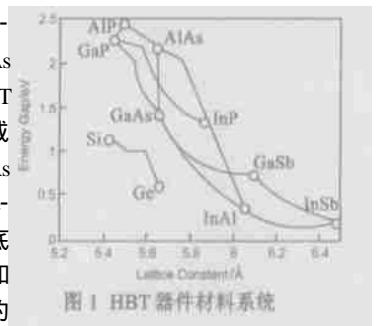


图 1 HBT 器件材料系统

(DHBT),其发射区和集电区都是宽带隙材料。和单异质结结构相比, DHBT 的优势在于其相对较高的击穿电压和低的补偿电压,但在低电压应用场合其 Knee 电压往往较差;以速度而论, III-V HBT 可以说是迄今为止速度最快的半导体器件, f_T 为 150GHz 左右, f_{max} 超过 250GHz^[10,11] 的 GaAs HBT 和 f_T 高于 450GHz^[12], f_{max} 超过 800GHz^[13] InAlAs/InGaAs HBT 已见于报道,但相对 GaAs HBT 而言, InAlAs/InGaAs HBT 器件集成度偏低(单位面积少于 1000 个晶体管)。最近几年中, HBT 在 III-V

表 1 典型 HBT 器件材料系统及其性能

Materials	Current Gain	f_T (GHz)	f_{max} (GHz)	Materials	Current Gain	f_T (GHz)	f_{max} (GHz)
AlGaAs/ GaAs	12,500	171	350	Inp/ InGaAs	49,000	175	180
AlGaAs/ Ge/ GaAs	300			-SiC/ Si	300	30	
Inp/ InGaAsP	112,00			Pbly-Si/ Si		74	
GaInP/ InGaAs	2,690	50	116	Pbly-Si/ SiGe			53
InAlAs/ InGaAs	39	130	230	Si/ SiGe	5,000	116	120

族 IC 中的市场份额在不断增加。因性价比相对较低, GaAsMESFETs 和基于 MESFET 的微波毫米波集成电路 (MMIC) 仍然是当今蜂窝电话的关键部件^[14], 但其构建的电路需要双电压供电且电路尺寸较大, 需要高的性价比 (PAE) 来延长电池组的使用时间; 相对而言 HBT 能提供更好的性能但价位更高。III-V HBT 在 0.9/1.8 GHz 能提供高的电流增益和 PAE, 被看作 3 V 下高功率放大器的首选器件^[15], 文献^[16]则报道了一应用于 1.8 GHz、基于 AlGaAs/ GaAs HBT、62% PAE 的 2W MMIC。此外, III-V HBT 低的相位噪声系数使其在数字电路应用中也具有极大的吸引力。

3 可用于 HBT 器件的等效电路模型及模型应用现状

HBT 可以归于新的器件类型, 但其基本工作原理和一般的 BJT 相比并没有本质的区别^[17]。基于这一认识, 直接或间接采用早期传统的 BJT 模型 (如 E-M、G-P) 和之后出现的高级 BJT 模型成为自然而然的选项。早期 EM 模型^[18]仅由 2 个分别和电流源并联的二极管构成, 二极管和器件结相对应, 用于表征基区载流子入射效应; 电流源则用于表征载流子基区渡越, 该电流较小, 模型在电流传输因子 α 中对其作了考虑。其后的版本则开始考虑端口的接触和引线电阻效应、耗尽区以及其它寄生电容等效效应。和 E-M 模型不同, S-CP (SPICE G-P)^[19]模型建立了端电流和基区少数载流子存储效应的关系, 使得该模型和 EM 模型相比物理意义更为明确, 由此也成为双极型晶体管模型的工业标准, 模型虽存在多种限制, 但迄今为止仍没有一个能被广泛接受的模型可以替代它^[20]。其后出现的模型如 VBIC^[21]在 GP 模型基础上直接扩张而来, 有着广泛的公共研究基础, 模型拓扑相对简洁; MEXTRAM 由 Philips 研究中心开发, 目前最新的版本为 Level 504^[22], 该模型详尽考虑了 BJT 中的各种物理效应, 但模型拓扑极为复杂。同样的问题也存在于 HICUM^[23,24]中。值得注意的是, 以上涉及到的各类模型多基于 Si 基或 SiGe 工艺开发, 用于 III-V 族化合物 HBT 时模型缺乏针对性, 且多存在模型拓扑网络和器件实际物理结构及相关寄生效应无法严格对应、模型参数提取技术难以开发、模型参数值难以提取或参数值物理意义不明确等缺陷。

在已有的建模手段基础上, 以下几种方式则常用于构建 HBT 器件新模型: (1) 对 E-M、G-P 模型进行改进, 对 HBT 器件如异质结势垒阻挡效应、双异质结器件缓变结 Early 效应、基-集结间的附加 Kirk 效应^[25]等不同于传统 BJT 器件的物理效应进行表征, 发展能尽可能正确表征相关工艺 HBT 特性的新

模型, 或者直接开发新模型 (如 Agilent HBT^[26])。 (2) 直接使用电路仿真器 (如 SPICE、PSPICE) BJT 宏模型替代 HBT 模型, 或在宏模型拓扑外围添加部分元件来表征 HBT 不同于 BJT 的物理效应并用于参数提取^[27-29]。 (3) 和 (2) 相似, 使用新的 BJT 模型如 VBIC、MEXTRAM 模型直接替代 HBT 模型并用于参数提取。方式 (1)

所建模型精度较好, 建模方法灵活, 参数提取过程相对复杂, 但新模型的开发周期长、难度大, 模型方程及相关参数提取算法的最终确定必须以大量的测试、统计数据为基础。方式 (2) 和 (3) 模型方便易得, 可直接和相关的电路仿真器相结合, 建模的核心在于参数的精确提取。但即使部分结构可通过物理分析来精确推导, 模型本身的缺陷和这种只能在外围的表征严重限制了模型的改进余地和精度; 且基于电路仿真器的参数提取过程严重依赖于曲线拟合时所设定的初值, 模型过多的未知参数也给参数提取和值的全局最优优化带来很大困难。

4 HBT 小信号建模及其参数提取

HBT 电路级小信号模型多采用基于传统 BJT 模型改进的 T 型拓扑 (图 2), 且拓扑结构日趋稳定。对其研究多集中于针对确定的模型拓扑, 从多频率和多偏置点下实测 S 参数以及端口 I-V 特性中提取模型参数的方法和算法的改进。以参数提取算法不同, 模型大致可以分为以下三类: (1) 解析模型: 模型参数直接从解析公式分析得到; (2) 数值模型: 模型参数完全通过数值分析和最优化得到; (3) 半解析模型: 部分模型参数从解析公式分析得到, 部分参数则结合实际情形通过数值最优化得到。

自提出采用解析法提取 HBT 小信号 T 型拓扑模型参数以来, 这一方法得到广泛研究并日渐成为小信号模型参数提取的主流方法。1992 年, D R Pehlke 采用该方法对 HBT 器件发射极参数提取进行了大量的分析, 并借助这一技术对一 HBT T 型

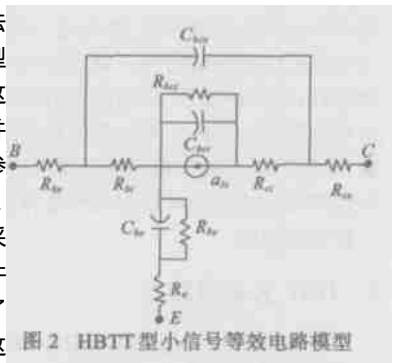


图 2 HBT 小信号等效电路模型

小信号等效电路模型拓扑参数进行了推导和提取, 但对基区分布效应的疏忽, 导致非物理意义发射极频率特性和负集电极串联电阻的出现。针对这一缺陷, S J Spiegel 等人在 D R Pehlke 的基础上将基-集电容分成本征与非本征两部分, 使等效电路与器件的物理结构密切相关; C J Wei 等人则对 D R Pehlke 用于提取发射极元件参数与时延参数值的最优化方法作了改进, 并提出采用 hybrid-T 等效电路模型来直接提取相关参数, 这一拓扑结构类似于 HBT 的物理结构, 并可直接从多偏置条件下多频率点实测 S 参数来提取参数, 所提取的参数值基本与频率无关。不足的是 C J Wei 对共基极电流放大系

数 采用一阶近似表达式, 忽视了由于时延 引起的超相位因子的影响。

针对确定的模型拓扑, 以解析法提取模型参数时不得进行相当的假设和近似, 具体应用时, 针对不同工艺条件、器件结构、应用场合的差别相关假设与近似条件必须做相应的修正与调整以和实际情形相适, 由此给模型参数的最终提取和确定带来极大的困难。针对这一问题, 诸多文献在解析法提取模型参数过程中或者引入数值最优技术、或者开发无需任何数值最优技术的纯解析法用于模型参数的选取。此外, 在寻求 HBT 小信号参数提取的标准算法过程中, 已有 GaAs 族其他晶体管模型参数求解的方法也不断得到借鉴。如文献 [38, 39] 认为 GaAsMESFET 模型本征与非本征参数中存在密切的联系, 而利用种联系相关参数可以得到一个较小的优化搜索区。因此文献 [40] 针对传统方法中需要一个额外的优化过程和取值对初始值的依赖性等缺点, 利用文献 [38, 39] 提出的算法, 结合最优化技术, 由小量运算即较精确得到一功率 HBT 小信号模型参数值。

用解析法提取确定模型拓扑结构参数过程中所需的测试结构(如短路、断路、负载或构建额外测试结构等)、晶体管的工作状态(截止、击穿、饱和、放大区等)、测试数据类型(S 参数、 Z 参数、 $C-V$ 特性、 $DC-I$ 特性、功率特性等)和所需数据量的多少、参数的提取顺序(如和以往文献多选择在提取本征元件参数值之后提取非本征区元件值不同, 亦可在提取非本征元件参数之前提取本征元件参数值)和彼此之间的相关性, 通常由针对确定的模型拓扑推导其 s 和 z 参数表达式, 并在此基础上对相关表达式所作的不同近似和假设条件共同确定。事实上, 采用解析法提取模型参数时, 用于参数提取的实测 s 参数频率多低于器件实际使用频率, 模型参数在应用于高频场合往往出现问题, 解决这一问题的方法如: 直接从器件几何版图或是测试结构中得出某些元件值, 以减少待提取参数数目; 对某些参数, 尽可能采用解析算法来求解; 结合 EM 仿真提取封装器件外围封装结构寄生效应; 通过构建误差函数, 对最不可靠的元件值进行加权, 采用数值方法从测量 S 参数的拟合过程中来提取元件值等在实际参数提取中也得到了较多的应用。

5 HBT 大信号建模

在架构 HBT 本征区模型拓扑和模型方程过程中, 传统 EM 模型和 GP 模型成为主要研究对象, 并直接或间接用于新模型的构建和开发。传统 EM 模型未考虑空间电荷区和表面区的载流子复合效应, 而其很大程度上限制了 HBT 电流增益, 表面区电荷复合效应除出现在最早期的 BJT 模型分析中外, 在 HBT 电路级模型中可忽略。基于此, P Chris Grossman^[44] 等人对 EM 模型作了改进, 建模过程中考虑了和传输时间相关的集电区、基区和发射区电荷、电流方程; 同时在常数 I_b 条件下推导了用以表征器件自热效应的子电路模型。不足的是, 由于限定了 I_b , 不能保证模型在其他条件下也一样正确, 而且模型拓扑复杂, 部分参数必须通过半导体物理分析来获得, 若对制造工艺没有细节性的了解, 相关参数难以提取。Ke Lu^[17]

等人则在假定流过 B-E 异质结的电压和电流如一般的同质结一样可以用指数函数来描述, 且 Webster 效应可忽略的基础上对 EM 模型进行改进。模型以 2 个和温度相关的二极管和 2 个非线性电阻表征器件的 DC 特性; 以多个非线性电容来表征器件的动态特性。其中, 以结电容 C_{je} 同时表征基区的耗散电容和相关的扩散电容, 耗散电容皆以式: $C_j(V_j) = C_j(0) / (1 - V_j / V_j)^N$ 近似, 但当此式所得数据和测量数据有较大差别时, 文献则通过由曲线拟合得到一些可选方程予以补充。和 EM 模型相比, GP 模型电荷方程更适于表征器件任意入射水平和掺杂浓度对器件特性的影响, 针对传统模型无法精确表征饱和、基区大注入以及结和结之间的调制效应等问题, 在 GP 模型基础上推导的、适用于单、双异质结的电荷控制方程及拓扑结构逐渐占据主导地位。

对于自热效应, 通常认为在确定的直流偏置点, HBT 器件内部各点温度可以通过求解 2-D 或 3-D 热电流方程得到。事实上, 器件内部的温度分布即使在同一指结的不同点上也不相同, 因此在建模过程中必须考虑器件温度的非均匀性, 并针对模型不同组分相应作出表征。作为一维近似, 假定 HBT 中温度为常数, 文献 [17] 推导得出了一热子电路模型(图 3), 并被其后的诸多文献广泛引用。相似的, 文献 [46] 通过对自热效应进一步研究后认为: 1. 温度升高对器件性能的影响主要表现在发射结, 由此引入可热等效电阻 R_{th} 来表征结温的变化, 并仅以发射结温度的变化来替代整个器件的温度变化。简单起见, 文献在仿真过程中将 R_{th} 设为常数。2. 随着器件温度的上升, 器件发射结内建电势下降、从基区到发射区反向空穴注入增加; 前者表现为 V_{be} 不变时, 集电极电流增加; 后者表现为 I_b 保持不变时, 集电极电流随 V_{ce} 的增加而减少。结合前者, 文献推导了热等效电路模型, 并同样以一子电路模式描述。和上述方法不同, 文献 [47] 通过在 T 型小信号拓扑基础上简单引入一电流控制电压源和电阻 R_1 、 R_2 来表征自热效应, 试图避免以往文献在推导热等效电路过程中复杂的热-电分析, 模型拓扑简单, 且和小信号模型结合较好。

在尝试更为精确表征 HBT 器件异质结特性时, 传统等效电路模型及已有模型方程已无法满足设计方对模型精度要求的日渐提高, 由此诸多文献开始采用基于器件物理结构并结合半导体输运平衡方程、量子力学、流体力学等相关领域研究成果和手段, 对 HBT 器件缓变和突变异质结电荷的生成和复合、Early、电荷传输等物理机制进行更为精确的描述, 并试图开发更为精确的模型及模型参数提取算法^[48, 49]。

值得注意的是, 在 HBT 大信号建模及模型参数提取过程中: 如在时域表征 HBT 电荷动态存储特性^[50]; 基于器件物理版图对高功率 HBT 器件输入/出互连特性采用集总元件进行建模, 并在互连线模型中同时对基区、集电区分布特性进行表征^[51]; 使用图像处理技术直接从芯片 SEM(surface-mounted device) 照片获得器件互连和封装特性信息, 采用 3-D EM 仿真, 对高频功率管片内互连线几何结构、内部匹配、以及小信号特征的封装进行建模, 以求对高功率 HBT 器件包括热效应在内

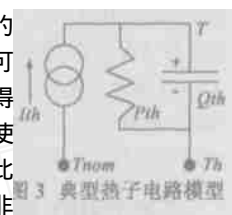


图 3 典型热子电路模型

(非线性)特性以及互连线和封装(线性)特性的精确表征等技术的应用,为相关模型尤其是功率器件模型建模和参数提取提供了诸多可选方案。

6 总结和展望

迄今为止,见诸于文献的 HBT 大、小信号模型只能是近似的精确。小信号模型拓扑未见大的改变,见诸于报道的文献主要集中在对其参数提取算法的改进上,大信号模型的构建或改进至今也没有令人惊喜的进展。诸多已见诸于报道不同于 BJT 的效应(如高电流下基区电流模型、基-集间电压对集电极电流的调制效应等)在迄今为止的 HBT 建模文献中也未见解决方案;从 S 参数中提取电容等参数,不可能从原理上精确描述器件电荷存储效应、以及载流子生成、复合等效应;异质结中电荷的存储效应建模依然是难点;仿真器本身的缺陷有时也会使得即使是明显精确的模型其测量和仿真数据的严重不符。当前主要的建模思路仍是在保证模型物理意义明确的前提下,寻求模型精度和简洁之间的折衷,同时兼顾模型的一般性。

参考文献:

- [1] S Iyer, G Patton, et al. Silicon-germanium base heterojunction bipolar transistors by molecular beam epitaxy[J]. IEEE Trans, 1988, Electron Device Letters-4(9):165 - 167.
- [2] A Sch öppen, et al. SiGe HBTs with high at moderate current densities [J]. IEEE Trans, 1994 Electron Device Letters-14(30):1187 - 1188.
- [3] K Oda, et al. 130-GHz f_T SiGe HBT technology[A]. Intl. Electron Devices Meeting [C]. Washington, DC USA: IEEE press, 1997. 791 - 794.
- [4] A Sch öppen, et al. Enhanced SiGe heterojunction bipolar transistors with 160-GHz f_{max} [A]. Intl. Electron Devices Meeting[C]. Washington, DC USA: IEEE Press, 1995. 743 - 746.
- [5] Katsuyoshi Washio, et al. A 0.2- μm 180-GHz f_{MAX} 6.7-ps² ECL SOI/HRS Self-Aligned SEG HBT/CMOS technology for microwave and high-speed digital applications[J]. IEEE Trans, Electron Device, 2002, 2(49).
- [6] G Freeman, et al. A 0.18m 90 GHz f_T SiGe HBT BiCMOS, ASIC-compatible, copper interconnect technology for RF and microwave applications[A]. Intl Electron Devices Meeting [C]. Washington, DC USA: IEEE Press, 1999. 569 - 572.
- [7] W Klein, et al. 75-GHz bipolar production technology for the 21st century[A]. 29th European Solid-State Device Research Conference [C]. Leuven, Belgium, IEEE Press, 1999. 88 - 94.
- [8] S Subbanna, et al. Review of silicon-germanium BiCMOS technology after 4 years of production and future directions[A]. Tech Dig GaAs IC Symp [C]. Seattle, USA: IEEE Press, 2000. 7 - 10.
- [9] A Sch öppen. SiGe HBTs for mobile communications[J]. IEEE Trans, Solid-State Electron, 1999, 43:1373 - 1381.
- [10] T Niwa, et al. High- f_T AlGaAs/InGaAs HBTs with reduced emitter resistance for low-power-consumption, high-speed ICs[A]. Proc Intl Symp on Compound Semiconductors[C]. Bristol, UK, 1999. 309 - 312.
- [11] T Oka, et al. Advanced performance of small-scaled InGaP/ GaAs HBTs with over 150 GHz and over 250 GHz[A]. Intl. Electron Devices Meeting [C]. Washington, DC USA: IEEE Press, 1998. 653 - 656.
- [12] Walid Hafez, et al. Vertical scaling of 0.25- μm emitter InP/InGaAs single heterojunction bipolar transistors with f_T of 452 GHz[J]. IEEE Trans, 2003, Electron Device Letters-7(24).
- [13] Q Lee, et al. Submicron transferred-substrate heterojunction bipolar transistors[J]. IEEE Trans, Electron Device Letters, 1999, 8(20):396 - 398.
- [14] J-E Müller, et al. A small chip size 2 W, 62% efficient HBT MMIC for 3 V PCN applications [J]. IEEE Trans, 1998, Solid-State Circuits, 9(33):1277 - 1283.
- [15] K Yamamoto, et al. A 3.2-V operation single-chip dual-band AlGaAs/GaAs HBT MMIC power amplifier with active feedback circuit technique [J]. IEEE Trans, Solid-State Circuits, 2000, 8(35):1109 - 1120.
- [16] W Okamura, et al. K-Band 76% PAE InP double heterojunction bipolar power transistors and a 23 GHz compact linear power amplifier MMIC[A]. GaAs IC Symp [C]. Seattle, USA: IEEE Press, 2000. 219 - 222.
- [17] Ke Lu, et al. A new large-signal AlGaAs/GaAs HBT model including self-heating effects with correspond parameter-extraction procedure[J]. IEEE Trans, Microwave Theory Tech, 1995, 7(43):1433 - 1445.
- [18] S M Ze. Physics of semiconductor device[A]. Wiley Interscience [C]. New York, USA: IEEE Press, 1981.
- [19] H K Gummel, et al. An integrated charge control model of bipolar transistors[A]. Bell Syst Tech J [C]. Bell Laboratories, Murray Hill, NJ, 1970. 49. 827 - 850.
- [20] Fujiang Lin, et al. Extraction of VBIC Model for SiGe HBTs Made Easy by Going through Gummel-Poon Model [M/OL]. Singapore Microelectronics Modeling Center (SMMC), Agilent Technologies. www.agilent.com, 2000.
- [21] C McAndrew, et al. VBIC95: An improved vertical, IC bipolar transistor model[A]. Proceedings of the 1995 BiCMOS Circuits and Technology Meeting [C]. Minneapolis, MN USA: IEEE Press, 1995. 170 - 177.
- [22] J C J Paasschens, et al, The Mextram Bipolar Transistor Model level 504[R]. Nat. Lab. Unclassified Report NL-UR 2000/811, 2001.
- [23] H Stubing, H M Rein. A compact physical large-signal model for high-speed bipolar transistors at high current densities-part I: one-dimensional model[J]. IEEE Trans Electron Devices, 1987, 34:1741 - 1751.
- [24] H M Rein, M Schroter. A compact physical large-signal model for high-speed bipolar transistors at high current densities-part II: two-dimensional model and experimental results [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1987, 34:1752-1761.
- [25] Clemens N Rheinfelder, et al. Nonlinear Modeling of SiGe HBT's up to 50GHz[J]. IEEE Trans, Microwave Theory Tech, 1997, 12(45):2503-2508.
- [26] Masaya Lwamoto, et al. Agilent HBT: A Large-Signal Model for GaAs and InP HBTs [M/OL]. Agilent Worldwide Process and Technology Centers, www.agilent.com, 2003.
- [27] J J X Feng, et al. A physics-based HBT SPICE model for large-signal applications [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1995, 1(42):8 - 14.
- [28] Apostolos Samelis, et al. Large-signal characteristics of InP-based heterojunction bipolar transistors and optoelectronic cascode tran-

- impedance amplifiers [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1996, 12 (43): 2053-2061.
- [29] Morten Olavsbråte, et al. A practical method of parameter extraction for the VBIC model used on a GaAs HBT[A]. GaAs IC Symp[C]. Seattle, USA: IEEE Press, 2000.
- [30] D R Pehlke, et al. Evaluation of the factors determining HBT high frequency performance by direct analysis of s-parameter data [J]. IEEE Trans Microwave Theory Technology, 1992, 40: 2367 - 2373.
- [31] S J Spiegel, et al. Extraction of the Inp/ GaInAs heterojunction bipolar transistor small-signal equivalent circuit [J]. IEEE Trans, Electron Device, 1995, 6(42): 1059-1064.
- [32] C J Wei, et al. Direct extraction of equivalent circuit parameters for heterojunction bipolar transistors [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1995, 9(43): 2035 - 2040.
- [33] B Lin, S Prasad. Basic expressions and approximations in small-signal parameter extraction for HBT's [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1999, 5(47): 534 - 539.
- [34] M Rudolph, et al. Direct extraction of HBT equivalent-circuit elements [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1999, 1(47): 82 - 84.
- [35] I Timmins, et al. An efficient systematic approach to model extraction for passive microwave circuits [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 2000, 9(48): 1565 - 1573.
- [36] Martin W Dvorak, et al. On the accuracy of direct extraction of the heterojunction bipolar-transistor model parameters $C_{sub} / \pi / /$, $C_{sub} BC$, and $R_{sub} E$ [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 2003, 6(51): 1640 - 1649.
- [37] Kambiz Munshi, et al. Small signal and large signal modeling of HBT's using neural networks[A]. TELSIKS[C]. Electronic Engineering, University of Nis, Serbia Montenegro, USA: IEEE Press, 2003. 565 - 568.
- [38] Ban-Leong Ooi, et al. A novel approach for determining the GaAs MES-FET small-signal equivalent-circuit elements [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1997, 45: 2084 - 2088.
- [39] K Shirakawa, et al. An approach to determining an equivalent circuit for HEMTs [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1995, 43: 499 - 503.
- [40] W Kim, et al. The effects of Cbc on the linearity of ALGaAs/ GaAs power HBTs [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 2001, 7 (49): 1270 - 1276.
- [41] T S Hong, et al. An intrinsic-inductance independent approach for Direct extraction of HBT intrinsic circuit parameters [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 2001, 12(49): 2300 - 2305.
- [42] Sami Bousnina, Technology. An accurate on-wafer deembedding technique with application to HBT devices characterization [J]. IEEE Trans Microwave Theory Technology, 2002, 2(50): 420 - 424.
- [43] B Willen, et al. Improved automatic parameter extraction of InP-HBT small-signal equivalent circuits [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 2002, 2(50): 580 - 583.
- [44] P Chris Grossman, et al. Large signal modeling of HBT's including self-heating and transit time effects [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1992, 3(40): 449 - 464.
- [45] Chetan D Parikh, et al. A new charge-control model for single and double-heterojunction bipolar transistors [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1992, 6(39): 1303 - 1311.
- [46] Q M Zhang, et al. A new large-signal HBT model [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1996, 11(44): 2001 - 2009.
- [47] Akhil Gariapati, et al. A unified model for single/Multi-finger HBT's including self-heating effects [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 2001, 1(49): 186 - 191.
- [48] Douglas A teeter, et al. Large-signal numerical and analytical HBT models [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1993, 5(40): 837 - 845.
- [49] C J Wei, et al. Waveform characterization and modeling of dynamic charge behavior of InGaP-GaAs HBTs [A]. IEEE MTT-S International [C]. Phoenix, AZ USA: IEEE Press, 2001. 2. 675 - 678.
- [50] Rached Hajji, et al. A systematic layout-based method for the modeling of high-power HBT's using the scaling approach [J]. IEEE Trans, Electron Devices, 1995, 3(42): 528 - 533.
- [51] T Johansson, et al. A novel approach to 3-D modeling of packaged RF-power transistors [J]. IEEE Trans, Microwave Theory Technology, 1999, 6(47): 760 - 768.

作者简介:



孙玲玲 女, 1956年生, 浙江杭州人, 教授, IEEE 会员, 主要研究领域包括微波及深亚微米集成电路 CAD. E-mail: sunll@mail.hz.zj.cn.



刘 军 男, 1977年生, 浙江建德人, 硕士, 主要研究方向为元器件建模及 RF/MMIC 设计.