

一种简化的 VBIC 模型和 InGaP/ GaAs HBT 宽带放大器设计*

孙玲玲 刘 军

(杭州电子科技大学微电子 CAD 研究所, 杭州 310018)

摘要: 采用一种新的简化 VBIC 模型对单、多指 InGaP/ GaAs HBT 器件进行建模. 测量和模型仿真 f_v 特性及其在多偏置条件下多频率点 S 参数对比结果表明, DC ~ 9 GHz 频率范围内, 简化后的模型可对 InGaP/ GaAs HBT 交流小信号特性进行较好的表征. 利用建立的模型设计出 DC ~ 9 GHz 两级直接耦合宽带放大器, 该放大器增益达到 19 dB, 输入、输出回波损耗分别低于 - 10 dB 和 - 8 dB.

关键词: 简化 VBIC 模型; InGaP/ GaAs HBT; 宽带放大器

EEACC: 1220; 1350

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2005)05-0994-05

1 引言

得益于异质结结构, HBT 成为当前最具发展潜力的半导体器件之一, 并在军事、民用等领域获得广泛应用. 但迄今为止, 无论是 -III-V 族化合物还是硅基 HBT 均未形成统一的大、小信号模型及其参数提取方法, 这给基于该类器件的 RF/MMIC 计算机辅助设计(CAD)带来极大的困难. 考虑到 -III-V 族化合物如 InGaP/ GaAs HBT 可归于新的器件类型, 但其基本工作原理和一般的 BJT 相比并没有本质区别, 对基于 Si BJT 工艺开发的 BJT 模型如 VBIC 等进行简化, 并将其直接用于 -III-V 族化合物 HBT RF/MMIC 设计成为诸多射频研究人员的共同选择.

直接耦合微波宽带放大器在 Gbps (Gigabit-per-second) 高数据率光纤通信、仪器仪表、无线通信、蜂窝电话以及卫星接收设备中有着广泛的应用, -III-V 族化合物 HBT 因其高的截止频率、低的 $1/f$ 噪声、更好的绝缘性能及更高的电流增益而成为宽带应用的最佳选择之一. 而以材料和工艺而论, 近年来, InGaP/

GaAs HBT 开始取代 AlGaAs/ GaAs HBT 工艺, 逐渐成为 -III-V 族化合物 HBT 主流工艺.

本文在对文献 [1] 提出的简化 VBIC 模型用于 InGaP/ GaAs HBT 建模的可行性和缺点进行讨论之后, 提出一种新的简化 VBIC 模型, 并尝试将其用于更高频段单指、4 指 InGaP/ GaAs HBT 器件建模. 通过对比模型仿真和重新流片后获得的晶体管单管芯片 f_v 特性及其在多偏置条件下多频率点 S 参数特性后发现, 本文提出的模型在越过 9 GHz 频段时仍然有较高的精度. 之后, 基于自建模型设计的一个 2 级直接耦合宽带放大器得到了流片实现, 经实测, 该放大器在 9 GHz 频率范围内增益达到 19 dB, 输入、输出回波损耗分别低于 - 10 dB 和 - 8 dB, 与设计结果基本吻合. 在设计频段范围内, 模型有较强的实用性, 可用于该工艺线 InGaP/ GaAs HBT RF/MMIC 设计.

2 简化的 VBIC 模型及其交流小信号特性

VBIC (the vertical bipolar inter-company mod-

*国家自然科学基金资助项目 (批准号: 90207007)

孙玲玲 女, 1956 年出生, 教授, IEEE 高级会员, 主要研究领域包括微波及深亚微米集成电路设计及 CAD.

刘 军 男, 1977 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为元器件建模及 RF/MMIC 设计.

2004-06-27 收到, 2004-11-24 定稿

el)^[2,3]模型拓扑如图 1 (a) 所示. 模型基本方程与 SPICE Gummel-Poon (S-GP) 模型相似, 为 S-GP 的直接扩展, 有着广泛的公共研究和应用基础. 该模型自出现以来, 在 Si^[4], SiGe^[5] 和 α -HBT^[5] 器件中得到了广泛的应用, 且成为某些 α -族化合物 HBT 工艺线标准模型并被用于构建模型库.

用于 α -族化合物 HBT 时, 文献[1]认为: (1) NPN 型 HBT 器件中, 寄生 PNP 晶体管效应不存在或极为微弱, 因此对应于 VBIC 模型中的 I_{bcp} , Q_{bcp} , R_{bp} , I_{ccp} 和 R_s 等组分可忽略; (2) 鉴于 Si BJT 中的基-射结和基-集结寄生 OVERLAP 电容在 α -HBT 中不出现, VBIC 模型拓扑结构中的 C_{beo} , C_{bco} 组分在 α -HBT 中可用于表征封装引线寄生电容效应, 对于未加封装的裸片, 相关组分可忽略; (3) α -族化合物 HBT 器件通常必须考虑外基-集结电流和电荷存储, 而这一结构可以通过 VBIC 模型参数的灵活设置, 使用 I_{ccp} , I_{bep} 和 Q_{bep} 来表征; (4) VBIC 模型中 Q_{bcx} 组分用于 α -族化合物 HBT 器件时, 缺乏明确的物理意义, 可删除; (5) 虽然 VBIC 模型方程未能对 HBT 器件热电阻、基-集结和基-射

结电流理想因子以及超相位 (excess phase) 时延的温度相关性, 至少在几个 GHz 频率范围内, VBIC 模型对 InGaP/ GaAs HBT 依然可用; (6) VBIC 模型拓扑结构中, 仅 I_{bex} 中的非理想组分可能会对外基-射结 DC 电流作出贡献, 而对 DC 电流而言, 这一电流较小, 且很难和本征基-射结电流模型进行区分, 由此, 文献把 Q_{bcx} 和 I_{bex} 组分整体作了忽略 (对应于 VBIC 模型参数 W_{be} 值取 1), 得出一简化 VBIC 模型, 并采用该模型对一单发射结指 InGaP/ GaAs HBT 进行了参数提取.

不足的是: (1) 文献没有对简化后模型用于多发射结指器件时的表征能力和精度进行讨论和验证; (2) 仅从对 DC 电流的贡献大小的角度出发, 整体忽略 I_{bex} 和 Q_{bcx} 组分后, 降低了模型在高频段的拟合能力, 模型适用频率范围减小; 而考虑 I_{bex} 和 Q_{bcx} 组分并不影响模型对 DC 电流的表征能力, 或者增加模型参数提取难度. 基于以上考虑, 本文对 VBIC 模型重新进行了简化, 简化后模型拓扑如图 1 (b) 所示, 模型考虑了 I_{bex} 和 Q_{bcx} 组分的影响, 并尝试将其用于某工艺线单、多指 HBT 器件建模.

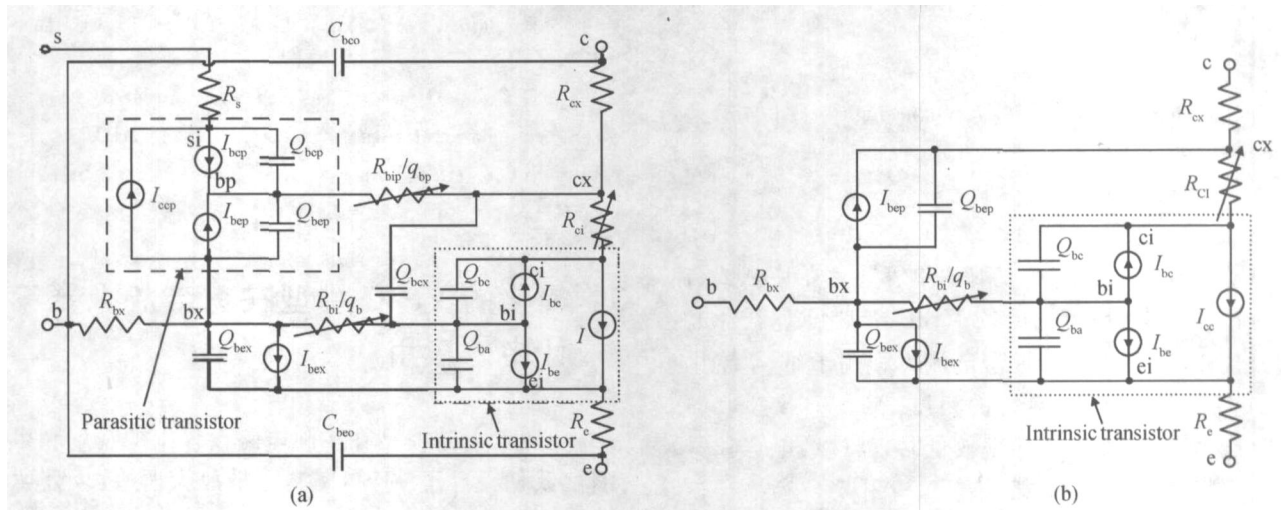


图 1 (a) VBIC 模型拓扑; (b) 简化后的 VBIC 模型拓扑
Fig. 1 (a) VBIC model topology; (b) Simplified VBIC model topology

模型拓扑结构确定之后, 笔者运用 Agilent IC-CAP 模型参数提取软件, 参考标准 VBIC 模型参数提取流程分别对一单发射结指 (尺寸: $1\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$) 和一 4 发射结指 (尺寸: $2\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$) InGaP/ GaAs HBT 模型参数进行了提取. 受条件所限, 实验室目前无法完成自热效应模型参数的测试和提取, 相关参数系由工艺线提供参考值, 并借助最优化流程获取. 模型参数提取完成之后, 在 Agilent ADS2003C

中对模型 $I-V$ 特性及多偏置条件下多频率点 S 参数特性进行了仿真并和测试结果作了对比, 相关曲线示于图 2, 3. 其中, 图 2 (a) 和 (b) 分别为单指和 4 指 HBT 基极电流为 $10 \sim 200\mu\text{A}$, 步进值为 $10\mu\text{A}$, 集电极电压为 $0 \sim 3.5\text{V}$ 条件下 $I-V$ 曲线测量和仿真结果, 两者达到了很好的吻合; 图 3 (a) 和 (b) 则分别给出了基极电流为 $70\mu\text{A}$, 集电极电压为 3.5V 偏压下, $0 \sim 15\text{GHz}$ 频率范围内模型仿真和测量 S 参

数对比.

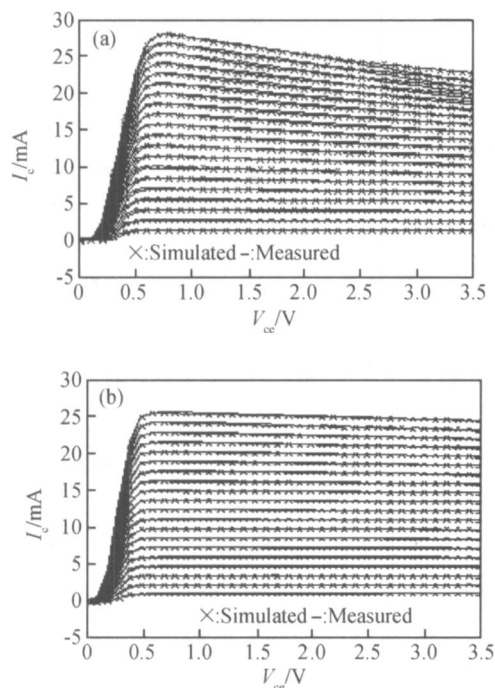


图2 测试和仿真 I_c - V_{ce} 特性对比 (a) 单指 HBT; (b) 4 指 HBT

Fig. 2 Comparison of measured and simulated current-voltage characteristics (a) Single-finger HBT; (b) Four-finger HBT (I_b : 10 ~ 200 μ A; Step: 10 μ A; V_{ce} : 0 ~ 3.5 V; Step: 0.1 V)

从仿真和重新流片获取的单管芯片在片测试结果对比情况来看,简化后的 VBIC 模型可对器件电流特性作出精确表征,模型电流方程用于 β -族化合物 HBT 器件时有较好的精度. 相对对 S 参数的拟合能力而言,在应用频率较低时,器件结电容和器件内部寄生效应较小,模型仿真和测试 S 参数有较好的拟合精度;随着频率的升高,VBIC 漂移电荷方程用于 HBT 器件时过于简单,模型方程无法表征 HBT 器件如异质结额外电荷存储、KirK 等效应的缺点逐渐体现,模型对 S 参数拟合精度降低. 综合考虑工艺线自身容差,从测试和仿真对比结果来看在约 9 GHz 频段范围内,模型有较好的精度,可用于实际电路设计. 值得注意的是,图 3(b)中,模型在频率低端对 4 发射结指 HBT 器件的 S_{21} 拟合较差,系工艺线自身容差及发射结电阻 R_e 提取精度不够引起,一定程度上造成了下文所述放大器低频段实际增益较设计值小的问题.

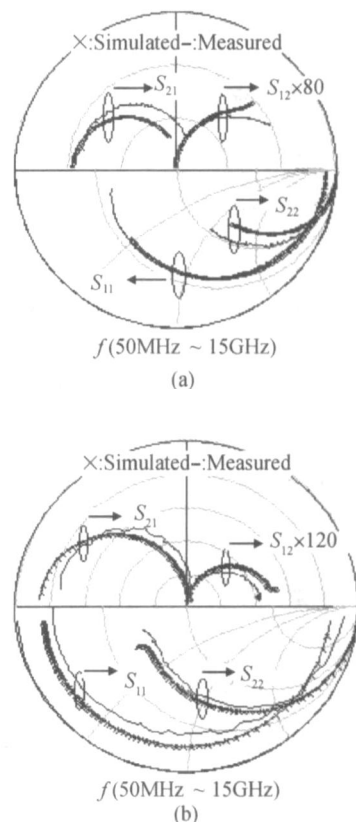


图3 测试和仿真 S 参数特性对比 (a) 单指 HBT; (b) 4 指 HBT

Fig. 3 Comparison of measured and simulated S -parameters characteristics (a) Single-finger HBT; (b) Four-finger HBT (Freq: 50 MHz ~ 15 GHz, Step: 50 MHz; I_b = 70 μ A, V_{ce} = 3.5 V)

3 简化的 VBIC 模型在宽带放大器设计中的应用

为验证所建模型在实际电路设计中的精度和可用性,我们设计了一个 HBT 宽带放大器. 放大器主要设计指标为:频率:DC ~ 9 GHz;增益:19 \pm 0.5 dB;输入/输出回波损耗: < -8;工作电压:3 ~ 5 V. 放大器电路原理如图 4(a)所示,系采用两级级连直接耦合实现. 受篇幅所限,这里不对该放大器实际设计过程进行论述.

图 4(a)中,晶体管 Q1 和 Q2 为单发射结指 HBT, Q3, Q4 和 Q5 为 4 发射结指 HBT. 设计过程中综合考虑了微带线 T 型结、空气桥、通孔等结构引入的非连续性和寄生效应对放大器性能可能造成的影响. 从实际仿真过程来看,微带线尺寸对电路整体性能影响较小,这也给版图设计带来了较大的自

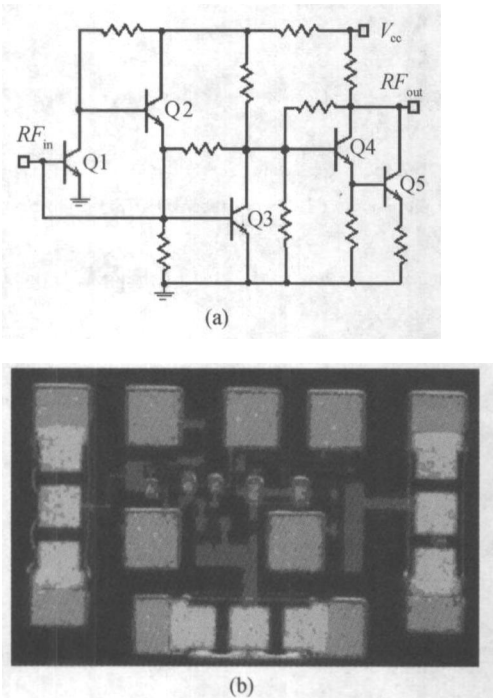


图 4 (a) 宽带放大器电路图; (b) 芯片版图 (尺寸: 0.8mm × 0.9mm)

Fig. 4 (a) Circuit diagram of the broadband amplifier; (b) Chip's layout (size: 0.8mm × 0.9mm)

度度. 为便于在片测试, 版图 (图 4 (b)) 中加入了 G (Ground)-S (Signal)-G (Ground) 型 PAD 结构, 含 PAD 结构版图芯片尺寸为 0.8mm × 0.9mm.

完成放大器设计、流片之后, 还对其主要性能指标进行了测试. 图 5, 6 给出了工作电压 (V_{cc}) 为 5V、频率为 50MHz ~ 15GHz、步进值为 50MHz 条件下测量和软件仿真所得性能曲线的对比. 其中, 图 5 (a) 为放大器正向转移功率增益特性, 从对比结果来看, 增益特性基本满足设计指标要求; 在 2GHz 以下增益偏低, 由后级 4 发射结指 HBT 模型在低频端对 S_{21} 的拟合较差造成. 图 5 (b) 为放大器反向转移功率增益特性, 测试结果和软件仿真结果几乎完全吻合, 简化后模型可较好地表征芯片反向增益特性. 图 6 (a) 和 (b) 为放大器输入/输出端口回波损耗特性曲线, 对比结果表明, 虽然输入回波损耗和软件仿真结果有较大差别, 但却优于设计指标要求; 输出回波损耗特性在 6.5GHz 频率范围内测试和仿真结果吻合较好, 在高于 6.5GHz 时测试和软件仿真结果相差较大, 但已完全满足设计指标要求.

4 结论

本文尝试对 VBIC 模型拓扑结构针对 - 族

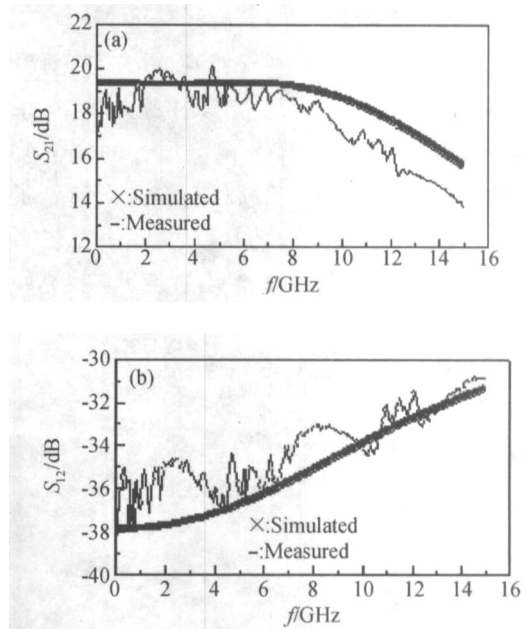


图 5 测试和仿真增益特性对比 (a) 正向转移功率增益; (b) 反向转移功率增益

Fig. 5 Comparison of measured and simulated characteristics of gain (a) Forward transducer power gain; (b) Reverse transducer power gain

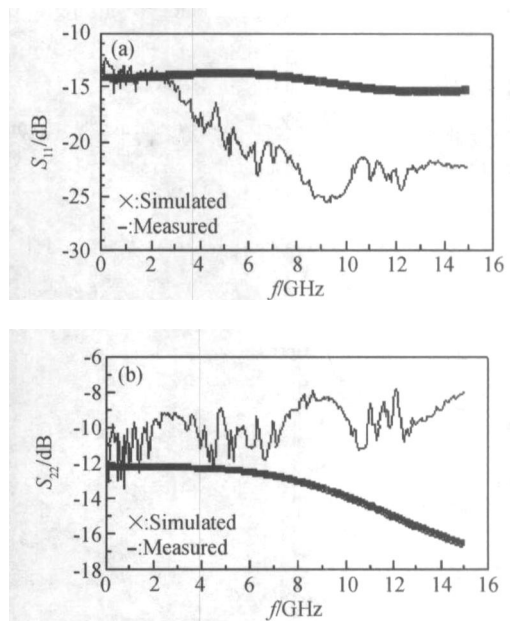


图 6 测试和仿真输入/输出回波损耗特性对比 (a) 输入回波损耗; (b) 输出回波损耗.

Fig. 6 Comparison of measured and simulated characteristics of input/output return-loss (a) Input return-loss; (b) Output return-loss.

化合物 HBT 器件进行简化, 并将其用于 InGaP/ GaAs HBT 工艺宽带放大器设计中. 从对单、多指

HB T 器件的模型能力来看,简化后的 VBIC 模型可对该类器件 $f-V$ 特性进行精确的表征,在 DC ~ 9 GHz 范围内可对器件小信号特性作出很好的表征.采用自建单、多指 HB T 模型设计的宽带放大器主要性能指标测试结果和软件仿真结果达到了较好的一致,表明简化后的模型至少可对该工艺宽带放大器交流小信号特性进行准确的预见,模型具有较强的实用性.

参考文献

- [1] Cherepko S V ,Hwang J C M. VBIC model applicability and extraction procedure for InGaP/ GaAs HBT. Proc APMC, 2001 :716
- [2] McAndrew C C ,Seitchik J A ,Bowers D F. VBIC95 :an improved vertical , IC bipolar transistor model. Proc IEEE BCTM ,1995 :170
- [3] McAndrew C C ,Seitchik J A ,Bowers D F. VBIC95 ,the vertical bipolar inter-company model. IEEE J Solid-State Circuits , 1996 ,31 (10) :1476
- [4] Huang G W ,Chen K M ,Kuan J F. Silicon BJ T modeling using VBIC model. Proc APMC ,2001 :240
- [5] Divergilio A ,Zampardi P ,Newton K. VBIC :a new standard in advanced bipolar modeling. IBM Micronews ,1999 ,4 (5)
- [6] Kobayashi K W ,Oki A K. A DC-10GHz high gain-low noise GaAs HBT direct-coupled amplifier. IEEE Microwave and Guided Wave Lett ,1995 ,5 (9) :308
- [1] Cherepko S V ,Hwang J C M. VBIC model applicability and extraction procedure for InGaP/ GaAs HBT. Proc APMC,

A Simplified VBIC Model and In GaP/ GaAs HBT Wideband Amplifier Design *

Sun Lingling and Liu Jun

(Microelectronic CAD Center, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract : A new simplified VBIC model for a single- or a multi-finger InGaP/ GaAs HBT is presented. Compared results between measured and simulated data verify that ,within the frequency range from 50MHz to 9 GHz ,this simplified model is suitable for InGaP/ GaAs HBT AC small-signal characterizations ' representation. Using this model developed ,a two-stage direct-coupled wideband amplifier has been designed with measured gain of 19dB up to 9 GHz ,the input return-loss of less than - 10dB ,the output return-loss of less than - 8dB.

Key words : simplified VBIC model ; InGaP/ GaAs HBT ; broadband amplifier

EEACC : 1220 ; 1350

Article ID : 0253-4177(2005)05-0994-05

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 90207007)

Sun Lingling female ,was born in 1956 ,professor ,Senior Member of IEEE. Her research interest focuses on microwave and deep sub-micron IC and CAD.

Liu Jun male ,was born in 1977 ,master postgraduate. His research interests are device modeling and RF/ MMIC design.

Received 27 June 2004 ,revised manuscript received 24 November 2004

© 2005 Chinese Institute of Electronics