

InGaP/GaAs HBT 微波功率放大器的设计*

钱永学 刘训春

(中国科学院微电子中心, 北京 100029)

摘要: 采用模拟退火算法提取出异质结双极晶体管器件的大信号 Gummel-Poon 模型参数, 利用所提取出的模型参数设计出具有很低静态功耗的 1900MHz 两级 AB 类功率放大器。该功放的功率增益为 26dB, 1dB 压缩点输出功率为 28dBm, 对应的功率附加效率和邻近信道功率比分别为 38.8%、-30.5dBc, 1dB 压缩点处的各阶谐波功率均小于 -40dBc。

关键词: 异质结双极晶体管; Gummel-Poon 模型; AB 类功率放大器

PACC: 7340J **EEACC:** 2560F; 2550E; 2550R

中图分类号: TN 325⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2003)07-0753-05

1 引言

异质结双极晶体管(HBT)是微波、毫米波应用领域中最重要的器件之一, 与普通的 Si 双极晶体管相比, GaAs HBT 具有更好的高频特性、绝缘性能及更高的电流增益, 并且 GaAs HBT 还具有能承受较大电流密度以及对光刻精度要求低等优点。对于同样功率输出的芯片, 采用 HBT 器件能大大减小芯片尺寸从而降低芯片的成本^[1]。

HBT 的一个重要应用领域是移动通信。目前所发展的第三代移动通信普遍采用 CDMA 系统, 由于 CDMA 系统采用了非恒包络的调制方式, 因而 CDMA 系统对功放的线性度要求很高。同时, 为了增加手机的通话时间, 需要减小功放的静态功耗, 提高功放的发射效率。但是, 减小功放的静态功耗需要降低功放的静态偏置点, 这样, 可能会导致功放进入非线性工作区, 从而增加了功放的非线性失真。

本文采用了模拟退火算法^[2]提取出器件的大信号 Gummel-Poon 模型参数^[3]。利用所提取出的器件参数, 设计出 1900MHz 两级 AB 类功率放大器。该放大器的输入输出级集电极静态偏置电流很低, 分

别为 68mA 和 32.5mA; 放大器增益为 26dB; 静态功耗很低, 1dB 压缩点输出功率为 28dBm, 对应的功率附加效率和邻近信道功率比(ACPR)(1.2288MHz 带宽, 30kHz 邻近信道带宽, ±885kHz 频偏, 信号源为 Is95 反向链接 CDMA 信号)分别为 38.8%、-30.5dBc, 1dB 压缩点处的各阶谐波分量功率均小于 -40dBc, 因而该功放既具有很低的静态功耗, 又有较好的线性度。

2 HBT 大信号 Gummel-Poon 模型参数提取

通过拟合正向及反向 Gummel 图, 提取出器件的直流参数^[4,5]。正向 Gummel 图表示在集电结电压(V_{be})为 0 时, 集电极电流(I_c)、基极电流(I_b)随发射结电压(V_{be})的变化关系曲线。反向 Gummel 图表示在 V_{be} 为 0 时, 发射极电流(I_e)及 I_b 随 V_{be} 的变化关系。在中等电流区, 正向 Gummel 图中 $\ln I_c$ 、 $\ln I_b$ 与 V_{be} 近似成直线关系, 采用模拟退火算法拟合这两组曲线可以提取器件的 I_s 、 η_f 、 I_{sel} 、 η_e 、 R_e 、 β_f 等参数; 同样, 采用反向 Gummel 图可以提取出 η_r 、 β_r 、 I_{sel} 、 η_e 、 $R_b + R_e$ 等参数。然后再拟合器件的 $I-V$ 曲线, 优

* 国家重点基础研究发展计划(编号: 2000006830403)及中国科学院(编号: KGX2-101)资助项目

钱永学 男, 1978 年出生, 硕士研究生, 主要从事 HBT 器件及电路的研究。

刘训春 男, 1943 年出生, 研究员, 博士生导师, 长期从事化合物半导体器件及电路的研究。

2002-08-25 收到, 2003-01-21 定稿

© 2003 中国电子学会

化各直流参数，并将 R_b 、 R_c 从 $R_b + R_c$ 中分开。表 1 列出了发射极面积为 $3\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ HBT 直流参数的拟合结果。

采用模拟退火算法拟合不同偏置点下的 S 参数曲线，可以提取出器件的交流参数，表 2 为发射极面积为 $3\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ HBT 交流参数的拟合结果，表 3 为各参数的定义。

表 1 通过拟合器件正反向 Gummel 图及 $I-V$ 曲线所提取出的器件的直流模型参数

Table 1 DC model parameters extracted from positive and reverse Gummel figures

I_{sel}/A	η_t	β_t	η_e
1.28×10^{-22}	1.05	145.83	1.21
I_s/A	η_e	β_r	η_r
6.54×10^{-24}	1.74	0.51	1.1
I_{sel}/A	R_e/Ω	R_b/Ω	R_c/Ω
1.07×10^{-14}	6.3	18.2	8.4

表 2 通过拟合器件不同偏置点下的 S 参数曲线所提取出的器件的交流模型参数

Table 2 AC model parameters extracted from S -parameters at different bias points

C_{je0}/pF	V_{je}/V	t_f/ns	m_{je}
0.089	1.46	0.02	0.5
C_{je0}/pF	V_{je}/V	F_c	m_{je}
0.15	1.59	0.5	0.5
X_{eje}			
0.3			

表 3 晶体管各参数定义

Talbe 3 Meanings of transistor parameters

I_s	transport saturation current	η_t	forward current emission coefficient
I_{sel}	base-emitter leakage saturation current	η_e	base-emitter leakage emission coefficient
I_{sel}	base-collector leakage saturation current	η_e	base-collector leakage emission coefficient
R_b	zero-bias (maximum) base resistance	η_r	reverse current emission coefficient
R_e	emitter ohmic resistance	β_r	ideal maximum reverse beta
R_c	collector ohmic resistance	β_t	ideal maximum forward beta
C_{je0}	base-collector zero-bias p-n capacitance	V_{je}	base-collector built-in potential
C_{je0}	base-emitter zero-bias p-n capacitance	V_{je}	base-emitter built-in potential
X_{eje}	fraction of C_{je} connected internally to R_b	t_f	ideal forward transit time
m_{je}	base-emitter p-n grading factor	m_{je}	base-collector p-n grading factor
F_c	forward-bias depletion capacitor coefficient		

图 1 为正向 Gummel-Poon 图及其拟合曲线。图 2 为反向 Gummel-Poon 图及其拟合曲线。图 3 为在 $V_{ce} = 3\text{V}$, $I_c = 8\text{mA}$ 时测量的 S 参数与拟合的 S 参数图形。

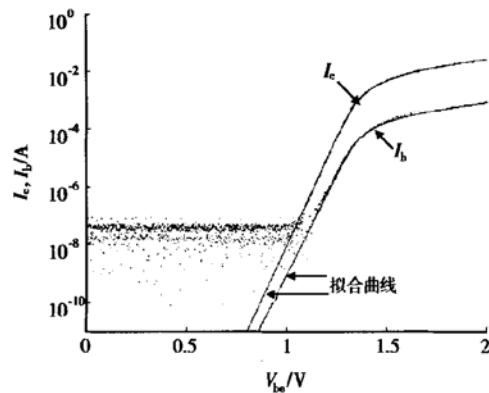


图 1 正向 Gummel-Poon 图及其拟合曲线

Fig. 1 Positive Gummel-Poon figure and its simulated curve

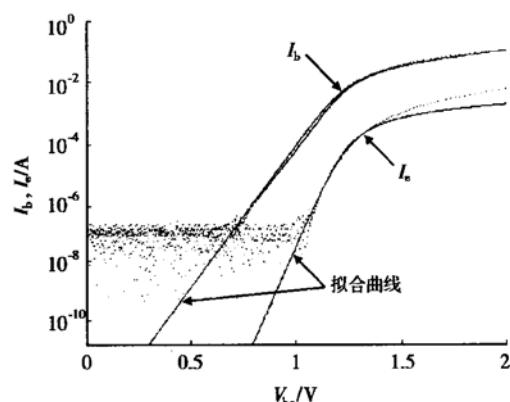


图 2 反向 Gummel-Poon 图及其拟合曲线

Fig. 2 Reverse Gummel-Poon figure and its simulated curve

3 功率放大器设计

图 4 为所设计的 1900MHz 两级 AB 类功率放大器简图。

基本的设计思想如下：首先提取出器件的大信号模型参数，采用所提取出的模型参数对电路进行小信号分析，确定电路拓扑结构，再分析功率匹配、谐波失真、ACPR。经过模拟，输入输出以及级间匹配电路均采用由一个电感和两个电容组成的 T 型网络，信号输出端并联一个二次谐波短路网络（二阶谐波网络的引入可以减小二阶谐波输出功率，提

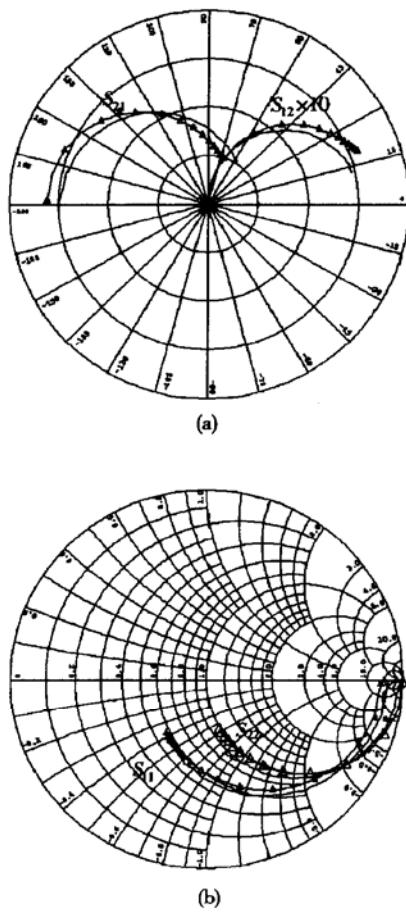


图 3 $V_{ce} = 3V, I_c = 8mA$ 时测量的 S 参数与拟合的 S 参数图形

Fig. 3 S parameters tested and simulated when transistor works at $V_{ce} = 3V, I_c = 8mA$

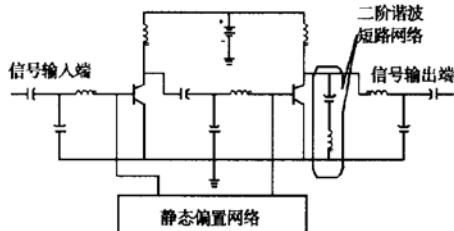


图 4 1900MHz 两级 AB 类功率放大器简图

Fig. 4 Circuit schematic of 1900MHz two-stage class AB power amplifier

高功率附加效率, 减小谐波失真, 改善功放的线性度). 各级静态偏置电路均采用线性化偏置网络, 由于输出管中存在着非线性元件, 随着输入功率的增加, 输出管发射结静态偏置压降下降, 因而引入幅度-幅度失真以及幅度-相位失真. 采用线性偏置网络后, 可以对输出管基极提供瞬态大电流, 从而可以提

高输出管发射结静态偏置压降, 抑制非线性失真. 第一级处于浅 AB 类工作状态, 输出级处于深 AB 类工作, 两级的集电极静态偏置电流均较小, 分别为 68mA 和 32.5mA, 两级的发射极面积分别为 $1200\mu m^2$ 和 $3240\mu m^2$, 输入、输出阻抗均为 50Ω , 输出端经阻抗变换将 50Ω 阻抗变换为 $4.7 + 6.3j\Omega$ 以实现最大功率输出. 整个电路的工作电压为 3.5V.

图 5~8 为模拟功放特性曲线. 从图 5 可以看出, 输入功率为 2dBm 时, 输出功率开始偏离线性区; 输入功率为 3dBm 时, 输出功率压缩 1dB, 对应的输出功率为 28dBm, 功率附加效率为 38.8%. 由

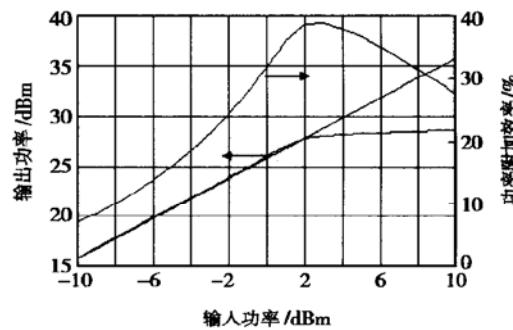


图 5 输出功率及功率附加效率与输入功率之间的关系

Fig. 5 Simulated output power and power-added efficiency

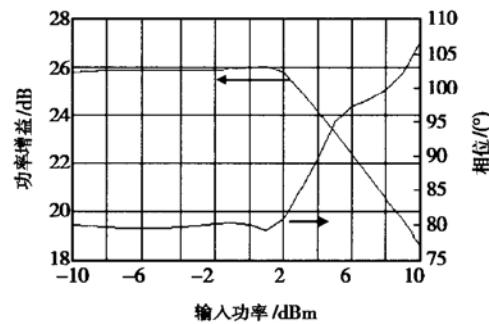


图 6 功率增益及相位与输入功率之间的关系

Fig. 6 Simulated relationships between gain, phase, and P_{in}

于功放的静态偏置电流很小, 因而在较低输出功率时仍然可以获得较高的功率附加效率, 这对于 CDMA 系统是非常有利的. 因为 CDMA 系统采用自动增益控制技术, CDMA 手机功放的平均发射功率远小于 1dB 压缩点输出功率, 因而提高低输出功率时的功率附加效率可以明显增加手机的通话时间. 图

6 为功率增益及相位与输入功率之间的关系曲线。在输入功率为 2dBm 时, 功率增益和相位才开始产生较大偏离, 在工作范围内功放的 AM-AM 及 AM-PM 失真较小。图 7 为 ACPR(1.2288MHz 带宽, 30kHz 邻近信道带宽, $\pm 885\text{kHz}$ 频偏, 信号源为 IS95 反向链接 CDMA 信号)与输入功率之间的关系曲线, 1dB 压缩点处的 ACPR 为 -30.5dBc 。随着

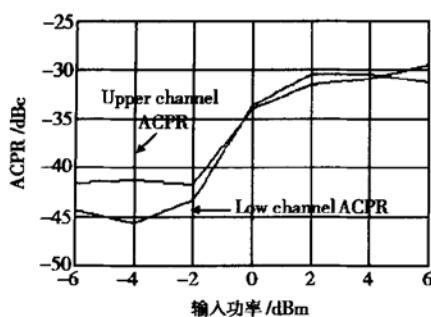


图 7 ACPR 与输入功率之间的关系曲线

Fig. 7 Simulated relationship between ACPR and input power

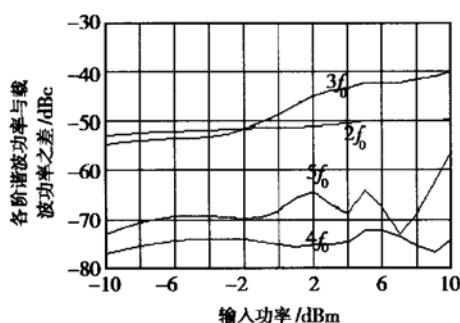


图 8 相对于载波功率的各阶谐波功率与输入功率之间的关系曲线

Fig. 8 Simulated relationship between input power and harmonic output power

输入功率的减小, ACPR 也随着减小, 当输入功率小于 -2dBm (即输出功率小于 24dBm) 时, ACPR 小于 -40dBc 。图 8 为对于载波功率的各阶谐波输出功率与输入功率之间的关系曲线, 1dB 压缩点处的各阶谐波功率均小于 -40dBc , 因而谐波失真很小。

4 结论

本文采用了模拟退火算法提取 HBT 的 Gummel-Poon 大信号模型参数, 并利用所提取的模型参数设计出 1900MHz 两级 AB 类功率放大器。该放大器的工作电压为 3.5V , 输入输出级集电极静态偏置电流很低, 分别为 68mA 和 32.5mA , 因而静态功耗很低, 放大器增益为 26dB , 1dB 压缩点输出功率为 28dBm , 对应的功率附加效率和 ACPR 分别为 38.8% 、 -30.5dBc , 1dB 压缩点处的各阶谐波分量均小于 -40dBc , 因而该功放既具有很低的静态功耗, 又有较好的线性度。

参考文献

- [1] The handbook of III-V heterojunction bipolar transistor, 1998
- [2] Chen Jun, Liu Xunchun. HFET small signal model extraction from S parameters using simulated annealing algorithm. Chinese Journal of Semiconductors, 2001, 22(1): 79 [陈俊, 刘训春. 用模拟退火算法从 S 参数提取 HFET 小信号等效电路模型参数. 半导体学报, 2001, 22(1): 79]
- [3] Pspice A/D reference manual for Windows users, 1997: 200
- [4] Samelis A, Pavlidis D. DC to high-frequency HBT-model parameter evaluation using impedance block conditioned optimization. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1997, 45: 886
- [5] Wei C J, Hwang J C M. Direct extraction of equivalent circuit parameters for heterojunction bipolar transistors. IEEE Trans Microw Theory Tech, 1995, 43: 2035

Design of InGaP/GaAs HBT Microwave Power Amplifier^{*}

Qian Yongxue and Liu Xunchun

(Microelectronics R&D Center, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract: The method to extract HBT large-signal Gummel-Poon model parameters with simulated annealing algorithm is discussed. These parameters extracted are used for a design of 1900MHz two-stage class AB power amplifier with very low quiescent power consumption. The gain of the P_A is 26dB. Its output 1dB compression point is 28dBm. At this point the power-added efficiency and ACPR are 38.8%, -30.5dBc respectively. All harmonic powers are below -40dBc when P_{out} is below 28dBm.

Key words: HBT; Gummel-Poon model; class AB power amplifier

PACC: 7340J **EEACC:** 2560F; 2550E; 2550R

Article ID: 0253-4177(2003)07-0753-05

* Project supported by State Key Development Program for Basic Research of China (No. G2000006830403) and The Chinese Academy of Sciences (No. KGX2-101)

Qian Yongxue male, was born in 1978, master postgraduate. He is majoring in the researching of HBT devices and circuits.

Liu Xunchun male, was born in 1943, professor. His research interest focuses on compound semiconductor devices and circuits.

Received 25 August 2002, revised manuscript received 21 January 2003

© 2003 The Chinese Institute of Electronics