

基于 $2\mu\text{m}$ GaAs HBT 工艺的 L 型分布式放大器设计^①张 璞^{②*} 王志功^{③*} 徐 建*

(* 东南大学射频与光电集成电路研究所 南京 210046)

(** 南京邮电大学电子科学与工程学院 南京 210046)

摘 要 为满足电子系统对放大器的带宽性能要求,基于 $2\mu\text{m}$ 砷化镓(GaAs)异质结双极晶体管(HBT)工艺设计了一种新的分布式放大器。设计采用了输入电容耦合技术和 L 型传输线结构,有效提升了放大器的频率性能。测试结果显示,该放大器的 3dB 带宽达到 14GHz,在 1.2GHz ~ 10.5GHz 频率范围内增益为 6.6dB,带内增益平坦度为 $\pm 0.5\text{dB}$,输入回波损耗小于 -14dB ,输出回波损耗小于 -8.8dB ,表现出了高增益和大带宽的特性。

关键词 分布式放大器,人工传输线,异质结晶体管,超宽带(UWB),砷化镓(GaAs)

0 引言

随着无线通信技术的迅猛发展以及数据传输率的不断提高,通信系统及其它电子系统对放大器的带宽性能提出了更高要求。譬如目前最有发展前景的超宽带(ultra-wideband, UWB)无线通讯技术的工作频率已覆盖到 3.1GHz 到 10.6GHz 之间的 7.5GHz 带宽。然而,晶体管的寄生电容效应使得传统放大器的带宽受到限制,而分布式放大器利用晶体管的寄生电容构成了人工传输线,能够突破传统放大器的增益带宽积的限制,在很宽的频带内得到较大的平坦增益,可广泛应用于设计超宽带无线收发机、高速率装置和光通信系统。目前分布式放大器的相关理论及设计方法已成为国内外的研究热点^[1-10],譬如在噪声理论研究方面,德黑兰大学的 Hamidi 等人提出了相对简单而准确的噪声指数表达式,并将其应用到金属-半导体场效应晶体管(metal-semiconductor field effect transistor, MESFET)及异质结双极晶体管(heterojunction bipolar transistor, HBT)工艺中,简化了分布式放大器的噪声分析^[1]。电子科技大学的焦世龙等人采用截止频率 f_T 仅为 30GHz 的 $0.5\mu\text{m}$ GaAs 赝晶高电子迁移率晶体管(pseudomorphic high electron mobility transistor, PHEMT)工艺研制了一种光接收机分布式前置放大器,该放大器的

3dB 带宽接近 20GHz,跨阻增益约 $46\text{dB}\Omega$ ^[7]。杭州电子科技大学的程知群等人采用栅长为 $1\mu\text{m}$ 的低噪声复合沟道 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{N}/\text{Al}_{0.05}\text{Ga}_{0.95}\text{N}/\text{GaN}$ 高电子迁移率晶体管(high electron mobility transistor, HEMT)工艺研制了一种新型的低噪声分布式放大器,2GHz ~ 6GHz 频率范围内噪声系数小于 5dB,2GHz ~ 10GHz 频率范围内噪声系数小于 6.5dB ^[8]。据笔者所知,目前国内尚未有采用 GaAs HBT 工艺实现分布式放大器的相关报道。

GaAs HBT 工艺具有衬底损耗相对较小,电流增益大的优点。本研究基于 $2\mu\text{m}$ GaAs HBT 工艺设计了一种采用 L 型传输线结构的分布式放大器,并在设计中通过在晶体管基极串联耦合电容进一步提升了带宽性能。电路所采用的 HBT 晶体管截止频率 f_T 为 35GHz,而设计的分布式放大器带宽达到 14GHz,在 1.2GHz ~ 10.5GHz 频率范围内,增益为 6.6dB,带内增益平坦度为 $\pm 0.5\text{dB}$,输入回波损耗小于 -14dB ,输出回波损耗小于 -8.8dB 。芯片面积为 $1.65\text{mm} \times 0.72\text{mm}$,功耗为 79mW。

1 HBT 分布式放大器基本原理

异质结双极晶体管(HBT)的等效小信号模型如图 1 所示,其中 r_{be} 为发射结交流等效电阻, C'_{bc} ,

① 国家自然科学基金(61106021),江苏省高校自然科学研究项目(11KJB510019),中国博士后基金(20090461049,20090461048),江苏省博士后资助计划(0901022C)和科技部中小企业技术创新基金(11C26213211234)资助项目。

② 男,1980 年生,博士,讲师;研究方向:射频与微波集成电路设计;E-mail: zhangyingnjupt@126.com

③ 通讯作者,E-mail: zgwang@seu.edu.cn

(收稿日期:2010-12-31)

C'_{ce} 分别为基极-发射极和集电极-发射极电容,它们均包含了集电结电容的密勒等效电容, g_m 为跨导增益, r_{ce} 是为了描述基区宽度调制效应而引入的电阻。

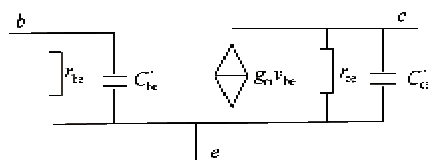


图1 HBT 等效交流小信号模型

由单个 HBT 构成的共射极放大器的增益表达式为

$$A_{us} = \frac{-g_m \cdot v_{be} \cdot r_{ce}}{\left(\frac{1}{r_{ce}} + \frac{1}{R_L} + j \cdot \omega \cdot C'_{ce}\right) \cdot (r_{be} + R_S + j \cdot \omega \cdot C'_{be} \cdot r_{be} \cdot R_S)} \quad (1)$$

其中 R_S 为信号源内阻, R_L 为负载。由式(1)可知,晶体管的寄生电容 C'_{be} 和 C'_{ce} 引入了两个极点,当频率升高时,将导致放大器增益幅度 $|A_{us}|$ 的滚降。可见晶体管的寄生电容是限制带宽的瓶颈。

分布式放大器的基本原理是将晶体管的寄生电容与电感元件构成人工传输线,从而克服寄生电容造成的增益滚降,其电路原理图如图2所示。由图1和图2得到基极和集电极人工传输线等效电路如图3和图4所示。

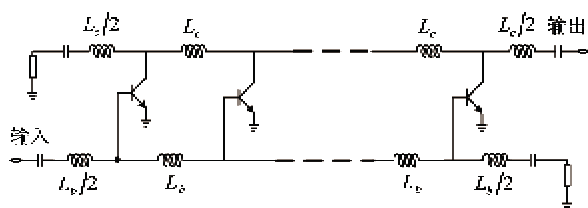


图2 HBT 分布式放大器原理图

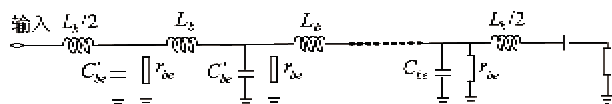


图3 基极人工传输线模型

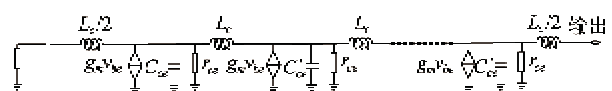


图4 集电极人工传输线模型

为使放大器的增益能够达到最大,基极传输线和集电极传输线的延迟应尽可能一致,这样每级增

益单元产生的电流就可以在放大器的输出端进行同相叠加。若忽略传输线的损耗,则分布式放大器的增益可以表示为

$$A_v = \frac{1}{2} \cdot n \cdot g_m \cdot Z_0 \quad (2)$$

其中 n 为分布式放大器增益单元的级数, g_m 为每级增益单元的跨导, Z_0 为 50Ω 特征阻抗。

2 L 型分布式放大器设计

集成电路设计的特点之一是其对工艺的依赖性较大, GaAs HBT 工艺具有衬底损耗相对较小, 电流增益大的优点。本文所设计的分布式放大器所采用 $2\mu\text{m}$ GaAs HBT 工艺, 下面对工艺及电路设计进行介绍。

2.1 GaAs HBT 工艺

设计所采用的是台湾 WIN 公司的 H02U-41 GaAs HBT 工艺, 该工艺中采用聚酰亚胺作为金属层 1 和金属层 2 之间的介质材料, 有效降低了寄生电容效应。工艺库中提供了 5 种 HBT 晶体管, 综合考虑增益、带宽以及功耗, 选用 RQ1A201B2 型晶体管, 该晶体管发射极长 $20\mu\text{m}$, 宽 $2\mu\text{m}$, 截止频率 f_T 为 35GHz , 功率截止频率大于 100GHz , 仿真得到其输出 V-I 特性如图5所示。由图5可知其电流放大倍数达到 80。为降低功耗, 同时保持一定的线性度, 直流工作点选在 $I_B = 22\mu\text{A}$, $I_C = 1.66\text{mA}$, $V_{CE} = 3\text{V}$ 。工艺库中提供了两种晶体管模型, 即 GP 模型与 VBIC 模型。与 GP 模型相比, VBIC 模型中考虑了更多的二阶效应, 其电路模型如图6所示。图7为两种模型在 $I_B = 22\mu\text{A}$, $I_C = 1.66\text{mA}$, $V_{CE} = 3\text{V}$ 偏置点处的 S 参数性能比较, 由图中可看出, 低频时两种模型的仿真曲线基本一致, 频率越高, 曲线差别越大。基于上述讨论, 本文采用晶体管的 VBIC 模型进行电路设计。

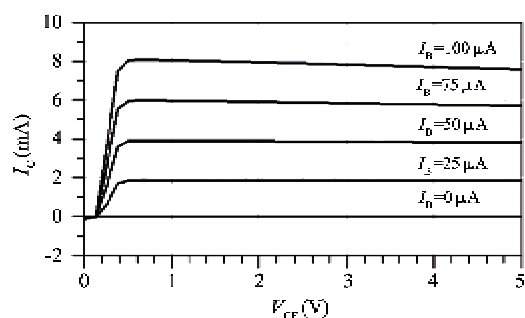


图5 RQ1A201B2 型晶体管的 V-I 特性曲线

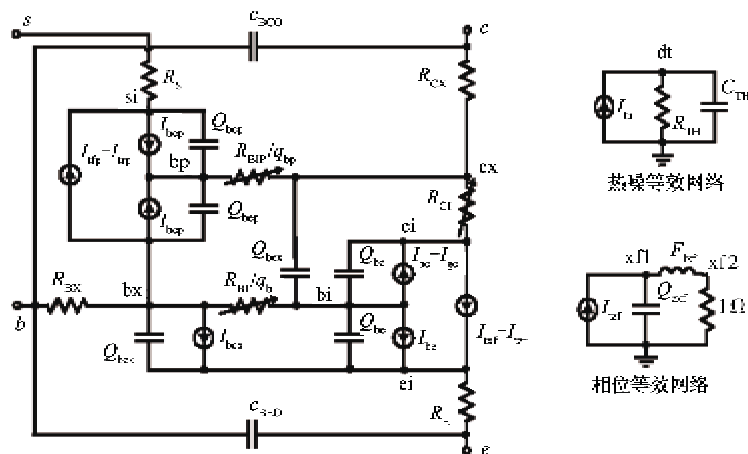


图6 晶体管 VBIC 模型

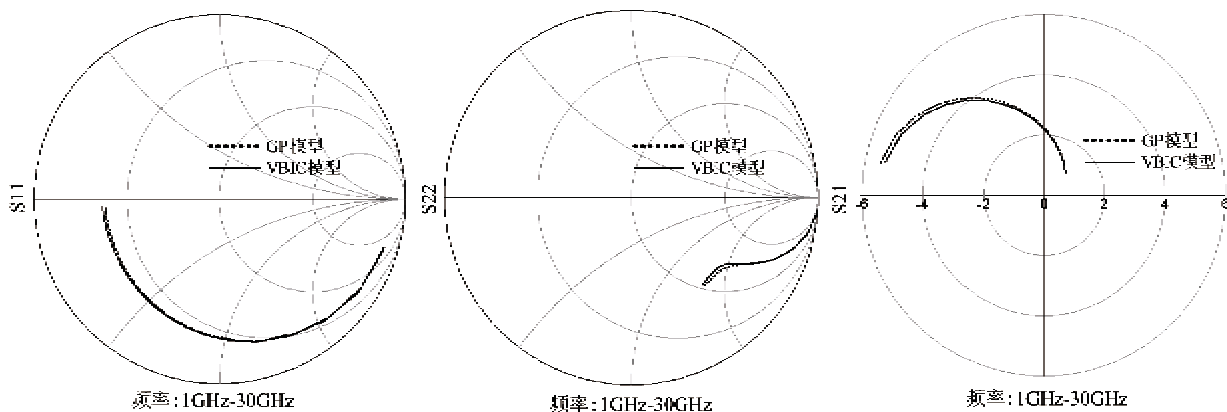


图7 GP模型与VBIC模型的S参数性能比较

2.2 L型传输线结构

传输线可以采用 L 型或者 T 型等效电路模型, 分别如图 8 和图 9 所示, 图 2 中的分布式放大器所采用的是 T 型传输线结构。

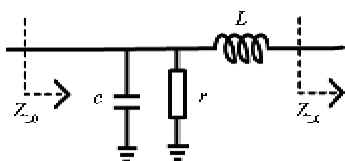


图 8 L 型传输线

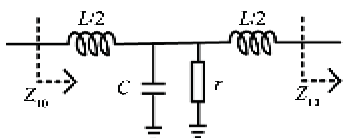


图9 T型传输线

当视为无穷长传输线时,上述两种模型性能相同,但当端接电阻负载时,L型传输线结构将体现出

更好的频率响应特性^[11],因此分布式放大器采用 L 型传输线结构。

2.3 电路设计

所设计的分布式放大器电路原理图如图 10 所示。

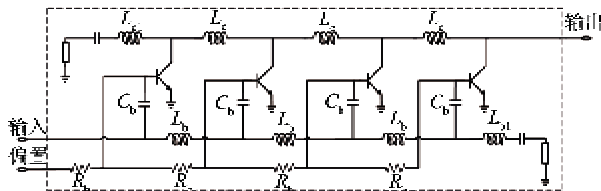
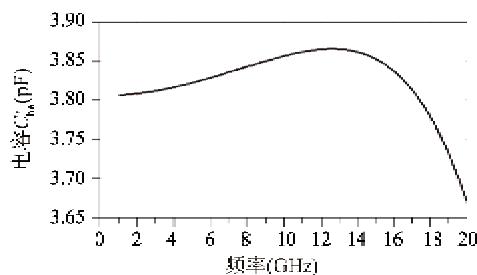
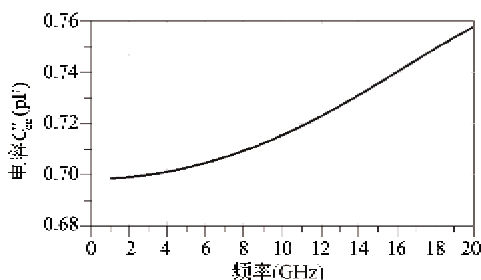


图 10 L 型分布式放大器原理图

图 1 所示的晶体管交流小信号等效模型中的发射结电容 c'_{be} 一般较电容 c'_{ce} 大, 仿真得到的 RQ1A201B2 型 HBT 的 c'_{be} 和 c'_{ce} 大小分别如图 11 和图 12 所示。

降低传输线的电容将能有效提高放大器的带宽。因此在基极串联片上电容 C_b ，它与 C_{in} 共同构

图 11 HBT 基极输入电容 C'_{be} 图 12 HBT 集电极输出电容 C'_{ce}

成栅极传输线的电容 $C_{bc} = C'_{be}C_b/(C'_{be} + C_b)$, 而栅极传输线的电感由下式确定:

$$L_b = \frac{Z_{0b}^2}{2 \cdot C_{bc}} \quad (3)$$

此时栅极传输线的截止频率为

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_b \cdot C_{bc}}} \quad (4)$$

C_b 的取值不能过小, 因为其本身构成一个高通滤波器, 取值太小会导致低频信号无法通过, 反而降低增益与带宽性能。考虑到工作频率最低至 1 GHz, 因此 C_b 选用 MIM 电容, 取值为 320 fF。

由于增加了电容 C_b , 晶体管基极的偏置电路需要由具有通直流隔交流特性的元件来搭建, 而片上电感占用芯片面积较大, 并且寄生效应严重, 而片上电阻的面积和寄生效应都相对较小, 因此考虑采用电阻偏置方式。图 13 分别为采用 20 nH 的理想电感和电阻搭建偏置电路后得到的增益比较。由图可知, 采用电阻偏置电路的放大器增益会略有下降, 但考虑到仿真采用的是理想电感, 以及大的片上电感的实现难度, 本文最终采用电阻偏置电路, 如图 10 所示。

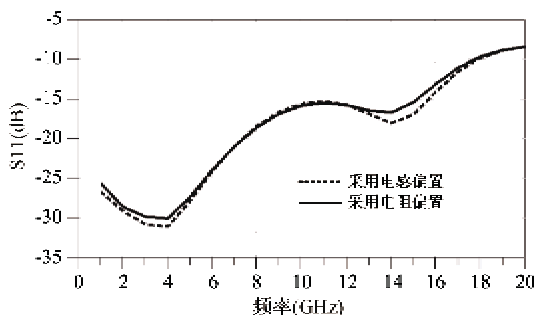
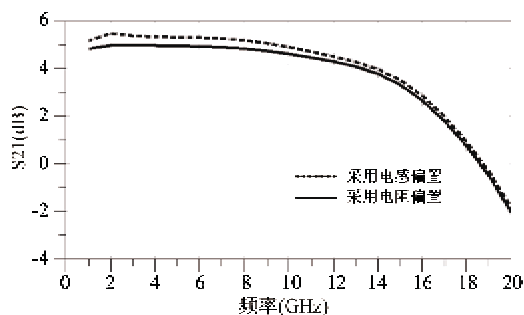


图 13 两种偏置方式的 S21 和 S11 的比较

3 测试结果

采用台湾 WIN 公司的 2 μm GaAs HBT 工艺库完成了四级分布式放大器的设计和仿真, 通过 Agilent E8363 网络分析仪和间距为 100 μm 的探针进行了在片测试。芯片的面积为 1.65 mm × 0.72 mm, 照片如图 14 所示。分布式放大器中晶体管的集电极

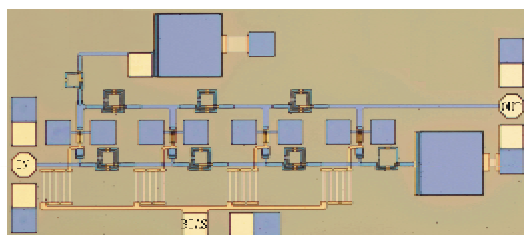


图 14 芯片照片

和基极偏置电压源分别为 3 V, 1.6 V, 偏置电流分别为 26.2 mA 和 0.4 mA, 功耗为 79 mW。

图 15 给出了放大器前向增益 S21 的测试和仿真结果的比较。在 1.2 GHz ~ 10.5 GHz 的范围内带内

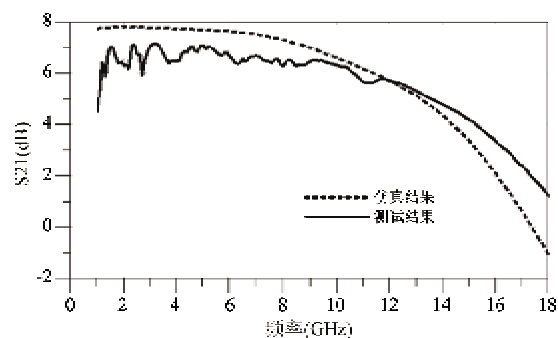


图 15 S21 的仿真与测试结果比较

增益约为 6.6dB,带内平坦度 $\pm 0.5\text{dB}$,而 3dB 带宽达到 14GHz。与仿真结果相比,实测结果在低频段增益有所下降而在高频段增益上升,经分析我们认为原因是片上电感的仿真模型与实际器件存在差异,导致阻抗匹配的频段向高频区产生了小的偏移。

输入端口反射系数 S_{11} 的仿真与测试结果如图 16 所示。由图 16 可知,测试曲线与仿真曲线形状基本吻合,但测试结果更好,这主要是由于晶体管的基极连接的偏置电阻寄生效应较小,在一定程度上稳定并改善了输入端匹配。输出反射系数的仿真与测试结果如图 17 所示。由图 17 可知,在整个频带内测得的输出端口反射系数 S_{22} 小于 -8.8dB ,与仿真曲线较为吻合,但与仿真结果偏离 3dB 左右。部分原因可能是由于输出端的金属层连线较长,连线的寄生电阻与衬底损耗影响了输出阻抗,使其偏离了设计时的预期值。

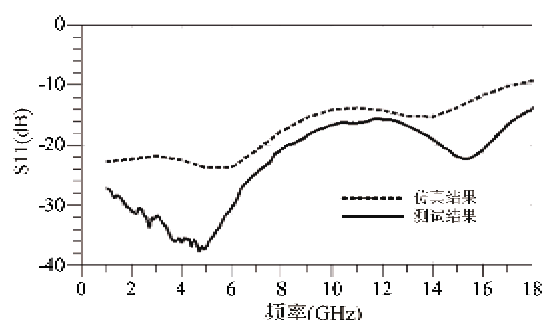


图 16 S_{11} 的仿真与测试结果比较

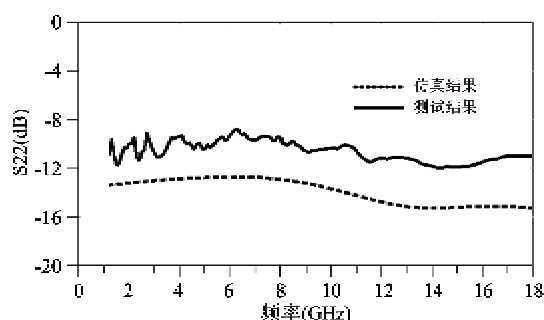


图 17 S_{22} 的仿真与测试结果比较

图 18 为反映放大器反向隔离度的 S_{12} 参数,其在 1GHz ~ 12GHz 频带内小于 -26dB ,测试与仿真结果接近,当频率高于 12GHz 时仿真与测试结果误差增大,分析原因是由于器件模型及电磁仿真的精度开始下降而导致。

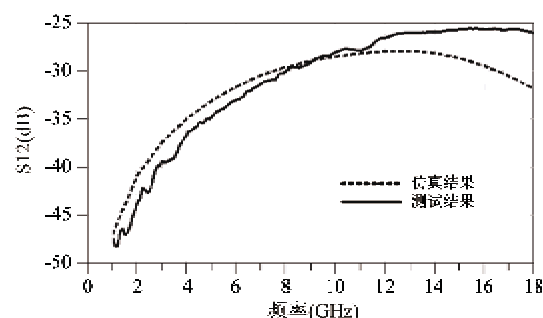


图 18 S_{12} 的仿真与测试结果比较

4 结论

无线通信技术的飞速发展对放大器的带宽提出了越来越高的要求。本文采用截止频率为 35GHz 的 GaAs HBT 晶体管设计并实现了一款带宽达到 14GHz 的分布式放大器,设计中采用了 L 型传输线结构,并通过在晶体管基极串联耦合电容提升放大器的带宽性能。该放大器在 1.2GHz ~ 10.5GHz 频率范围内,增益为 6.6dB,带内增益平坦度为 $\pm 0.5\text{dB}$,输入回波损耗小于 -14dB ,输出回波损耗小于 -8.8dB ,表现出高增益与大带宽的性能。

参考文献

- [1] Hamidi E, Mohammad-Taheri M, Moradi G. Improvements in the noise theory of the MMIC distributed amplifiers. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(8):1797-1806
- [2] Meliani C, Heinrich W. True broadband technique for on-chip-series connection of TWAs using differential distributed amplifiers. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2009, 19(4):248-250
- [3] Arbabian A, Niknejad A M. Design of a CMOS tapered cascaded multistage distributed amplifier. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(4):938-947
- [4] Worapishet A, Reopkom I, Surakamponporn W. Theory and bandwidth enhancement of cascaded double-stage distributed amplifiers. *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers*, 2010, 57(4):759-772
- [5] Sewiolo B, Fischer G, Weigel R. A 12-GHz high-efficiency tapered traveling-wave power amplifier with novel power matched cascode gain cells using SiGe HBT transistors. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, 57(10):2329-2336
- [6] 陈勛,王志功,李伟. 0.6 μm CMOS 分布式放大器设计. *固体电子学研究进展*, 2007, 27(1):58-62

- [7] 焦世龙,陈堂胜,蒋幼泉等. 20GHz 宽带 GaAs PHEMT 分布式前置放大器. 电子学报, 2007, 35 (05): 955-958
- [8] 程知群,周肖麟,陈敬. Low Noise Distributed Amplifiers Using a Novel Composite-Channel GaN HEMTs. 半导体学报, 2008, 29 (12): 2297-2300
- [9] 严蘋蘋,陈继新,洪伟. 单片分布式放大器的研制. 微波学报, 2010, 26 (4): 74-77
- [10] 曹海勇,陈效建,钱峰. 级联型单级分布式宽带单片功率放大器. 固体电子学研究与进展, 2008, 28 (4): 501-505
- [11] Xu J, Wang Z G, Zhang Y. Design of Distributed Amplifier with L-Type Networks. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Ultra-Wideband, Nanjing, China, 2010. 1-3

Design of a L-type distributed amplifier based on 2- μm GaAs HBT process

Zhang Ying^{* **}, Wang Zhigong^{*}, Xu Jian^{*}

(^{*}Institute of RF- &OE-ICs, Southeast University, Nanjing 210096)

(^{**} College of Electronics Science&Engineering, Nanjing University of Posts&Telecommunications, Nanjing 210046)

Abstract

A novel distributed amplifier for advanced electronic systems was designed based on the 2- μm GaAs Hetero-junction Bipolar Transistor (HBT) process. The input capacitance coupling technology and an L type transmission line structure were applied to the design to increase the frequency performance of the amplifier. The measurement results showed that the amplifier provided a 3dB bandwidth as high as 14GHz. The amplifier gave a 6.6dB gain from 1.2GHz to 10.5GHz with an excellent gain flatness of $\pm 0.5\text{dB}$. The input return loss was lower than -14dB while the output return loss was lower than -8.8dB , exhibiting the high gain, great bandwidth characteristics.

Key words: distributed amplifier, artificial transmission line, hetero-junction transistor, ultra wide band (UWB), GaAs