

自对准 InGaP/GaAs HBT 单片集成跨阻放大器

王延锋 孙海峰 刘新宇 和致经 吴德馨

(中国科学院微电子中心, 北京 100029)

摘要: 对自对准 InGaP/GaAs HBT 单片集成跨阻放大器进行了研究。采用发射极金属做腐蚀掩膜并利用 GaAs 腐蚀各向异性的特点来完成 BE 金属自对准工艺, 最终制作出的器件平均阈值电压为 1.15V, 单指管子电流增益为 50, 发射极面积 $4\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ 的单管在 $I_{\text{B}} = 200\mu\text{A}$ 和 $V_{\text{CE}} = 2\text{V}$ 偏压条件下截止频率达到了 40GHz。设计并制作了直接反馈和 CE-CC-CC 两种单片集成跨阻放大器电路, 测量得到的跨阻增益在 3dB 带宽频率时分别为 50.6dB Ω 和 45.1dB Ω , 3dB 带宽分别为 2.7GHz 和 2.5GHz, 电路最小噪声系数分别为 2.8dB 和 3.2dB。

关键词: 自对准工艺; InGaP/GaAs HBT; 跨阻放大器

EEACC: 1220

中图分类号: TN386

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2003)04-0406-05

1 引言

在微波和毫米波波段上(1~100GHz), HBT(异质结双极晶体管)、PHEMT(高电子迁移率晶体管)和 MESFET(金属半导体场效应晶体管)这三种器件互有长短。与后两者比较, HBT 的优势主要在于: HBT 的电流方向是垂直于表面的, 主要是由材料纵向结构来决定器件的速度, 因而相比于 PHEMT 和 MESFET 来说有可能用较低的光刻精度获得较高性能的器件, 而且 HBT 的阈值电压基本上是一个常数。HBT 在低噪声应用方面最主要的优势在于其 $1/f$ 噪声是这三者中最小的。由于 HBT 具有高线性度, 对光刻精度要求不高, 阈值稳定, 容易实现匹配和较低的噪声水平等优点, 因而被大量地应用于光接收机前端跨阻放大器电路中。

InGaP/GaAs HBT 工艺逐渐有取代 AlGaAs/GaAs HBT 的趋势, 这主要是由于 InGaP/GaAs HBT 的选择性腐蚀易于实现, 工艺宽容度大, 而且相对于 AlGaAs/GaAs HBT 还有下列优势: (1) InGaP/GaAs HBT 大的价带偏移能够有效地阻止基区空穴注入到发射区, 而小的导带偏移能够减小能带尖峰对电流输运造成的不利影响; (2) InGaP 在材料特性上优于 AlGaAs。由于 Al 非常活泼, 在外延

生长时很容易与杂质结合, 形成复合中心, 而 In 的相对惰性使得 InGaP 中的复合中心要少得多; (3) InGaP/GaAs HBT 有着比 AlGaAs/GaAs HBT 更好的可靠性; (4) 掺 C 基区的 InGaP/GaAs HBT 的电学 p-n 结与材料上的 InGaP/GaAs 异质结完全重合, 无需外延阻挡层。

光接收机前端电路主要采用跨阻抗型放大器结构, 这是因为: (1) 跨阻放大器电路的时间常数小, 能有效地减小波形失真; (2) 动态范围大, 输出电阻小; (3) 反馈电阻可以控制放大器的输入和输出阻抗, 因而可以利用这一点进行输入和输出之间的阻抗匹配, 以减少电压驻波比, 使得增益在整个频带内变化很小。

本文第 2 部分对跨阻放大器电路设计进行了研究, 第 3 部分对自对准 InGaP/GaAs HBT 器件和电路工艺进行了说明, 第 4 部分给出了器件和电路的测试及分析结果, 最后给出了结论。

2 电路设计

跨阻型前置放大器同时具有高接收灵敏度和频带宽的特点, 具有较大的动态范围, 这主要是由于引入了一个反馈电阻, 负反馈作用使得放大器的等效输入阻抗降低了, 同时带宽比高阻抗前置放大器增

加了。

我们设计的跨阻放大器有两种拓扑结构。第一种电路拓扑结构我们称为直接反馈, 是将反馈电阻 R_1 直接连接在共发射极放大器 Q1 的 BC 结之间, 电路拓扑结构参见图 1(a)。这种电路结构通常不能采用 Si 双极晶体管, 因为它会导致 BC 结之间很低的偏压(通常小于 0.1V), 使得晶体管工作速度很慢。而 HBT 即使 BC 结之间的电压为 0, 也可以获得很高的工作速度, 因而这种电路结构对于 HBT 器件来说是可行的。电路是两级结构, 第一级采用共发射极, 第二级采用射极跟随器驱动后续电路。第二种电路我们称为 CE-CC-CC 结构, 反馈电阻 R_1 连接在第二级 Q2 的发射极和第一级 Q1 的基区之间, 随后的两级射极跟随器 Q2、Q3 使得电路更容易达到输出匹配, 较好地驱动后续电路, 电路拓扑结构参见图 1(b)。电路中晶体管发射极尺寸采用 $7\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$, 加大了工艺宽容量。

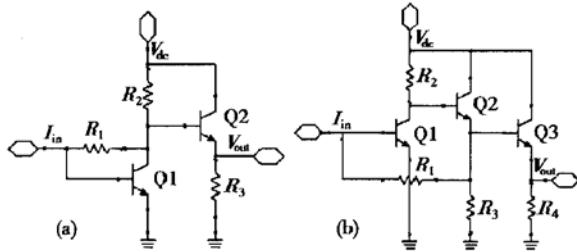


图 1 直接反馈和 CE-CC-CC 电路拓扑结构

Fig. 1 Direct feedback and CE-CC-CC circuit topologies

CE-CC-CC 结构的主要缺点是 Q1 的大输入 Miller 电容会引起带宽下降。直接反馈结构同样具有这个问题, 但直接反馈结构在很宽的反馈电阻范围内绝对稳定, 这样工艺的宽容度很大。跨阻放大器电路的稳定系数、带宽、噪声水平和跨阻增益都依赖于反馈电阻 R_1 、总输入电容 C_i 和集电极电阻 R_c 。集电极电阻主要决定了放大器的开环增益 A 。反馈电阻、总输入电容和集电极电阻共同决定放大器的稳定系数 K 。可以利用简单的反馈理论给出带宽和跨阻增益的表达式:

$$\begin{aligned} \text{BW} &= (1 + A/R_1)/(2\pi R_1 C_i) \\ Z_0 &= A/(1 + A/R_1) \end{aligned} \quad (1)$$

可以看出当反馈电阻增加时, 跨阻增益增加, 但带宽减少, 因而在实际电路设计当中需要折衷考虑两者, 利用电路仿真软件模拟得到的结果如图 2 所示。

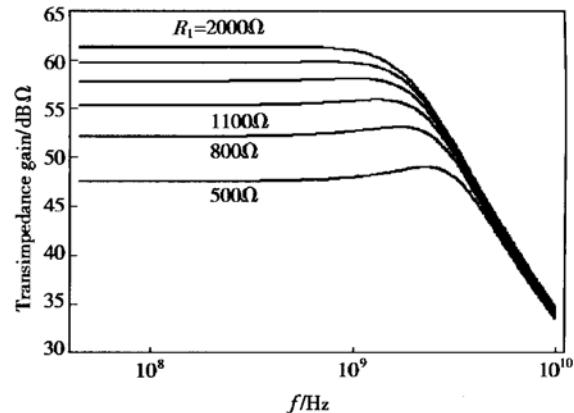


图 2 跨阻增益和带宽与反馈电阻的关系曲线

Fig. 2 Relationship curves of transimpedance gain, bandwidth and feedback resistance

利用上述分析, 通过改变反馈电阻、晶体管尺寸和偏置电阻的值, 可以获得优化的电路性能。在电路仿真软件中采用了改进的 Gummel-Poon 模型来表征 HBT 器件特性, 其它无源器件均采用理想模型。利用器件的直流和高频 S 参数测量结果拟合得到了器件模型参数。电路仿真得到的结果说明两种电路形式均满足 2.5Gb/s 跨阻放大器性能指标要求。

3 自对准 InGaP/GaAs HBT 工艺

为了使自对准工艺简单易行, 我们采用了发射极金属做腐蚀掩膜腐蚀盖帽层, 并利用 GaAs 材料腐蚀各向异性的特点实现了 BE 金属自对准工艺。由于磷酸系列腐蚀液对盖帽层侧向腐蚀严重, 如果控制不好, 很容易导致器件倒塌, 因而我们通过大量实验最终选择了适合我们工艺条件的柠檬酸系列腐蚀液。它的主要特点是侧向腐蚀小, 属于反应控制型腐蚀, 而且对 GaAs 与 InGaP 的选择腐蚀比很大。BE 结腐蚀后的剖面如图 3 所示, 从图中可以看出侧向腐蚀只有 $0.3\mu\text{m}$ 左右。

通过基于 HBT 器件物理模型的公式计算得到了满足电路性能要求的材料结构, 如图 4 所示。

具体的工艺步骤是: 淀积发射极金属 → 以发射极金属为掩膜腐蚀到基区 → 淀积基区金属 → 以胶做掩膜腐蚀到亚集电极层 → 淀积集电极金属 → 器件隔离 → 介质覆盖 → 刻孔 → 溅射 NiCr 金属膜电阻 → 溅射布线金属 → 金属加厚 → 生长钝化层 → 刻孔 → 背面减薄 → 划片封装 → 测试。制作得到的器件剖面如图 5 所示, 从图中可以看出 BE 结和 BC 结侧向腐蚀很

小, 器件不会倒塌.

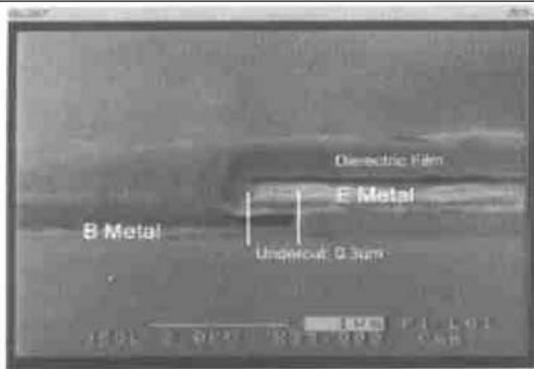


图 3 BE 结腐蚀剖面

Fig. 3 Etch section of BE junction

n^{++}	In _x Ga _{1-x} As ($x = 0.5$)	30nm	Si-doped	$> 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
n^{++}	In _x Ga _{1-x} As ($x = 0 \sim 0.5$)	30nm	Si-doped	$> 1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
n^{++}	GaAs	100nm	Si-doped	$5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$
n^-	In _x Ga _{1-x} P ($x = 0.51$)	80nm	Si-doped	$3 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$
p^{++}	GaAs	60nm	C-doped	$4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
n^-	GaAs	700nm	Si-doped	$3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$
n^{++}	GaAs	500nm	Si-doped	$5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$

图 4 HBT 外延片结构

Fig. 4 Epilayer structure of HBT

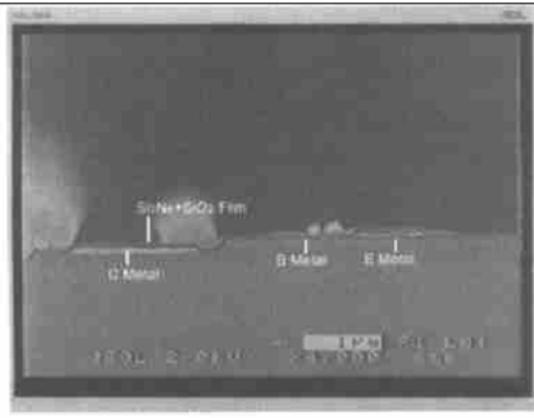


图 5 器件剖面

Fig. 5 Overall device section

4 器件和电路的测试结果及分析

采用第 3 节描述的工艺, 我们成功地制作了不同发射极尺寸的自对准 HBT 单管和跨阻放大器电路, 而且通过多次投片验证, 我们采用的 BE 金属自对准工艺和 HBT 电路工艺稳定可靠, 器件和电路成品率很高. 通过大量器件直流性能的测量, 测得该

种材料 HBT 阈值电压的统计平均值为 1.15V. 图 6 给出了一个发射极尺寸为 $4\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ 的单管的 $I-V$ 特性, 从图中可以看出该器件单管的电流增益为 50, 偏移电压为 0.2V.

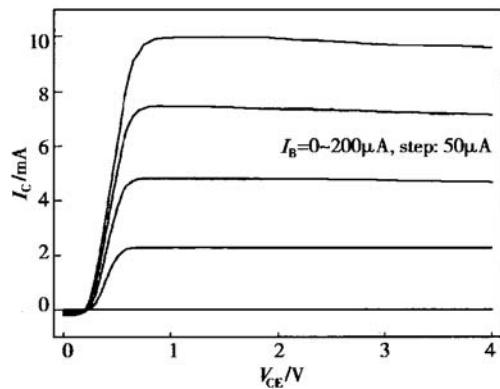


图 6 器件单管直流 $I-V$ 特性

Fig. 6 DC $I-V$ curve of single finger HBT device

用 HP8510C 网络分析仪和 Cascade 探针台测试 InGaP/GaAs HBT 单管的高频特性, 待测器件的发射极条宽为 $4\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$, 测试条件为: CE 偏压为 2V, 基极电流为 $200\mu\text{A}$, 测得器件的电流增益截止频率 f_t 为 40GHz. 图 7 给出了该器件的 h_{21} 参数曲线, 图 8 给出了该器件的 Smith 圆图.

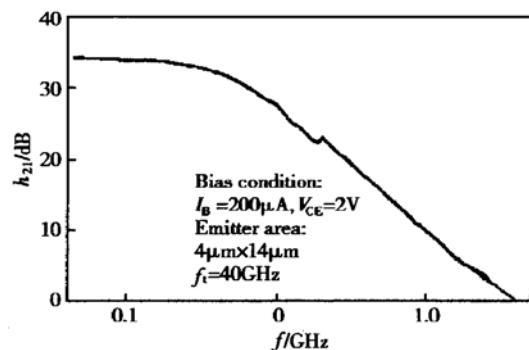


图 7 器件单管的频率特性

Fig. 7 Frequency curve of single finger HBT device

电路管芯经过减薄、划片等工艺步骤, 安装在测试盒内, 通过压焊金丝连接到测试盒的引线上. 利用测试盒我们进行了电路的高频性能测量, 主要包括电路 S 参数和最小噪声系数的测量. 跨阻增益可以从 S 参数计算得到, CE-CC-CC 结构电路跨阻增益测量和模拟结果对比如图 9 所示, 直接反馈方式电路跨阻增益测量和模拟结果对比如图 10 所示.

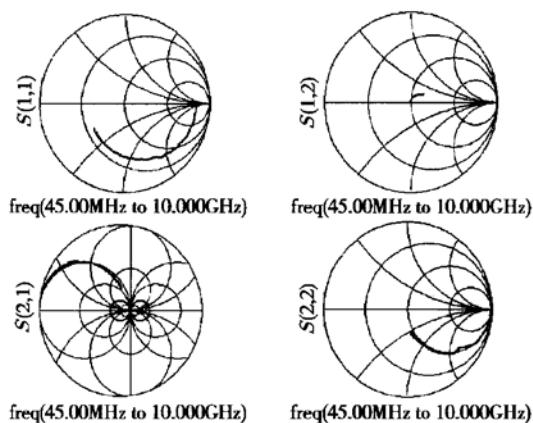


图 8 器件单管 Smith 圆图

Fig. 8 Smith chart of single finger HBT device

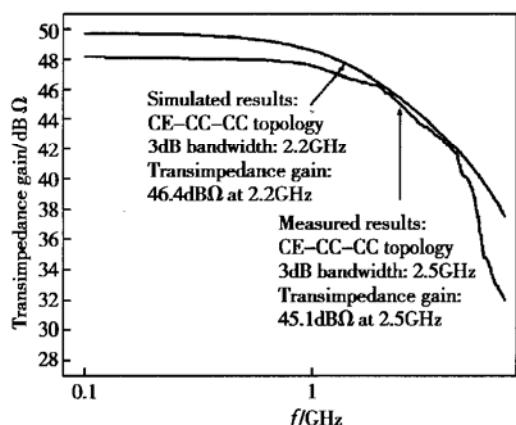


图 9 CE-CC-CC 结构跨阻增益测量和模拟结果对比
Fig. 9 Comparison of measured and simulated transimpedance gain results of CE-CC-CC circuit topology

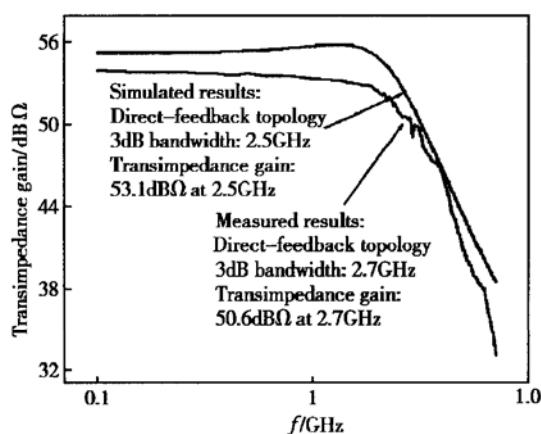


图 10 直接反馈方式的跨阻增益测量和模拟结果对比
Fig. 10 Comparison of measured and simulated transimpedance gain results of direct feedback circuit topology

从图中可以看出由于 CE-CC-CC 结构使用了较小的反馈电阻(350Ω)导致 3dB 带宽时的跨阻增益为 $45.1\text{dB}\Omega$, 而直接反馈电路形式由于反馈电阻大(2000Ω), 3dB 带宽时的跨阻增益为 $50.6\text{dB}\Omega$. 对于每种电路结构来说增益带宽积是固定的, 从图中也可以看出虽然 CE-CC-CC 结构模拟得到的 3dB 带宽要小于测量结果, 但是模拟得到的跨阻增益要大于测量结果. 模拟结果和测量结果基本上吻合, 两者存在一定偏差的原因估计是: (1) 金属膜电阻在退火条件下阻值下降, 导致跨阻增益下降和带宽增加, 这与图 2 给出的仿真结果也是吻合的; (2) 测试盒中的微波传输过程有损耗; (3) 器件模型的精度可能导致最后制作的电路特性和模拟的不吻合.

我们进一步对安装在测试盒中的电路管芯采用 HP8970B 自动噪声测试仪进行了电路最小噪声系数的测量. 图 11 和图 12 分别给出了 CE-CC-CC 和直接反馈电路结构测量结果与采用 SGP 模型和我们改进的 HBT 噪声模型^[5]计算模拟得到结果的对比. 从图中可以看出采用改进的 HBT 噪声模型仿真得到的结果明显好于 SGP 噪声模型仿真结果, 而且与测量结果很接近.

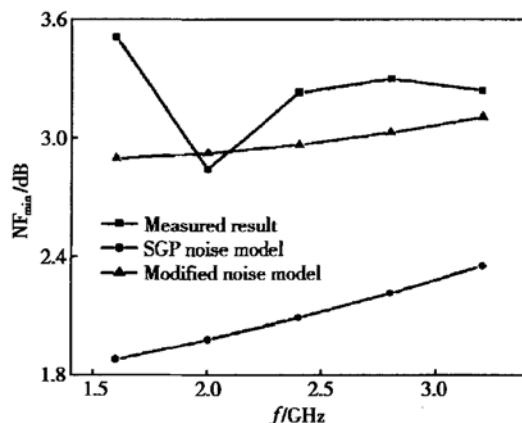


图 11 CE-CC-CC 结构最小噪声系数测量和模拟结果对比
Fig. 11 Comparison of measured and simulated minimum noise figure results of CE-CC-CC circuit topology

对于 CE-CC-CC 电路结构, 最小噪声系数为 3.2dB (2.5GHz 频率下), 而对于直接反馈电路最小噪声系数为 2.8dB (2.5GHz 频率下).

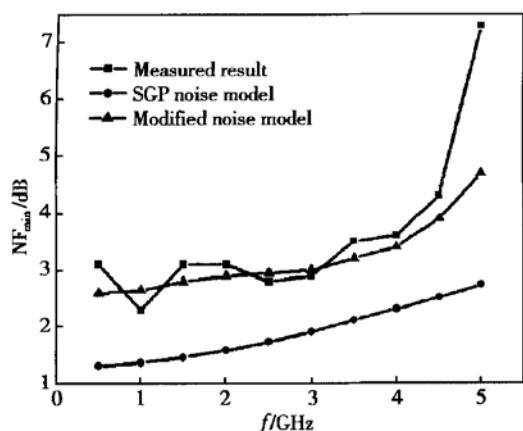


图 12 直接反馈结构最小噪声系数测量和模拟结果对比
Fig. 12 Comparison of measured and simulated minimum noise figure results of direct feedback circuit topology

5 结论

本文对自对准 InGaP/GaAs HBT 的跨阻放大器进行了研究, 经过工艺投片, 我们获得了性能良好的器件和电路。测得单管的电流增益为 50, $4\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ 发射极条宽的自对准 InGaP/GaAs HBT 单管在偏压 $I_B = 200\mu\text{A}$ 和 $V_{CE} = 2\text{V}$ 条件下其 f_T 为 40GHz。对两种不同的跨阻放大器电路结构进行了

测试, 结果表明, 跨阻增益分别为 50.6dBΩ 和 45.1dBΩ, 3dB 带宽分别为 2.7GHz 和 2.5GHz, 电路最小噪声系数分别为 2.8dB 和 3.2dB。

致谢 感谢中国科学院微电子中心化合物半导体器件与电路实验室全体人员对工艺研究和器件与电路测试给予的大力支持, 感谢南京电子器件 55 所在测试盒制作和电路噪声性能测量等方面给予的帮助。

参考文献

- [1] Mohammadi S, Park J W, Pavlidis D, et al. High gain GaInP/GaAs HBT monolithic transimpedance amplifier for high-speed optoelectronic receivers. IEDM, 1998: 661
- [2] Park J W, Mohammadi S, et al. GaInP/GaAs HBT broadband monolithic transimpedance amplifiers and their high frequency small and large signal characteristic. 1998 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium, 1998: 179
- [3] Kwark B S, Park M S. A 10Gb/s PIN-HBT MMIC receiver front-end. 1996 Electronic Components and Technology Conference, 1996: 632
- [4] Pan N, Elliott J, Knowles M, et al. High reliability InGaP/GaAs HBT. IEEE Electron Device Lett, 1998, 19(4): 115
- [5] Wang Yanfeng, Wu Dexin. HBT's high frequency noise modeling and analysis. Chinese Journal of Semiconductors, 2002, 23(11): 1140

Self-Aligned InGaP/GaAs HBT Monolithic Transimpedance Amplifier

Wang Yanfeng, Sun Haifeng, Liu Xinyu, He Zhijing and Wu Dexin

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

Abstract: The self-aligned InGaP/GaAs HBT monolithic transimpedance amplifier is investigated. The self-aligned BE junction is formed using emitter metal as etch mask. The average threshold voltage of the fabricated device is 1.15V and the current gain is 50. The cut-off frequency of the device whose emitter area is $4\mu\text{m} \times 14\mu\text{m}$ reaches 40GHz under $I_B = 200\mu\text{A}$ and $V_{CE} = 2\text{V}$ bias condition. The measured results of two transimpedance amplifiers designed and fabricated show that the transimpedance gain is 50.6dBΩ and 45.1dBΩ, 3dB bandwidth is 2.7GHz and 2.5GHz, and the minimum noise figure of circuit is 2.8dB and 3.2dB respectively.

Key words: self-aligned BE junction process; InGaP/GaAs HBT; transimpedance amplifier

EEACC: 1220

Article ID: 0253-4177(2003)04-0406-05