

微波低噪声 SiGe HBT 的研制

钱 伟 张进书 贾宏勇 林惠旺 钱佩信

(清华大学微电子所, 北京 100084)

摘要: 利用 $3\mu\text{m}$ 工艺条件制得 SiGe HBT (Heterojunction Bipolar Transistor), 器件的特征频率达到 8GHz. 600MHz 工作频率下的最小噪声系数为 1.04dB, 相关功率增益为 12.6dB, 1GHz 工作频率下的最小噪声系数为 1.9dB, 相关功率增益为 9dB, 器件在微波无线通信领域具有很大的应用前景.

关键词: HBT; SiGe; 微波; 低噪声

EEACC: 2560B; 2560J

中图分类号: TN322+.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-4177(2000)05-0445-06

Low Noise Microwave SiGe HBTs

QIAN Wei, ZHANG Jin-shu, JIA Hong-yong, LIN Hui-wang and TSIEN Pei-xin

(*Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

Received 10 March 1999, revised manuscript received 28 May 1999

Abstract: Low noise, microwave SiGe heterojunction bipolar transistors are fabricated by using $3\mu\text{m}$ technology. The minimum noise figure $F_{\min}$ is 1.04dB at 600MHz, with associate power gain 12.6dB, $F_{\min}$ is 1.9dB with associate gain 9dB at 1GHz. These results show that the SiGe HBTs have excellent low noise characteristics over Si BJTs.

Key words: HBT; SiGe; microwave; low noise

EEACC: 2560B; 2560J

Article ID: 0253-4177(2000)05-0445-06

1 引言

Si 上外延生长高质量的应变 SiGe 合金薄膜的研究成功, 突破了常规 Si 器件中的一些限制因素. 采用 SiGe 材料作为基区的 SiGe HBT (Heterojunction Bipolar Transistor), 在器件的 EB 结和 BC 结处引入异质

钱 伟 男, 1970年出生, 博士研究生, 从事 SiGe 微波器件和电路的研究.

张进书 男, 1964年出生, 博士研究生, 从事 SiGe 微波功率器件和电路的研究.

1999-03-10收到, 1999-05-28定稿

结构,可以在获得较大的直流增益的同时提高基区的掺杂浓度,减小基区电阻,改善噪声性能,也可以采用薄的基区,提高频率性能.在高于1GHz的应用频段,Si低噪声器件必须使器件横向尺寸缩小,采用亚微米工艺,来提高噪声性能,而SiGe HBT可以不采用亚微米工艺就可以获得比Si BJT(Bipolar Junction Transistor)具有更好的频率性能和噪声性能,获得高频、大功率和低噪声的器件.与III-V族材料HBT相比,SiGe HBT可以采用先进的Si制作工艺,把新型的SiGe器件与先进的Si IC结合在一起,利用集成化,降低了成本.利用SiGe HBT制作信号处理集成电路,可以实现微波通信系统的集成.

自从1987年IBM公司制作出世界上第一个SiGe HBT^[1],全世界许多著名的研究机构和大学都开展了高性能SiGe HBT的研究^[2,3],SiGe HBT在1—3GHz左右的微波移动通信领域具有很大的应用前景.微波低噪声器件是通信系统的接收级中的关键元件之一,对工作在1GHz左右的微波低噪声SiGe HBT的研制具有重要的意义,而且具有很大的实用价值.

2 微波低噪声 SiGe HBT 的结构

SiGe HBT的一个重要的特点是与Si工艺相兼容,我们制作的器件采用UHV/CVD(Ultra High Vacuum/Chemical Vapor Deposition)外延工艺完成从集电区到发射区的材料生长,由于低噪声HBT发射区采用了轻掺杂层,而基区重掺杂,因此在器件结构上与常规Si器件不同,制作工艺也有变化.与常规器件工艺相比,我们制作的微波低噪声SiGe HBT在制作工艺方面的主要特点是:(1)微波低噪声SiGe HBT基区和发射区的掺杂浓度反转,SiGe基区的掺杂浓度高于 $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,有利于降低本征基区电阻.同时通过外基区硼离子注入来减小非本征基区电阻.为了减小发射结隧道电流,发射区掺杂浓度为 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$.通过发射极砷离子注入来减小发射极串联电阻和接触电阻并使基极和发射极接触从器件表面引出.(2)为了防止基区应变SiGe层的弛豫,工艺中不能有高的热处理过程.对注入杂质的损伤消除和激活采用红外快速热退火(860℃,10s),保证了SiGe基区不发生弛豫,同时可以控制杂质的再分布.(3)采用多层金属剥离工艺来形成发射极和基极的引线金属化,达到缩小器件的尺寸,降低器件的基区电阻,提高器件的工作稳定性的目的.

器件的结构如图1(a)所示,在掺杂为 $5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 的 n^+ 衬底上生长集电区、基区和发射区,材料生长完成后用二次离子质谱(SIMS, Secondary Ion Mass Spectrometer)对原始材料的锗和硼的分布进行了测量如图1(b)所示.器件的发射区掺磷 $2 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$,厚度200nm,基区掺杂层硼浓度为 $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$,厚

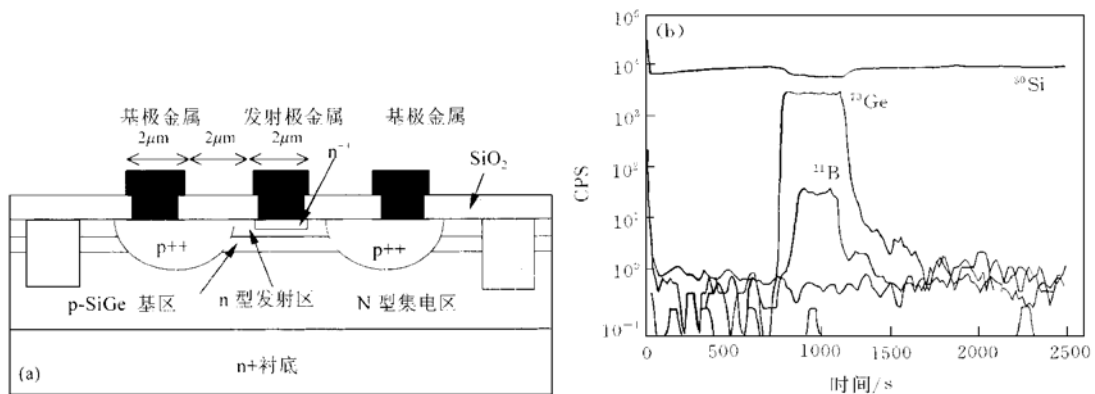


图1 微波低噪声 SiGe HBT 结构和掺杂图

FIG. 1 Diagram of Structure and Doping Profile for Low Noise Microwave SiGe HBT

度50nm,集电区掺磷 $2 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$,厚度1500nm.为了控制离子注入和快速热退火引起的高浓度掺硼基区的杂质外扩散形成寄生势垒,在硼掺杂区的两侧有约10nm的不掺杂SiGe层,使得SiGe层的总厚度为70nm.

在制作工艺中,先用胶或氧化层保护有源发射区,对外基区进行硼注入,然后在有源发射区中光刻出发射区注入孔进行As注入,再光刻出基区金属接触孔,测射多层金属Cr/W/Pt/Au,电镀Au后采用剥离工艺进行多层金属化,金属条宽 $2\mu\text{m}$,金属间距 $2\mu\text{m}$,因此,发射区注入孔同时也是发射区金属接触孔,这样发射区和基区接触金属之间的间距受到光刻条件的限制,但发射区金属接触孔和外基区之间的间距只受到光刻套准精度的限制,结果既减小了器件的基区电阻,也简化了制作工艺.

3 微波低噪声 SiGe HBT 的特性和分析

3.1 微波低噪声 SiGe HBT 的直流和频率特性

利用常规 $2\mu\text{m}$ Si工艺条件完成了微波低噪声SiGe HBT的制作,图2(a)示出了直流增益和集电极电流的关系,由于BE结异质结的作用,虽然基区掺杂浓度大于发射区(20倍),器件的直流增益仍可以大于160.由于基区复合电流和漏电流的影响,小电流下的直流增益较小,当电流过大时,由于大电流下的基区扩展效应,直流增益略有下降.

晶体管的特征频率 f_T 是共射输出交流短路电流放大系数 β 随频率增加而下降到1时的工作频率,理论上共射晶体管交流短路放大系数的幅值为:

$$|\beta| = \frac{\beta_0}{[1 + (f/f_\beta)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中 β_0 是器件的直流增益; f_β 是 β 的幅值下降3dB时对应的工作频率.对微波晶体管,当工作频率 f 在 $f_\beta \ll f < f_T$ 时,交流短路放大系数与工作频率的乘积是一个常数,等于 f_T .

$$f_T \approx \beta_0 f_\beta \approx |\beta| f \quad (2)$$

因此通过测量某一工作频率 $f(f \ll f_T)$ 下器件的电流增益,利用上式可以得到 f_T .

用网络分析仪HP8510测得晶体管的S参数,再把S参数转化为h参数,h参数中的 h_{21} 即为交流电流放大系数:

$$h_{21} = \frac{-2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \quad (3)$$

由 $|h_{21}f| = f_T$, h_{21} 随工作频率 f 的提高以3dB/倍频程的速率下降,因此通过测量工作频率为 $f(f \ll f_T)$ 时的 h_{21} ,再外推 h_{21} 到1时对应的频率即为 f_T .由于SiGe HBT的特征频率在测量范围内大于1GHz,可以选择500MHz点为 f_T 的测量点,可得SiGe HBT的特征频率 f_T 与集电极电流 I_C 的关系如图2(b)所示,器件的特征频率达到8GHz.

在 f_T-I_C 的关系中,电流较小时 f_T 也较小,这是由于发射极延迟时间较大造成的,大电流下 f_T 下降是由于基区扩展效应造成的.

下面分析发射极延迟时间对 f_T 的影响,由 f_T 的表达式:

$$f_T = \frac{1}{2\pi\tau} = \frac{1}{2\pi(\tau_E + \tau_B + \tau_D + \tau_C)} = \frac{1}{2\pi(\tau_{EC} + \tau_{BC})} \quad (4)$$

τ_E 为发射极电容和集电极电容对发射极电阻 r_e 的充电延迟时间:

$$\tau_{EC} = \tau_E = r_e(C_{be} + C_{bc}) \quad (5)$$

τ_{BC} 为总的延迟时间中 τ_{EC} 除外的其它延迟时间之和,包括基区渡越时间 τ_B ,集电区电阻对集电结电容的充电延迟时间 τ_C ,以及集电区耗尽区渡越时间 τ_D ,

$$\tau_{BC} = \tau_B + \tau_C + \tau_D = \frac{W_B^2}{2D_{nB}} + R_C C_{bc} + \frac{X_{BC}}{2V_{sat}} + R_C C_{bc} \quad (6)$$

式中 C_{bc} 为BC结耗尽层电容; R_C 为集电区体电阻; W_B 为基区宽度; D_{nB} 为基区中少数子扩散系数; X_{BC} 为集

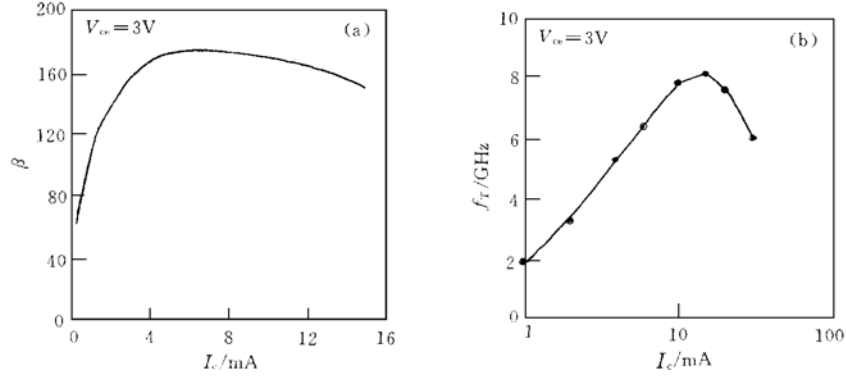


图2 微波低噪声 SiGe HBT 直流增益和特征频率

(a) 直流增益和集电极电流的关系, (b) 特征频率和集电极电流的关系.

FIG. 2 DC Gain and Characteristic Frequency for Microwave Low Noisy SiGe HBT

电区耗尽层宽度. v_{sat} 为电子在耗尽层的饱和漂移速度. τ_{BC} 基本上与集电极电流无关, 由(4)式可得:

$$\frac{1}{2\pi f_T} = r_e(C_{be} + C_{bc}) + \tau_{BC} = \frac{kT}{qI_e}(C_{be} + C_{bc}) + \tau_{BC} \quad (7)$$

I_e 为发射极电流. 根据实验得到的 f_T 如图2(b), 计算得到 $(1/2\pi f_T) - (1/I_e)$ 关系如图3所示, 小电流时 τ_{BC} 很大, f_T 主要由发射极延迟时间决定, $1/f_T$ 和 $1/I_e$ 的关系在小电流下为一条直线, 由直线的斜率得到 $C_{be} + C_{bc}$ 的值为 2.04 pF, 由于集电区掺杂比发射区低很多, C_{be} 大于 C_{bc} 的值. 直线反向延长在 Y 轴上的截距表示 (7) 式中 I_e 趋于无穷大时的 $1/2\pi f_T$ 的值, 即为 τ_{BC} , 大电流时实际的曲线上升是由于 W_B 增加造成 f_T 下降, 这时的 f_T 受 τ_{BC} 的影响很小.

图4示出了 SiGe HBT 的总充电延迟时间 τ 和除发射极 BE 结电容充电时间 $r_e C_{be}$ 之外延迟时间 ($\tau - r_e C_{be}$) 与集电极电流的关系, 两条曲线的差值即为发射极电阻 r_e 对电容 C_{be} 的充电延迟. 随着电流的增加, r_e 迅速减小, BE 结充电延迟时间减小, τ 迅速下降, 表明小电流下发射极电容的充电延迟时间很大, 占总延迟时间的绝大部分; 在大电流下随着电流的增加, 延迟时间逐渐增加, 这主要是大电流下基区扩展效应造成

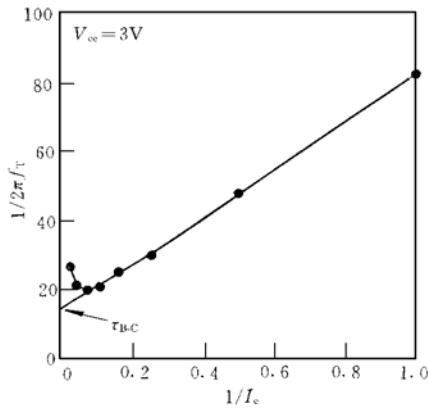
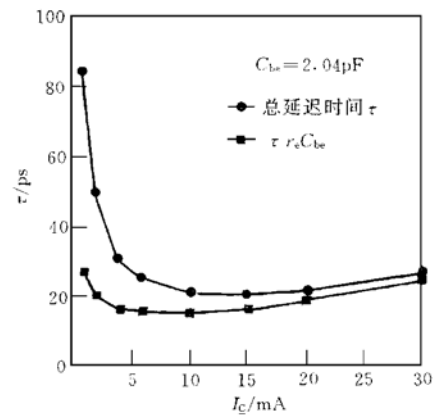
图3 SiGe HBT 的 $1/2\pi f_T - 1/I_e$ 关系FIG. 3 $(1/2\pi f_T)$ Versus $(1/I_e)$ in SiGe HBT $(1/I_e)$ 

图4 总延迟时间和 BE 结延迟时间与电流的关系

FIG. 4 Delay Time τ Versus I_c

的, 由于低噪声器件一般工作在小电流状态, 因此减小发射极的面积, 降低 BE 结电容, 减小发射极充电延迟时间, 可以大大提高器件小电流下的特征频率, 器件的噪声性能也能得到很大提高。

3.2 微波低噪声 SiGe HBT 的噪声特性

在实际应用中, 器件的噪声系数 F 和功率增益 G 与端口的匹配条件有关[4], 随匹配条件的不同而变化, 而器件的最小噪声系数 $F_{\min}$ 是在最佳噪声匹配条件下的噪声系数, 它反映了器件固有的噪声性能。SiGe HBT 在制作完成并进行封装后, 进行了最小噪声系数的测量。噪声系数的测试原理如图5(a)所示, 在噪声源不接电源的冷态条件下, 噪声源温度为 T_0 , 经过放大后测试接收机的输出功率 F_1 , 然后在不同的噪声源温度 T_1 和 T_2 下, 测得放大后的输出噪声功率, 调整精密衰减器使输出功率读数降回到冷态时的值, 设衰减因子为 Y , 器件的功率增益为 G , 测试接收机的噪声系数为 F_m , 则被测器件的噪声系数为:

$$F = F_1 - \frac{F_m - 1}{G} = \left[\frac{T_2}{T_0} - 1 \right] \frac{1}{Y - 1} - \left[\frac{T_1}{T_0} - 1 \right] \frac{Y}{Y - 1} - \frac{F_m - 1}{G}$$

测试盒内的器件如图5(b)所示, 通过调配器对器件的输入和输入端口调出器件的噪声最佳匹配状态, 然后测得器件的最小噪声系数, 同时可以测得在最小噪声匹配条件下器件相关功率增益 Gain。

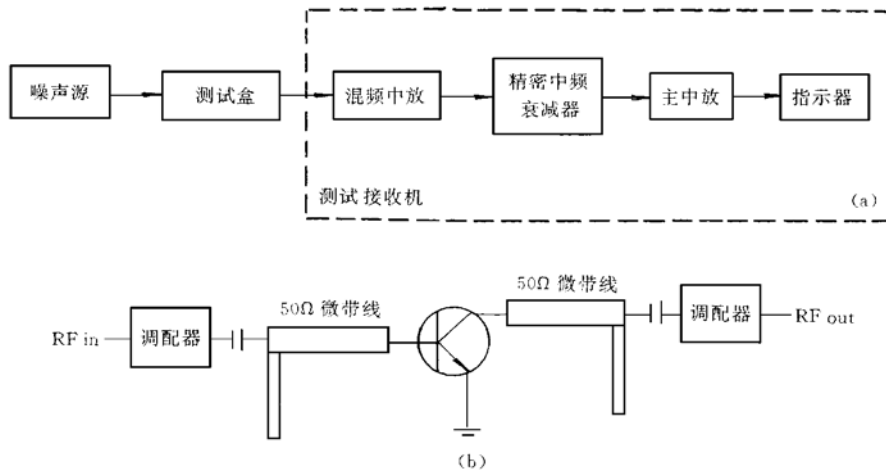


图5 (a) 噪声系数测试框图 (b) 测试盒电路

FIG. 5 (a) Noise Measurement System (b) Measure Box Circuit

用 HP8970B 微波噪声测试系统对 SiGe HBT 噪声系数进行测量。在 600MHz 下器件的最小噪声系数与集电极电流的关系如图6(a)所示。在 2mA 工作电流下最小噪声系数为 1.04dB, 相关功率增益为 12.6dB; 在 1000MHz 下器件的最小噪声系数如图6(b)所示。测量得到的噪声系数的最小值为 1.9dB, 相关功率增益为 9dB。

由于在不同的工作频率下最小噪声匹配电路也是不同的, 为了分析噪声系数的频率性能, 计算了本征器件最小噪声系数与工作频率的关系^[5], 在计算过程中忽略了器件各种封装参数和寄生参数的影响, 使得计算值会比实测值偏小。在最佳匹配状态下, 400MHz 工作频率下器件最小噪声系数为 0.9dB, 2000MHz 工作频率下最小噪声系数为 2.62dB。器件的最小噪声系数随工作频率的增加而迅速增加, 这是由于器件的横向尺寸和集电区厚度较大, 造成特征频率较低, 最小噪声系数受到特征频率的限制, 如果采用更先进的制作工艺, 缩小器件的尺寸, 提高器件的特征频率, 则器件的噪声性能能得到进一步的提高。

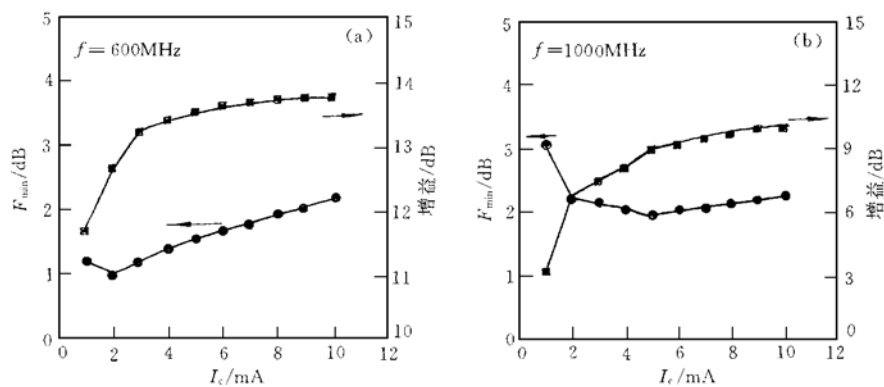


图6 600MHz 和1000MHz 频率下最小噪声系数与电流的关系

(a) 工作频率600MHz (b) 工作频率1GHz

FIG. 6 Minimum Noise Figure Versus Current at 600(a) and 1000(b) MHz Respectively

4 结论

利用常规 $3\mu\text{m}$ Si 工艺条件制得了在600MHz 工作频率下噪声系数1.04dB, 在1GHz 工作频率下最小噪声系数1.9dB 的微波低噪声 SiGe HBT, 对器件的频率和噪声分析表明, 提高制作工艺条件, 缩小器件的尺寸可以大大提高频率性能和噪声性能. 实验结果表明, 在微波移动通信领域, SiGe HBT 具有很大的应用潜力.

致谢 本论文的工作得到了微电子所陈培毅和齐臣杰老师, 以及电子部13所梁春广院士的指导和帮助, 13所王于辉, 孙同乐, 王庆海, 高颖等提供了很多的帮助, 台湾交通大学冯明宪, 林其渊为本论文的工作提供了材料, 在此表示感谢.

参 考 文 献

- [1] S.S.Iyer *et al.*, Silicon-Germanium Base Heterojunction Bipolar Transistors by Molecular Beam Epitaxy, IEDM-1987, 874—877.
- [2] K.Oda *et al.*, 130GHz f_T SiGe HBT Technology, IEDM-1997, 791—794.
- [3] A.Schuppen *et al.*, Enhanced SiGe Heterojunction Bipolar Transistors with 160GHz f_{max} , IEDM-1995, 743—746.
- [4] 黄香馥, 陈天麟, 张开智, 微波固体电路, 成都: 成都电讯工程学院出版社, 155—157, 1985[HUANG Xiang-fu, CHEN Tian-lin, ZHANG Kai-zhi, Microwave Solid State Circuits, Chengdu China, 1985, 155—157(in Chinese)].
- [5] R.J.Hawkins, Solid-State Electronics, 1977, 12: 191—196.