

低温 SiGe/Si HBT 的研制及性能分析

徐 晨,沈光地,邹德恕,陈建新,邓 军,魏 欢,杜金玉,高 国

(北京工业大学电子工程系和北京市光电子技术实验室,北京 100022)

摘 要: 用 MBE(分子束外延, Molecular Beam Epitaxy)生长的材料研制了在低温工作的 SiGe/Si HBT(异质结双极型晶体管, Heterojunction Bipolar Transistor). 其在液氮下的直流增益 $h_{fe}(I_c/I_b)$ 为 16000, 交流增益 (I_c/I_b) 为 26000, 分别比室温增益提高 51 和 73 倍. 测试了该 HBT 直流特性从室温到液氮范围内随温度的变化, 并作了分析讨论. 解释了极低温度时性能随温度变化与理论值的差异.

关键词: SiGe/Si HBT; 低温; 高增益

中图分类号: TN32 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2001) 02-0285-02

Fabrication and Characterization of SiGe/Si HBT Operating at Low Temperature

XU Chen, SHEN Guang-di, ZOU De-shu, CHEN Jian-xin, DENG Jun, WEI Huan, DU Jin-yu, GAO Guo

(Electronic Engineering Department, Beijing Polytechnic University and Beijing Optoelectronic Technology Laboratory, Beijing 100022, China)

Abstract: The SiGe/Si HBTs operating at low temperature were fabricated. The current gain $h_{fe}(I_c/I_b)$ over 16000 and (I_c/I_b) over 26000 have been observed at 77K, exceeding those at 290K by about 51 and 73 times, respectively. The temperature dependence of DC characteristics of the HBT between 290K and 77K was described and analyzed. The departure from theoretical expectation of this dependence at very low temperature was discussed.

Key words: SiGe HBT; low temperature; high current gain

1 引言

随着低温电子学的发展, 加大了对在低温环境下具有高性能的器件和电路系统的需求, 例如在红外传感探测, 超导, 空间技术以及未来的低温计算机等领域. 通常 Si BJT 由于发射区的重掺杂^[1]及基区的载流子冻析效应^[2], 在低温下电流增益等会严重恶化. 采用一些特殊的设计和高质量的低温外延生长技术可使这种现象有所改善^[3]. 而 SiGe HBT 由于异质结的优势, 可采用低发射区掺杂和高基区掺杂, 完全克服了上述现象, 在低温下显示出优异的增益特性^[4]. 本文报道了我们所研制的 SiGe HBT 的低温特性, 并作了分析讨论.

2 器件的制备

器件的材料生长采用 MBE 方法. 基本结构为: 在 n + Si 衬底上生长 n - Si 集电区 (400nm, Sb 掺杂 $N_d = 7 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$), 本征 SiGe 隔离层 (5nm), p + SiGe 基区 (50nm, Ge 平均组分 $x = 0.23$, B 掺杂 $N_a = 1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$), 本征 SiGe 隔离层 (5nm), n - Si 发射区 (100nm $N_d = 5 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$), n + Si 帽层 (100nm, Sb 掺杂 $N_d = 2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$). 其中 SiGe 本征隔离层的作用是防止 B 杂质的偏析和外扩^[5], 以及减小漏电流. 器件制作采用双台面结

构工艺, 采用 PECVD 方法生长 SiO_2 层和腐蚀停止技术.

3 测试结果和分析

利用 HP4145B 测试了实验样管的 Gummel 特性. 图 1 是 290K 和 77K 时的 Gummel 曲线. 由于该仪器测试最大电流限制在 100mA 以下, 在很大注入时的现象无法观察. 图 2 是在 77K 和 290K 时电流增益 $h_{fe}(I_c/I_b)$ 和 (I_c/I_b) 与 I_c 的关系. 可见在较大的 I_c 下, 当温度从室温降到 77K 时, h_{fe} 和 (I_c/I_b) 急剧增大. h_{fe} 峰值从 313 提高到大于 16000, 峰值从 355 提高到大于 26000. 这是由异质结的特性所决定的. 根据文献 [6, 7], SiGe HBT 的发射结的注入比 β 和增益 h_{fe} 与温度近似成如下关系:

$$h_{fe} |_{V_{be}} = \frac{\exp(-E_{g, \text{Ge}(0)}/kT) \exp(E_{gb}^{app}/kT)}{1 - \exp(-E_{g, \text{Ge}(grade)}/kT)} \quad (1)$$
$$\frac{E_{g, \text{Ge}(grade)}}{KT} \exp(E_{gb}^{app}/kT) \exp(-E_{g, \text{Ge}(0)}/kT) \quad (2)$$

其中, $E_{g, \text{Ge}(0)}$ 是基区发射结端由于 Ge 组分引起的带隙变窄. $E_{g, \text{Ge}(grade)}$ 是基区发射结端和集电结端带隙变窄的差值. E_{gb}^{app} 是重掺杂在基区引起的带隙变窄. 对我们的样管,

收稿日期: 2000-03-07; 修回日期: 2000-08-22

基金项目: 国家“863”计划 (No. 863-307-15-4 (06)); 国家 973 项目 (No. G20000683-02); 国家自然科学基金 (No. 69876004); 国家自然科学基金重大项目 (No. 69896260-06); 北京市科委高技术重点项目和北京市自然科学基金 (No. 4962005)

$E_{g, Ge(0)} = 0.2 \times 0.74 = 148\text{meV}$, $E_{g, Ge(\text{grade})} = 0.05 \times 0.74 = 37\text{meV}^{[8]}$, $E_{gB}^{app} = 55\text{meV}^{[9]}$. 因而对于直流增益来说, $E_{g, Ge(0)}$ 这一项起主要作用, 而 $E_{g, Ge(\text{grade})}$ 项作用较小. 当温度降低时, 由于注入比呈指数增加, h_{fe} 亦近似呈指数增加. 从图 1 可见室温和低温的理想工作区差别很大, 这是由于在一定的 V_{be} 下, 随温度降低, 从发射区注入到基区的少子呈指数形式减少. 必须提高 V_{be} 来维持一定的工作电流, 见图 3. 图 4 是在一定的 I_c 下, 直流增益 h_{fe} 随温度的变化曲线. 图 4 中

为 $(E_{gB}^{app} + E_{g, Ge(0)})/k$, 为 $E_{g, Ge(0)}/k$, 图中还显示了只考虑 $E_{g, Ge(0)}$ 项的作用和同时考虑 $E_{g, Ge(0)}$ 项及 E_{gB}^{app} 项的作用时, h_{fe} 随温度变化的斜率 $E_{g, Ge(0)}/k$ 及 $(E_{g, Ge(0)} + E_{gB}^{app})/k$. 可见在温度不是很低, I_c 较大时, h_{fe} 随温度变化趋势的实验数据与上述理论结果相当一致. 但在较低温度下, 二者的差异很大. 尤其是 I_c 较小时, 增益随温度降低还有下降的趋势. 这主要是在很低的温度下, 发射结的缺陷电流影响相对较大. 对于 npn 双极晶体管:

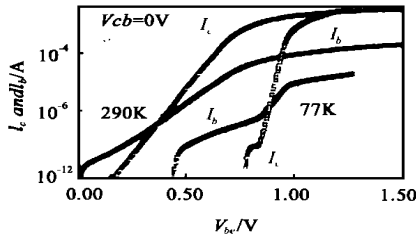


图 1 样管在 77K 和 290K 时 Gummel 特性

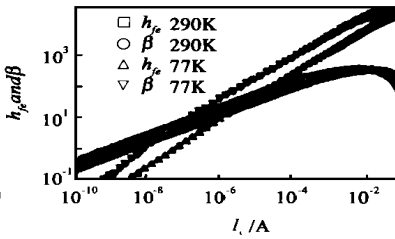


图 2 样管 h_{fe} 和 与集电极电流的关系

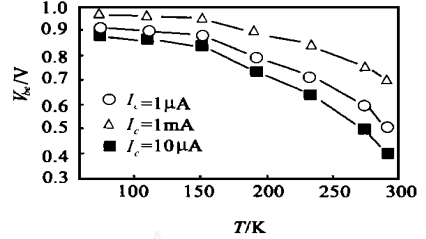


图 3 在一定的 I_c 下, V_{be} 随温度的变化

$$I_c = I_n - I_r \tag{3}$$

$$I_b = I_p + I_r + I_s \tag{4}$$

其中 I_n 是从发射区注入基区的电子电流, I_r 是 I_n 在中性基区中的复合部分, I_p 是从基区注入到发射区的空穴电流, I_s 包括在正向偏置下发射结空间电荷区内的复合电流和由于结界面态和 SiO_2/Si 界面态引起的复合和隧道等缺陷电流. 在较理想的情况下, 式(3)和式(4)中的 I_r 和 I_s 可忽略. 注入比 $\beta = I_n/I_p = I_c/I_b$. 按照式(1), 注入比随温度降低呈指数提高. 在 I_c 一定时, $I_b = I_p$ 应随温度降低而呈指数减小, 从而提高 h_{fe} . 但在温度很低及小注入时, 由于空间电荷区和结界面的缺陷的影响, I_s 的作用不能忽略, I_b 并不按这一规律随温度减小. 从图 4 容易得到在一定的 I_c 时, 样管的 I_b 随温度的变化. 在 I_c 较大而温度很低时, I_b 基本不再随温度下降而变化. 而在 I_c 较小时, I_b 甚至随温度下降而有所提高. 说明此时 I_b 的主要成分已是缺陷电流. 测试发现集电极的反向漏电流比发射结小得多, 而其周边长则大得多. 表明通过表面氧化层的漏电流不是主要因素. 这种缺陷电流可能与发射区电子通过界面缺陷进入基区的价带的隧道电流 I_T 有关. I_T 的特征是 $\ln I_T$ 与结电压 V 成线性关系, 且其斜率与温度无关^[10]. 根据实验, 当温度很低时, 在 I_c 为 $10^{-10} \sim 10^{-3}\text{A}$, 对应 I_b 为 $10^{-8} \sim 10^{-6}\text{A}$ 的范围内, $\text{Log } I_b$ 与 V_{be} 关系符合上述特征, 见图 5. 在温度为 153K, 113K 和 77K 时, 此斜率分别为 16.12, 15.97, 和 15.66. 这说明在 153K 以下, I_b 中斜率随温度变化的扩散电流成分和复

合电流成分已很弱. 由于 I_c 一定时, V_{be} 随温度降低而增加 (见图 3), 使得隧道漏电流增加, 并在 I_b 中占主导地位. 这也是 I_c 小于 $1\mu\text{A}$ 时, I_b 随温度下降而增加的原因. 因此, 如果 I_c 一定, 温度降低时, I_b 并不按指数规律减小, 造成了增益性能偏离理论值. 在 I_c 较小, I_p 很小时, 漏电流作用很大.

4 结束语

利用 MBE 生长的材料和双台面工艺研制的 SiGe/Si HBT 在低温下获得了极高的增益. 显示出低温应用的广阔前景. 但在温度极低时, 由于漏电流的影响, 使增益与理论值有较大差异, 在 I_c 较小时尤其明显. 可适当减小基区 Ge 组分, 提高异质结的质量, 并获得合适的低温增益.

作者简介:



徐 晨 1982 年毕业于西安交通大学电子工程系, 获学士学位. 1987 年毕业于上海科技大学材料科学系, 获硕士学位. 现为北京工业大学电子工程系副教授, 现主要从事高速半导体异质结器件的研究和教学工作.

参考文献:

[1] R. P. Mertens, R. J. Van Overtraeten and H. J. De Man. Heavy doping effects in silicon [J]. Advances Electronics Electron Phys., 1981, 55: 77.
 [2] W. P. Dumke. The effect of base doping on the performance of silicon bipolar transistors at low temperatures [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1981, ED-28: 494 - 500.

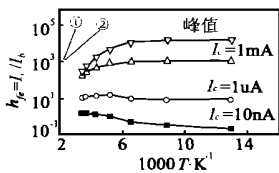


图 4 直流增益 $h_{fe} = I_c/I_b$ 与温度关系

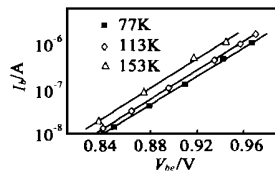


图 5 低温时 I_b 与 V_{be} 的关系

(下转第 274 页)

示对状态 0 至 7 的最大值比较,再将最大值之差进行判决,得到译码结果.处理器 PE 只在与状态 S_0 对应处理单元中,而不是在每一处理单元中.以上分析是分别讨论了四个中间量 Q_0, Q_1, Q_2, Q_3 的计算实现,在实际电路中,处理器的结构可以包含这四个部分,并需用有限数据长构成加减和比较器,而不是实数运算器.

4 结论

本文给出了 Turbo 译码器的构成方法与结构,为了验证本章所提出的量化方法与译码结构的正确性,在计算机上进行了仿真,结构对应上采用了多维数组的方法,得到了 Turbo 码在高斯信道下的性能,如图 7 所示.在对并行结构的仿真中,利用的是 MATLAB 仿真平台,并利用了多维数组进行计算,在输入量化中采用了 6bit 量化,中间计算采用了 8bit 量化,在 PC 机平台上未能发挥并行处理的优势.但由于使用了并行处理技术,数据的中间存储量比串行小,是提高译码速度的一种有效途径,这种方法的实用化还需用 FPGA 技术对译码性能进一步仿真.

参考文献:

- [1] WCDMA proposal :3 GPP proposal TS S1. 12 V2. 0. 0, TS 25. 212. V2. 2. 0 [Z].
- [2] Berrou C, Glavieux A. Near optimum error correcting coding and decoding: Turbo-codes [J]. IEEE Trans. on Commun. 1996, 44(10) :1261 - 1271.
- [3] Hagenauer, Hoehner P. A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications [A]. In: Proc GLOBECOM 89 [C], 1989:1680 - 1686.
- [4] Koch W, Baier A. Optimum and sub-optimum detection of coded data disturbed by time-varying intersymbol interference [A]. In: Proc. GLOBECOM 90 [C], 1990:1679 - 1684.
- [5] Robertson P, Hoehner P. Optimum and sub-optimum maximum a posteriori algorithms suitable for Turbo decoding [J]. Europ. Tran. On Tele. and Related Areas 1997, 8(2) :119 - 125.
- [6] Efanian J, Pasupathy S, Gulak G. Reduced complexity symbol detectors with parallel structures for ISI channels [J]. IEEE Trans. On Commun. 1994, 42(2/3/4) :1661 - 1671.

作者简介:



张中培 1967 年生,西南交通大学计算机与通信工程学院在职博士生,主要研究方向:差错控制编码与数据通信,在国内核心期刊发表论文章数篇.



周亮 1961 年生,1984 年在电子科技大学获硕士学位,在职博士生,电子科技大学抗干扰国防重点实验室副教授,研究方向为编码理论与应用.

(上接第 286 页)

- [3] John D Cressler, Jans H. Comfort, Emmanuel F. Crabbe et al. On the profile design and optimization of epitaxial Si- and SiGe-Base bipolar Technology for 77K applications-part 1: transistor DC design considerations [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1993, 40(3) :526 - 541.
- [4] J. C. Sturm, E. J. Prinz and C. W. Magee. Graded-base Di/Si_{1-x}Ge_x/Si heterojunction bipolar transistors grown by rapid thermal chemical vapor deposition with near-ideal electrical characteristics [J]. IEEE Electron Device Letters, 1991, 12(6) :303 - 305.
- [5] E. J. Prinz, et al. [J]. IEEE Electron Device Lett., 1991, 12(2) :42 - 44.
- [6] D. L. Harnam, et al. [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1995, 42(3) : 455 - 467.
- [7] H. Kroemer, Proc. IEEE 70, 1982:13 - 15.
- [8] Branimir Pejcinovic, et al. IEEE Trans. Electron Devices, 1989, 36(10) :2129 - 2137.
- [9] Zeljka Matutinovic-Krstelj, et al. Base resistance and effective bandgap reduction in n⁺p-n Si/Si_{1-x}Ge_x/Si HBTs with heavy base doping [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1996, 43(3) :457 - 466.
- [10] LI-SHENG YU and CUN-DA WANG. Properties of p-N and n-N heterointerfaces in GaAs-Al_xGel-xAs heterostructure LEDs [J]. IEEE Trans. Electron Devices, 1983, ED-30(4) :326 - 329.